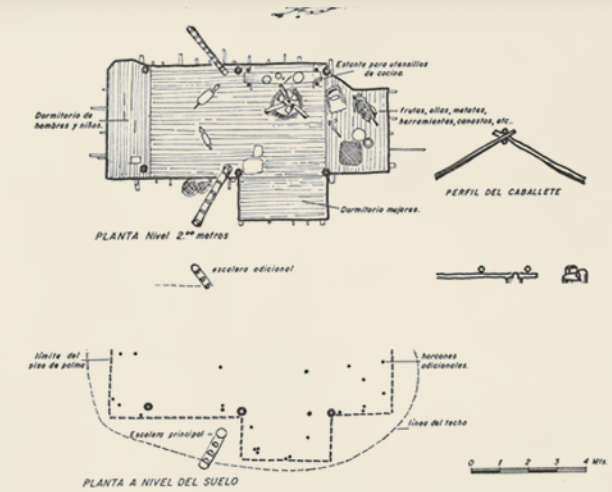
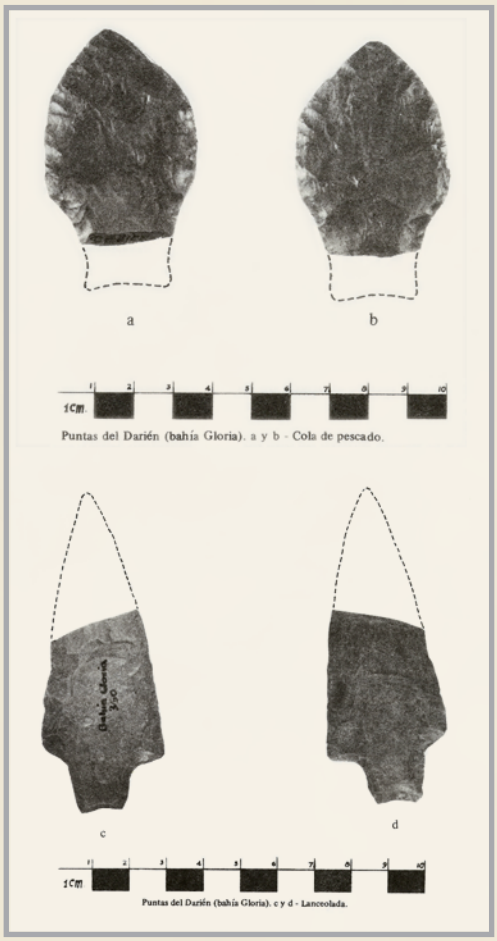
ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 165 • Págs. 301-478 • Octubre-Diciembre de 2018 • Bogotá - Colombia





Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 42 • Número 165 • Págs. 301-478 • Octubre-Diciembre de 2018 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

Elizabeth Castañeda, Ph. D.
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

Luis Fernando García, M.D., M.Sc.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Luis Caraballo, Ph. D.
Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Gloria Patricia Cardona Gómez, B.Sc., Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Central, Bogotá, Colombia

Rubén Ardila, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Fernando Marmolejo-Ramos, Ph. D.
Universidad de Adelaide, Adelaide, Australia

Ciencias Físicas

Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España

Diógenes Campos Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

María Elena Gómez, Doctor
Universidad del Valle, Cali

Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Ciencias Naturales

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

Jaime Cantera, Doctorat d´Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia

Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Colombia

Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora, Venezuela

Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Jorge Jácome, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta, Colombia

Ciencias Químicas

Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Ciencias de la tierra

Germán Poveda Jaramillo, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Matemáticas

Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Luis Español González, Doctor
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Alf Onshuus, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

Ángela María Guzmán, Ph. D.
University of Central Florida, Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef, Ph. D.
University of Amsterdam, The Netherlands

Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, USA

Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España

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

Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA, USA

José Rubens Pirani, Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile

Pedro Joseph Natham, Ph. D.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, México

Asistencia y coordinación editorial
Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diseño y diagramación
Johanna Morales

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica
Index Kewensis
Latindex
Mathematical Reviews
MathSciNet (on line data base)
OCLC (Online Computer Library Center)
PERIODICA
Publindex, Colciencias
SciELO, Colombia
Zentralblatt für Mathematik
Zoological Record

Publindex, Colciencias (convocatoria 768 de 2016), categoría B

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936
Tamaño: 21,5 x 28 cm
Papel: propalmate 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

1a
2 1b

Portada

Mosaico de ilustraciones incluidas en los artículos clásicos de los primeros 50 años de la revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 41(Suplemento):467-490, diciembre de 2017 doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn

1. Gerardo Reichel-Dolmatoff. Apuntes etnográficos sobre los indios del alto Sinú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1963, 12 (45): 29-40.
- **a.** Fig 2.Croquis de una casa, rio Esmeraldas
- **b.** Lám III. Objetos utilitarios de los Emberá; rio Esmeraldas

2. Gonzalo Correal Urrego. Evidencia de cazadores especializados en el sitio de La Gloria, Golfo de Urabá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis, Nat. 1983, 15 (58): 77-82.
Fotos 2 y 3. Puntas del Darién (bahía Gloria) a y b. Cola de pescado, c y d. Lanceolada

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Cra. 28 A no. 39A - 63 Bogotá D.C., Colombia, CP 111311 • **PBX:** +57(1)555-0470
Sitio web: www.raccefyn.co • **Correo electrónico:** revista@accefyn.org.co

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 42 • Número 165 • Págs. 301-478 • Octubre-Diciembre de 2018 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas
Biomedical Sciences

Identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos AP
Identification of proteins regulating gene expression in trypanosomatids
Elizabeth Ruiz, Cesar A. Ramírez, Paola Nocua, José María Requena, Concepción J. Puerta 306

Ciencias Físicas
Physical Sciences

New universal 3-3-1 models IA
Nuevos modelos 3-3-1 universales
William A. Ponce 319

Ciencias Naturales
Natural Sciences

External morphology of the fish parasite *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae), under the scanning electron microscope OA
Morfología externa del pez parásito *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae) observada mediante imágenes de microscopía electrónico de barrido
José Christian Díaz del Basto, José Iván Mojica, Hans-Werner Koyro 323

Sizes of the centric diatom *Actinocyclus normanii* as salinity function, a new tool for the assessment of paleoenvironments OA
Tamaños de la diatomea céntrica *Actinocyclus normanii* en función de la salinidad, una nueva herramienta aplicada a la interpretación de paleoambientes
Luis Alfonso Vidal, Luis Eduardo Castro, Javier Rodríguez-Barrios, María Isabel Vélez, Orlando Rangel 330

Identificación de hongos y bacterias asociados a fustes de melina (*Gmelina arborea* ROXB) en el departamento del Tolima, Colombia AO
Identification of fungi and bacteria associated with candahar stems (*Gmelina arborea* ROXB) in the department of Tolima, Colombia
Vivian Andrea Coy-Rodríguez, Lily Julieth Vargas-Osorio, Maryeimy Varón-López, Nathali López-Cardona 343

Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical AO
Temporary and spatial variation of nutrients and total suspended solids in the basin of a high mountain tropical river
Carlos A. Benjumea-Hoyos, Mayra A. Suárez-Segura, Silvia Lucía Villabona-González 353

Ciencias de la Tierra
Earth Sciences

El inicio de la emergencia en los Andes del norte: una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno AP
The onset of the mountain uplift in the northern Andes: A perspective based on Coniacian to Paleocene tectono-sedimentary studies
Germán Bayona 364

Ciencias de la Tierra
Earth Sciences

Cuatro modelos de redes de drenaje AP
Four Models of Channel Networks
Oscar José Mesa 379

La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano AP
Climatic uncertainty and the Colombian energy dilema
Camilo Montes 392

Modelo estructural del Campo Escuela Colorado a partir de modelos análogos AO
Structural model of *Campo Escuela Colorado* based on analog models
Camilo Anaya, Giovanny Jiménez-Díaz, Dilan A. Martínez-Sánchez 402

Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki AO
The Choco and Caribbean low-level jets during El Niño and El Niño Modoki events
Lina M. Serna, Paola A. Arias, Sara C. Vieira 410

Evidencias macromorfológicas y micromorfológicas de paleosuelos en el desierto de La Tatacoa y su variación sincrónica AO
Macromorphological and micromorphological evidence of the paleosols of La Tatacoa desert and its synchronic variation
María Teresa Flórez-Molina, Luis Norberto Parra-Sánchez, Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo, José María Jaramillo-Mejía 422

Vida de la Academia
Académicos honorarios
Palabras Carlos Enrique Ruiz 439
Palabras Fernando Zalamea Traba 442

Comentarios académicos
Premio Nobel de Física 449
Premio Nobel de Medicina 452
Premio Nobel de Química 454

In Memoriam
Henry Mauricio Martínez Gómez 456

Agradecimientos
Acknowledgements 461

Índice autores
Authors Index 462

Índice de artículos
Article Index 463

Enfoque y alcance
Focus and Scope 468

AP IA Artículo de posesión / Inaugural article AO OA Artículo original / Original article

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

Artículo de posesión

Ciencias Biomédicas

Identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos

Elizabeth Ruiz[1], Cesar A. Ramírez[1], Paola Nocua[1], José María Requena[2], Concepción J. Puerta[1,*]

[1] Laboratorio de Parasitología Molecular, Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
[2] Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC-UAM), Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 8 de Noviembre de 2018

Resumen

Los tripanosomátidos son parásitos causantes de patologías de reconocido impacto en salud pública como la enfermedad de Chagas, la enfermedad del sueño y la leishmaniasis. Estos microorganismos divergieron tempranamente de la línea evolutiva de los eucariotas y se caracterizan por poseer mecanismos peculiares de regulación génica finamente orquestados, tan eficaces que han asegurado su transmisión al permitirles adaptarse a ambientes inhóspitos y dispares como los de sus huéspedes invertebrados y mamíferos. Como consecuencia de su peculiar organización genómica, los tripanosomátidos han apostado por regular la expresión de sus genes a través de mecanismos posteriores a la transcripción, mediados principalmente por la acción de proteínas de unión a ARN (*RNA-binding proteins*, RBP), que reconocen su mensajero blanco gracias a la presencia de elementos reguladores en *cis* y se asocian con el ARN formando complejos ribonucleoprotéicos. De esta manera, las células establecen redes reguladoras en las que una misma RBP puede actuar sobre centenares de ARN mensajeros y el destino de cada uno de estos es dictado por la combinación de RBP con las que interactúa. Si bien mediante herramientas de bioinformática se han predicho cerca de un centenar de proteínas con capacidad de unión al ARN en tripanosomátidos, son pocas las que se han caracterizado y, sin duda, son muchas las que están aún por descubrir. En este artículo, se presentan las estrategias seguidas para la identificación y caracterización de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos durante la última década en nuestro grupo de investigación, especialmente de las proteínas RBP directamente implicadas en la regulación posterior a la transcripción de los genes *HSP70* de *Leishmania braziliensis*. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Estrategia; Expresión génica; Proteínas de unión a ARN; Regulación génica; Tripanosomátidos.

Identification of proteins regulating gene expression in trypanosomatids

Abstract

Trypanosomatids are parasites that cause pathologies with renowned impact on public health such as Chagas disease, the sleeping sickness, and leishmaniasis. These eukaryotes are characterized by having diverged early from their evolutionary path developing regulatory mechanisms that are efficient and finely orchestrated. Mechanisms which have ensured their transmission by allowing their adaptation to inhospitable and disparate environments such as those encountered in their invertebrate and mammal hosts. As a consequence of their peculiar genome organization, trypanosomatids have opted for regulating their gene expression mainly through post-transcriptional mechanisms, which are mediated through the action of RNA-binding proteins (RBP). These proteins recognize trypanosomatids target messengers due to the presence of *cis* elements and they link to the corresponding RNA forming ribonucleoprotein complexes. Thus, cells establish regulatory networks where a single RBP can act over hundreds of RNA messengers, and the destiny of any given RNA is dictated by the combination of the RBP with which it interacts. Around 100 RNA-binding proteins have been predicted by bioinformatics tools in trypanosomatids, but few of them have been characterized and there is no doubt that many are to be discovered still. In this article, we present the strategies used for the identification and characterization of gene-expression regulatory proteins in trypanosomatids over the past decade in our research group, particularly of RBPs directly implicated in the post-transcriptional regulation of the *HSP70* genes of *Leishmania braziliensis*. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Gene regulation; Pipeline; RNA binding protein; Trypanosomatids.

***Correspondencia:**
Concepción J. Puerta, cpuerta@javeriana.edu.co, **Recibido:** 15 de junio de 2018, **Aceptado:** 25 de julio de 2018, **Editor:** John Mario González

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

Introducción

Los tripanosomátidos son parásitos protozoos flagelados de importancia médica que se transmiten al hombre y a los animales a través de insectos vectores y causan diversas enfermedades de reconocido impacto en salud pública como la enfermedad de Chagas, la enfermedad del sueño y la leishmaniasis. Estos microorganismos eucariotas se caracterizan por haber divergido tempranamente de la línea evolutiva, de tal manera que poseen mecanismos de regulación génica tremendamente eficaces que pueden calificarse como *sui generis,* y que les han permitido enfrentar los sistemas de defensa de sus huéspedes y completar su complejo ciclo biológico tras millones de años. Así, para lograr adaptarse a ambientes tan disímiles como los de sus huéspedes invertebrados y mamíferos, adoptan a lo largo de su ciclo de vida diversas formas que son el resultado de una orquestada modulación de la expresión de sus genes, lo cual redunda no solo en la adquisición de una morfología propia, sino de un potencial bioquímico y una capacidad de adaptación diferentes (**Puerta,** 2007). A diferencia de lo que ocurre en la mayoría de eucariotas, la expresión génica en los tripanosomátidos se regula después de la transcripción gracias, precisamente, a la organización génica peculiar que presentan (**Clayton,** 2016). Sus cromosomas contienen grandes agrupaciones génicas, algunas conformadas por más de un centenar de genes, a menudo sin ninguna relación funcional, pero sí con la misma orientación de la transcripción. Estas agrupaciones se denominan unidades de grupos de genes policistrónicos (*polycistronic gene clusters,* PGC) y están diseñadas para ser transcritas como grandes policistrones (**Berriman, *et al*.,** 2005; **El-Sayed, *et al*.,** 2005; **Ivens, *et al.,*** 2005). En cada cromosoma existen varias unidades PGC; las unidades de transcripción vecinas tienen una orientación convergente o divergente y están separadas por las denominadas regiones de cambio de hebra. Una vez se genera el transcrito policistrónico, debe ser procesado y convertido a ARNm monocistrónicos antes de ser traducido, lo cual es mediado por dos procesos íntimamente acoplados: el procesamiento en *trans* o *trans-splicing* y la poliadenilación (**Requena,** 2011). En el primero, se adiciona en el extremo 5' una secuencia conocida como *spliced leader* (SL) de 39 nucleótidos, la cual ya porta la caperuza o estructura cap (cap-4 en tripanosomátidos) propia de los ARN mensajeros, cuya función, al igual que sucede en el resto de eucariotas, es proteger los ARNm y facilitar su interacción con la maquinaria de traducción (**Agabian,** 1990; **Bangs, *et al*.,** 1992). Por otra parte, en el proceso de poliadenilación se adiciona una cola de adeninas en el extremo 3' de los mensajeros tras el corte endonucleotídico, la cual, en general, le otorga estabilidad a la molécula (**LeBowitz, *et al*.,** 1993).

La peculiar organización génica y la transcripción policistrónica de estos organismos explican por qué la tasa de transcripción es similar en la mayoría de sus genes. En consecuencia, dada la pérdida de este punto de control, los tripanosomátidos han apostado por regular la expresión de sus genes a través de mecanismos posteriores a la transcripción, entre ellos el procesamiento del pre-ARNm y el transporte, la localización, la estabilidad y la traducción de los mensajeros monocistrónicos maduros (**Araujo & Texeira,** 2011). Todos estos procesos están mediados por la acción de proteínas de unión a ARN (*RNA binding protein,* RBP), que reconocen su mensajero blanco gracias a la presencia de elementos *cis* localizados en las sus regiones 5´ y 3´no traducidas (*untranslated región,* UTR) y se asocian con dicho ARN formando un complejo ribonucleoproteico cuya composición va a dictar el destino de los mensajeros (**Cassola & Frash,** 2009; **Romaniuk, *et al.,*** 2016). De esta manera, las RBP desempeñan un papel central en la regulación de la expresión génica, y ya que no puede haber una RBP específica para cada transcrito, las células han establecido redes reguladoras en las que una misma RBP puede actuar sobre centenares de ARN mensajeros (regulones u operones de ARN), en tanto que el destino de cada ARN es dictado por la combinación de RBP con las que interactúa (**Lapointe, *et al*.,** 2015**; Muller-McNicoll & Neugebauer,** 2013).

Si bien ya se conocen cerca de un centenar de proteínas con capacidad de unión al ARN en tripanosomátidos (**Kramer & Carrington,** 2011; **Romaniuk, *et al.,*** 2016), sin duda son muchas las que están aún por descubrir. Dada su divergencia evolutiva, la mayoría de las proteínas de estos parásitos carecen de ortólogos reconocibles en otros eucariotas. Además, muchas RBP carecen de dominios de unión a ARN típicos. En este artículo, se presentan las estrategias seguidas para la identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos durante la última década en el Laboratorio de Parasitología Molecular del Departamento de Microbiología de la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana, trabajos que se han desarrollado en colaboración con el Laboratorio de Regulación de la Expresión Génica en *Leishmania* del Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" de la Universidad Autónoma de Madrid. Entre los estudios llevados a cabo, se describen con mayor detalle y consignando resultados ilustrativos aquellos dedicados a la identificación y caracterización de proteínas RBP directamente implicadas en la regulación posterior a la transcripción de los genes *HSP70* de *Leishmania braziliensis*.

Concepto y punto de partida

Aunque la investigación propuesta es de carácter básico y su objetivo es aumentar nuestro conocimiento sobre los mecanismos de control de la expresión génica en tripanosomátidos desentrañando las redes de interacción entre las RBP y sus mensajeros blancos, no podemos olvidar que estos organismos son patógenos que actúan en humanos. Por ello, como punto de partida se propuso el estudio de la expresión de proteínas críticas para el parásito o de factores de virulencia, cuyos mensajeros (más concretamente, las

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

regiones UTR) se usaron como cebos para la captura de las RBP. En este sentido, el primer paso del estudio consistió en la elección del gen y del parásito a estudiar. Si bien en nuestro grupo se ha trabajado con otros tripanosomátidos, se escogió *Leishmania* como el tripanosomátido objeto de estudio por las siguientes razones: *Leishmania* es el agente causal de la leishmaniasis, parasitosis asociada a la pobreza con un amplio espectro de manifestaciones clínicas que van desde lesiones cutáneas autocurativas (LC), pasando por lesiones mucocutáneas (LMC) causantes de desfiguración hasta afectaciones viscerales (LV), siendo estas últimas fatales si no se las trata adecuadamente **(Bañuls, *et al*.,** 2007). Se estima que aproximadamente 12 millones de personas sufren actualmente leishmaniasis en un centenar de países de todo el mundo, y al menos 500.000 nuevos casos de LV y 1,5 millones de casos de LC grave se reportan anualmente (**Alvar, *et al.,*** 2012). En Latinoamérica, la leishmaniasis es endémica en 22 países, y *Leishmania* (*Viannia) braziliensis* es el principal agente causante de la forma mucocutánea. En Colombia, la leishmaniasis es endémica en casi todo el territorio nacional, y *L. braziliensis* es una de las seis principales especies causantes de leishmaniasis cutánea y mucocutánea en el país (**Instituto Nacional de Salud - INS,** 2011).

Una vez elegida *L. braziliensis*, se pensó en estudiar un factor clave como es la proteína de choque térmico de 70 kDa (HSP70) con base a las siguientes características: (i) durante la transición de promastigote (insecto-vector) a amastigote (huésped mamífero), se requiere de la actividad chaperona de las proteínas de choque térmico, fundamentalmente de la HSP70 (**Requena,** 2012); (ii) a partir de un determinado gen del locus *HSP70* (el *HSP70-II*) de *Leishmania infantum* la expresión de dicha proteína es necesaria para la supervivencia de los promastigotes en fase estacionaria y de los amastigotes tanto *in vitro* como *in vivo* (**Folgueira, *et al*.,** 2008); (iii) la depleción del gen *HSP70-II* disminuye la capacidad infectiva del parásito y, por ende, la enfermedad que ocasiona según diferentes modelos animales (**Carrion, *et al*.,** 2011; **Folgueira, *et al*.,** 2008), y (iv) induce una fuerte respuesta inmunitaria humoral y celular (**Requena, *et al*.,** 2012).

El factor de virulencia

Dado que las RBP gobiernan la regulación posterior a la transcripción a través de su interacción con elementos en *cis*, localizados principalmente en las regiones 5′ y 3′ UTR de los mensajeros blanco (**Kramer & Carrington,** 2011), en la primera etapa del desarrollo de la propuesta experimental, es necesario conocer la arquitectura de los genes y de los mensajeros del factor de virulencia seleccionado.

En este caso, se encontró que *L. braziliensis*, al igual que otras especies del género *Leishmania*, posee dos tipos de genes *HSP70,* el *HSP70-I* y el *HSP70-II*, los cuales se organizan en el cromosoma 28 en una agrupación conformada por seis copias de los genes *HSP70-I* y una de los *HSP70-II* (**Ramírez, *et al*.,** 2011). Cabe mencionar que estos genes se diferencian solamente en la secuencia y la longitud de su región 3′ UTR (**Ramírez, *et al*.,** 2011), pero dichas diferencias han resultado fundamentales en los mecanismos moleculares de adaptación del parásito, pues le permiten tolerar el estrés térmico al que es sometido durante su ciclo de vida: 26 °C en el insecto vector y 35 a 37 °C en el huésped mamífero **(Folgueira, *et al*.,** 2005). Para definir y caracterizar la región 5′ UTR, común a ambos mensajeros, así como la 3′ UTR específica para cada uno de ellos, se hicieron ensayos de RT-PCR a partir del ARN de formas promastigotas del parásito; a continuación, los ADN complementarios (ADNc) obtenidos se clonaron y secuenciaron (**Ramírez**, 2012). Para el caso de la región 5′ UTR (número de acceso al GenBank JF449363, posiciones 1-198), se encontró que, además de la secuencia SL de 39 nucleótidos (nt), esta comprende los 198 nt corriente arriba del codón de inicio de la traducción. Se observó que las regiones 3′ UTR abarcan 936 (UTR-I, número de acceso al GenBank JF449364, posiciones 143-1078) o 932 (UTR-II, número de acceso al GenBank JF449365, posiciones 143-1074) nucleótidos corriente abajo del codón de parada de los genes respectivos (Figura 1). Teniendo en cuenta el papel de los elementos *cis* presentes en las UTR como mediadores de la interacción ARN-proteína, se procedió a

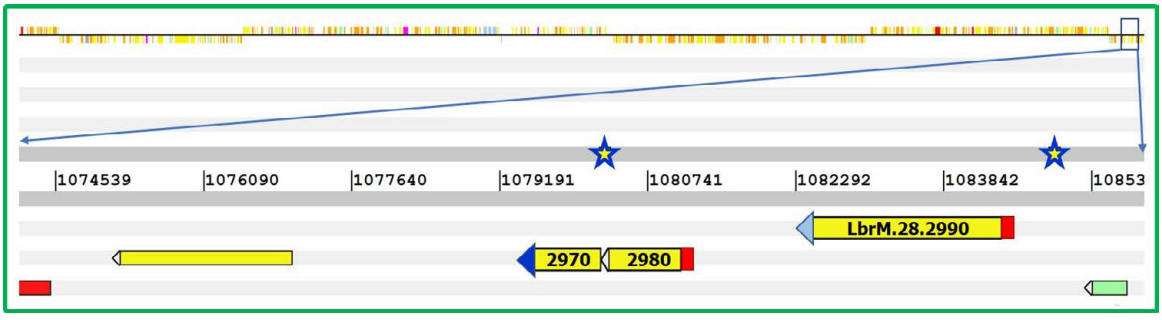


Figura 1. Ubicación de las regiones UTR determinadas para los genes *HSP70* sobre el cromosoma 28 en el genoma publicado de *L. braziliensis*. El gen LbrM.28.2990 (2990), codificante para la proteína HSP70, es portador de la región 3′ UTR-I (triángulo azul claro) mientras que el gen LbrM.28.2970 (2970), también codificante para la proteína HSP70, tiene la región 3′ UTR-II (triángulo azul oscuro). Los genes LbrM.28.2990 y LbrM.28.2980 (2980) comparten la región 5′ UTR. Cada estrella simboliza un hueco en la secuencia genómica actualmente disponible en la base de datos (GeneDB.org).

la identificación de secuencias que potencialmente pudieran funcionar como tales elementos. Para ello, se implementó una aproximación que combinó hallazgos previos consignados en la literatura con el análisis computacional de secuencias conservadas y la predicción de la estructura secundaria del ARN mediante la cual se identificaron dos secuencias ricas en pirimidinas sobre la 3′ UTR-I (**Ramírez,** 2012). Una de ellas, ubicada en la posición 808-842 (5′ GCGCTCCCCCTCCTGCCGCCTGTCTTCCTCCCCTT 3′), contiene tramos de cadena sencilla y tiene un 53,8 % de identidad con un elemento rico en pirimidinas de la región 3′ UTR del gen *HSP83* de *L. amazonensis* relacionado con la traducción preferencial de estos genes en condiciones de choque térmico (**David, *et al.*,** 2010). Otro elemento *cis* putativo (5′ ACCGACTCTCTTTCCTCCCCCTACCCGTA 3′) se encontró en una región altamente conservada entre los nt 489 y 605 de la 3′ UTR-I, posición que concuerda con la localización de una secuencia reguladora identificada en la región 3′ UTR de los genes *HSP70-I* de *L. infantum*, asociada con la acumulación de estos mensajeros en respuesta al choque térmico (**Quijada, *et al.*,** 2000). Al hacer la predicción de la estructura secundaria de estas regiones en *L. braziliensis*, se observó que el tramo rico en pirimidinas presentó una identidad del 89,7 % con la misma región en *L. infantum* y se ubicó en una zona estructurada en forma de cadena sencilla (**Ramírez,** 2012). La conformación del ARN en cadena sencilla es una condición importante para que las proteínas de unión a ARN puedan interactuar con este, dado que cuando el ARN adopta una estructura de doble hélice, el surco mayor es demasiado estrecho e impide el establecimiento de puentes de hidrógeno entre las bases nitrogenadas del ARN y los residuos de aminoácidos de la proteína implicada (**Baumeister,** 1997). Por su parte, en la 3′ UTR-II del mensajero de la HSP70 se encontraron dos motivos, ambos en regiones de cadena sencilla (**Nocua, *et al.*,** 2017; **Ramírez,** 2012). Uno de ellos, localizado en la posición 252-302, tiene forma de horquilla y se relaciona con los elementos ARE, conocidos por desestabilizar a los ARNm que los contienen (**Di Noia, *et al.*,** 2000): 5′ ATGTCTTTTATTTTTTGTGTG TGTTTTATATTTTTCTCCTTTCGTACTAA 3′. El otro motivo es una región rica en citosinas en las posiciones 338-361 (5′ CCCCTCCTCCCCTCTCCCCCTCCC 3′). Según la literatura, las proteínas que se unen a secuencias ricas en citosinas participan en el control posterior a la transcripción de la expresión génica y tienen un amplio rango de funciones que van desde la estabilización del ARNm y activación de la traducción hasta su silenciamiento (**Makeyev & Liebhaber,** 2002).

Detección de las proteínas

Para identificar las RBP asociadas con la regulación de la expresión del gen seleccionado, se utiliza un ensayo de *pull-down* o pesca en el cual las regiones UTR de los mensajeros de interés, en este caso los que codifican para la proteína HSP70, se usan como cebos para capturar las proteínas RBP (**Ramírez, *et al.*,** 2013). Para ello, las regiones UTR previamente identificadas deben clonarse en un vector apropiado para dirigir la transcripción *in vitro* y así obtener una cantidad suficiente de moléculas de ARN que servirán como cebos en el ensayo. Como molde para la transcripción *in vitro* también se pueden utilizar las regiones UTR amplificadas con un oligonucleótido quimérico hacia adelante que contenga en su extremo 5′ la secuencia del promotor, el cual se usará seguido de una secuencia complementaria de la UTR. Una vez transcritas las UTR, deben ser unidas a un soporte sólido antes de proceder con el siguiente paso experimental. Para ello, se utilizan perlas magnéticas recubiertas de estreptavidina, a las cuales se une el cebo de ARN mediante un oligonucleótido puente marcado con biotina cuya secuencia es complementaria de uno de los extremos del cebo. En este caso, en el experimento de captura con la región 5′ UTR se utilizó la secuencia complementaria de la región SL marcada con biotina en el extremo 3′ como oligonucleótido puente (Figura 2) y, para las regiones 3′ UTR, un oligo d(T) marcado en su extremo 5′. Paralelamente, se prepararon extractos de proteínas totales del parásito a partir de los cuales se pescaron las RBP de interés. En este estudio se usaron extractos proteicos provenientes de lisados de las formas promastigotas de la cepa MHOM/BR/75/M2904 de *L. braziliensis* cuyo contenido proteico se verificó cualitativamente mediante electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecil sulfato de sodio (*sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis,* SDS-PAGE), y cuantitativamente con el método de Bradford, antes de usarlas. A continuación, cada cebo de ARN del complejo de unión se incubó con la mezcla de proteínas del parásito; en el medio de incubación es preciso añadir inhibidores tanto de ARNasas como de proteasas para evitar la degradación de los componentes de la mezcla, y de ARN competidores (como ARNt de levadura, ARN de *Escherichia coli* o de células Vero), para disminuir uniones inespecíficas de proteínas a las moléculas cebo. Posteriormente, los complejos de proteína y ARN cebo se recuperaron mediante atracción magnética ejercida sobre las perlas, y se lavaron varias veces para retirar las proteínas de unión inespecífica. Por último, la resolución de los complejos obtenidos y la identificación de las proteínas que los conforman se hicieron mediante técnicas de separación como la electroforesis en geles bidimensionales o la cromatografía líquida de alta eficiciencia (*high performance liquid chromatography*, HPLC), seguidas de análisis de espectometría de masas (EM). Los datos sobre las huellas peptídicas obtenidas y sus masas se buscan en las bases de datos de proteínas de la secuencia genómica de *L. braziliensis* para identificar las proteínas presentes en los complejos obtenidos. En el caso de la electroforesis en geles bidimensionales se requiere de un paso adicional: la disgregación de las proteínas del complejo, las cuales son luego separadas mediante electroforesis en gel, primero en función de su punto isoeléctrico (pI)

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

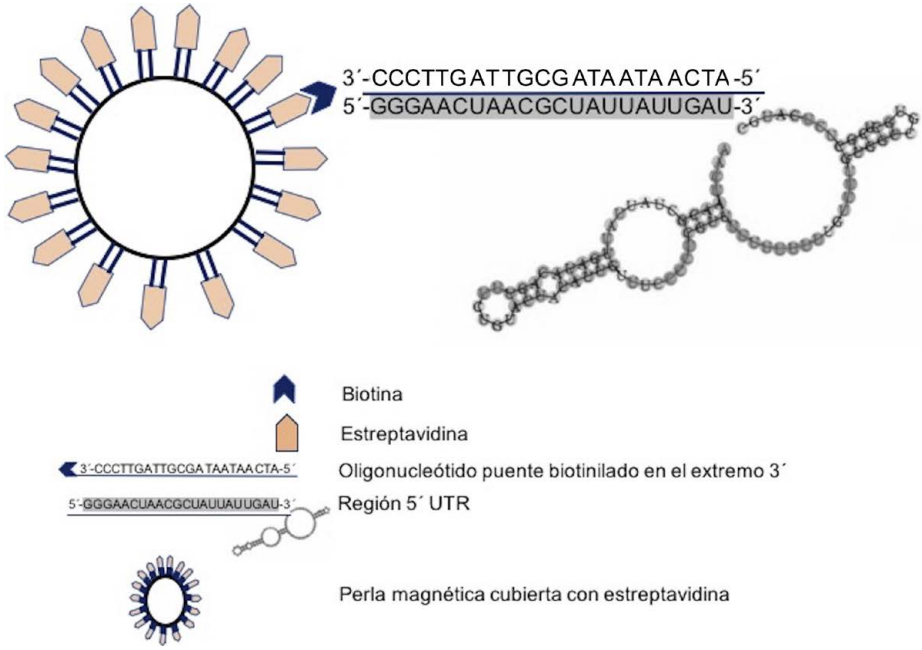


Figura 2. Representación esquemática de la unión de los cebos (5´ UTR) a las perlas magnéticas en el ensayo de *pull-down*

y, después, por su tamaño molecular. Una vez obtenidas las bandas correspondientes a las proteínas, estas se analizan mediante espectometría de masas, lo que en este caso se hizo con las técnicas de MALDI/TOF o MALDI/TOF/TOF. En este procedimiento es importante incluir un cebo de control, es decir, una secuencia irrelevante para los propósitos del ensayo que, por comparación con los resultados de los cebos problema, garantice su especificidad. También es primordial hacer réplicas biológicas de cada cebo de ARN, con el fin de obtener resultados más sólidos y confiables y configurar todos los parámetros para la identificación según los análisis de separación y espectrometría de masas llevados a cabo. En el ejemplo que nos ocupa, se utilizaron como cebo de control las regiones UTR de los mensajeros de la proteína estructural del citoesqueleto de la tubulina alfa y se hicieron dos réplicas biólogicas. Los parámetros utilizados para el análisis de las imágenes de los geles y de los espectros de los péptidos se detallan en **Ramírez, *et al*.** (2013). Además, dado que se ha demostrado que en *L. infantum* los mensajeros del *HSP70-I* se traducen tanto a 26 como a 35 °C, en tanto que los mensajeros del *HSP70-II* se traducen preferencialmente bajo choque térmico (**Folgueira, *et al*.,** 2005), los ensayos de pesca o *pull-down* se realizaron para cada cebo usando lisados proteicos de parásitos que habían crecido tanto a 26 °C como a 35 °C. De esta forma, se obtuvieron 52 proteínas distintas usando los cebos de las regiones UTR de los mensajeros de la proteína HSP70, todas ellas ausentes en los ensayos de pesca con el cebo de control. De estas, 26 se asociaron exclusivamente con la región 5´ UTR, cinco con la región 3´ UTR-I y seis con la 3´ UTR-II. Además, tan solo cuatro proteínas interactuaron con todos los tres cebos y 11 lo hicieron con dos de ellos: cuatro proteínas con la 5´ UTR y la 3´ UTR-I, cinco con las 3´ UTR-I y II y dos con la 5´ UTR y la 3´ UTR-I. Estos resultados muestran la especificidad de la unión ARN-proteína, lo cual se explica, muy seguramente, tanto por la secuencia como por la estructura secundaria particular de cada una de las UTR usadas como cebo (**De Gaudenzi, *et al*.,** 2005). Ahora bien, teniendo en cuenta la longitud de los cebos, fue un tanto sorpresivo que la región con mayor número de interacciones fuera la 5´ UTR, ya que su longitud es casi cinco veces menor que las de la 3´ UTR. Sin embargo, estos hallazgos podrían indicar que la regulación sobre los transcritos de HSP70 opera fundamentalmente a nivel de la iniciación de la traducción. De hecho, entre las proteínas asociadas con la región 5´ UTR se encontraron proteínas que participan tanto en el inicio como en la elongación de la traducción. Por otra parte, en concordancia con la temperatura de crecimiento del parásito, la gran mayoría de proteínas (41) se identificaron a los 26 °C (**Ramírez, *et al*.,** 2013), lo cual podría obedecer, en parte, a un sesgo de la metodología *in vitro*, la cual solo opera para la interacción de las proteínas libres presentes en el lisado y descarta aquellas que participan en los complejos que se forman durante el choque térmico entre las proteínas reguladoras y los mensajeros endógenos de HSP70.

Análisis de las proteínas

Una vez obtenido el listado de proteínas que interactúan con los distintos cebos, es preciso ponderar el valor de su presencia en el proteoma obtenido. Así, las proteínas identificadas inicialmente se analizan según su categoría funcional utilizando la *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes* (KEGG: http://www.genome.jp/tools/blast/) (**Kanehisa, *et al*.,** 2006) y la *Protein ANalysis THrough Evolutionary Relationships*,

version 7 (Panther: http://www.pantherdb.org/pathway/) (**Mi, *et al*.,** 2010), así como datos previamente reportados en la literatura y en las bases de datos de tripanosomátidos. En nuestro ejemplo, las categorías funcionales más representadas en las 52 proteínas identificadas fueron, como se esperaba, las de metabolismo del ARN (27 %) y las de traducción (7 %), para un total de 34 %, seguidas por las de proteínas citoplasmáticas relacionadas con el metabolismo energético (21 %) y el metabolismo de proteínas (19 %) que, en principio, no guardan relación con los procesos de regulación génica. La presencia de estas proteínas podría explicarse como un ruido de fondo de la metodología, que arrastra proteínas irrelevantes para el estudio gracias a que se encuentran en mayor cantidad en la célula, o a que la condición *in vitro* posibilita interacciones que *in vivo* se encuentran limitadas por factores como la compartimentación subcelular. Sin embargo, es importante no perder de vista que en numerosos estudios en organismos distintos y alejados a lo largo de la escala evolutiva, se ha descrito la existencia de proteínas pluriempleadas (*moonlight*) que, siendo enzimas metabólicas, son capaces de realizar otras funciones bioquímicas, como unirse al ARN y cumplir un papel en la regulación de la expresión génica, entre otros (**Jeffery,** 2018). Ahora bien, para efectos de la metodología aquí propuesta, se recomienda que mientras se amplían las bases de proteínas multitarea o *moonlight* (Multitasking Proteins DataBase: http://wallace.uab.es/multitask/), debe enfocarse la atención en aquellas relacionadas con el metabolismo del ARN y la traducción. En la Tabla 1 se presentan las 19 proteínas identificadas en estas categorías en nuestro estudio. De estas, es importante descartar las que tienen localización mitocondrial (3), ya que

Tabla 1. Lista de proteínas identificadas con los cebos de las regiones UTR de los mensajeros de la proteína HSP70 pertenecientes a las categorías funcionales del metabolismo del ARN y la traducción

Identificación en el GeneDB	Cebo	Temperatura (°C)	Función putativa	Clasificación
LbrM.17.0090	5′ UTR 3′ UTR-I	26	Factor de elongación EF-1α	Trasnporte de ARN
LbrM.34.3010	5′ UTR	26	Helicasa ATP-dependiente, putativa	Actividad ARN helicasa
LbrM.35.0270	5′ UTR 3′ UTR-II	26/35 26	Factor de elongación 2	Traducción
LbrM.32.0470	5′ UTR 3′ UTR-I 3′ UTR-II	26	Helicasa ATP-dependiente, putativa	Actividad ARN helicasa
LbrM.20.0320	5′ UTR	26	Factor 5 de inicio de la traducción eucariota, putativo	Trasnporte de ARN
LbrM.32.2400	5′ UTR	26	Subunidad k del factor 3 de inicio de la traducción	Traducción
LbrM.20.2140	5′ UTR	26	Proteína hipotética conservada	*Splicing* del ARNm
LbrM.23.0850	5′ UTR 3′ UTR-I	26/35 35	Proteína mitocondrial de unión a ARN, putativa	Unión a ARN
LbrM.27.1360	5′ UTR	35	Proteína hipotética conservada	Transporte de ARN
LbrM.35.2250	5′ UTR	35	Precursor mitocontrial, chaperonina HSP60	Degradación de ARN
LbrM.15.0320	5′ UTR	35	Precursor de la ribonucleoproteína p18 mitocondrial, putativa	Unión a ARN
LbrM.25.0080	3′ UTR-I	26	Proteína 3 de unión a poli(A), putativa	Metabolismo del ARN
LbrM.01.0740	3′ UTR-I	26	Factor 4A eucariótico de inicio de la traducción, putativo	Transporte de ARN
LbrM.25.2210	3′ UTR-II	26	Proteína hipotética (SCD6.10)	Catabolismo de ARN
LbrM.03.0170	3′ UTR-I 3′ UTR-II	26	Proteína ABC transportadora, putativa	Traducción
LbrM.34.4130	3′ UTR-I 3′ UTR-II	26	Proteína 2 de unión a poli(A), putativa	Metabolismo de ARN
LbrM.17.0700	5′ UTR	26	Proteína hipotética conservada	No se pudo asignar
LbrM.31.2460	5′ UTR	26	Proteína hipotética de función desconocida	No se pudo asignar
LbrM.30.3080	3′ UTR-II	26	Proteína hipotética conservada	No se pudo asignar

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

muy seguramente fueron detectadas gracias a la naturaleza *in vitro* del estudio y no a las condiciones fisiológicas *in vivo*. En cuanto a las restantes, en este estudio se detectaron tres grupos de proteínas: las previamente identificadas en el parásito con un rol ya establecido (2); las identificadas en el parásito con funciones putativas asignadas (7), y las hipotéticas, cuya existencia y función en el parásito se desconocen (7). En el presente caso, en el primer grupo se identificaron dos componentes del proceso de elongación de la traducción: el factor de elongación 1 α (LbEF1α, LbrM.35.0270), asociado a las regiones 5′ UTR y 3′ UTR-I a 26°C y, el factor de elongación 2 (LbEF2, LbrM.35.0270), aislado por su unión tanto a la 5′ UTR como a la 3′ UTR-II a 26°C. La LbEF1α es una proteína abundante que participa en otros procesos celulares como el transporte nuclear, el control de calidad de las proteínas y la degradación concomitante con la traducción, entre otros (**Mateyak & Kinzy,** 2010; **Mittal, *et al.,*** 2013). La LbEF2, con un 61 % de identidad con la proteína ortóloga humana y con la de *Saccharomyces cerevisiae,* se conoce por su función en la translocación de los ribosomas a lo largo del ARNm durante el proceso de traducción (**Justice, *et al*.,** 1998; **Noble & Song,** 2008). Acerca del segundo y tercer grupo de proteínas, primero debe comprobarse tanto *in vitro* como *in vivo* su interacción con el ARN, para luego confirmar o elucidar su función específica. Por ello, en el presente estudio la atención se centró en estas proteínas, especialmente las hipotéticas.

Teniendo en cuenta que las herramientas bioinformáticas pueden predecir la presencia de dominios o motivos secuenciales o estructurales relacionados con la interacción entre ARN y proteína, estas fueron útiles para seleccionar con cuáles de las siete proteínas hipotéticas continuar el estudio (**Nocua, *et al*.,** 2014). Para ello, se usaron programas como el InterProScan (http://www.ebi.ac.uk/Tools/pfa/iprscan/), el Phyre2 (http://www.sbg.bio.ic.ac.uk/phyre2/html/page.cgi?id=index) y el Modeller (http://salilab.org/modeller/), y se hizo una revisión de la literatura. En el ejemplo que se presenta, gracias a la presencia de los dominios Lsm y NTF2 presentes en familias de proteínas relacionadas con la represión de la traducción, o la acumulación de mensajeros en los cuerpos P y los gránulos de estrés (Lsm) y en el transporte de ARN (NTF2), se seleccionaron las proteínas codificadas por los genes LbrM.25.2210 y LbrM.30.3080 (**Nocua, *et al.,*** 2017).

Análisis estructural y modelamiento de las proteínas de interés

Con el ánimo de ahondar en la estructura de las proteínas codificadas por los genes LbrM.25.2210 y LbrM.30.3080, se recurrió a diversas predicciones bioinformáticas que, en primer lugar, mostraron que tenían ortólogos tanto en otras especies de leishmanias como de tripanosomas y de otros organismos evolutivamente mucho más distantes, como *S. cerevisiae*, *Xenopus laevis* y *Homo sapiens (***De Gaudenzi, *et al.,*** 2005; **Kruger, *et al.,*** 2013; **Nocua,** 2017*)*. Tras estos análisis de homología de secuencia, se consideró conveniente cambiar el nombre de las proteínas codificadas por los genes LbrM.25.2210 y LbrM.30.3080 a *Lb*SCD6 y *Lb*RBP42, respectivamente. Para el caso de *Lb*SCD6, la predicción de dominios permitió localizar en los primeros 79 aminoácidos de la proteína un dominio Lsm, que ha sido implicado en la formación de cuerpos P y gránulos de estrés (**Kruger, *et al.,*** 2013). En la parte central de la molécula se identificó el dominio DFDF (DFDF-x(6)-F), caracterizado por una alternancia de aminoácidos no polares y cargados, responsables de la interacción con el ARN (**Anantharaman & Aravind,** 2004). Además, en el extremo carboxilo terminal, se identificaron las cajas FFD (Y-x-K-x(3)-FFD-x-[IL]-S) y TFG ([RKH]-x(2–5)-Ex(0–2)-[RK]-x(3–4)-[DE]-TFG), y, flanqueando el dominio DFDF y la caja TFG, se encontró un motivo de aminoácidos RGD, el cual ha sido implicado en la mediación de interacciones entre ARN y proteína y entre proteína y proteína, así como en la formación de gránulos de estrés (**Kruger, *et al.,*** 2013; **Nocua, *et al.*,** 2017; **Rajyaguru & Parker,** 2012). En el modelamiento tridimensional de la proteína, se encontró que estos dominios adoptaron las estructuras y plegamientos previamente descritos en la literatura, con excepción de la estructura de hélice α presente en el extremo N-terminal del dominio Lsm (**Nocua, *et al.,*** 2017). Sin embargo, al comparar la estructura de LbSCD6 con la EDC3 humana y la TraI de *Drosophila melanogaster*, se encontró que la LbSCD6 encajaba perfectamente en los segmentos conservados Sm1 y Sm2 que hacen parte de la estructura típica de barril beta de este dominio (**Nocua, *et al*.,** 2017). En cuanto a la RBP42, se identificó el dominio NTF2 (**Ribbeck, *et al.,*** 1998), relacionado con procesos de transporte entre núcleo y citoplasma de ARN, y que en esta proteína está conformado por los primeros 114 aminoácidos del extremo N-terminal y también adopta el plegamiento típico consistente en tres hélices α alineadas contra una hoja β conformada por cinco cadenas. Así mismo, los 73 aminoácidos del extremo C-terminal de RBP42 conforman un dominio RRM (*RNA recognition motif*), que es uno de los dominios de unión a ARN más conservados a lo largo de la escala filogenética. No obstante, a diferencia de la mayoría de estos dominios, la LbRPB42 solo posee una de las dos marcas conservadas, RNP1, consistente en ocho residuos (con abundancia de aminoacidos aromáticos o cargados), al parecer responsable de la unión al ARN (**Maris, *et al*.,** 2005). Cabe destacar que la proteína ortóloga de humanos, la G3BP, la cual, además de poseer ambos dominios como la proteína LbRPB42, también presenta tres repeticiones del motivo PxxP y ha sido implicada en la localización de esta proteína en los gránulos de estrés (**Tourriere, *et al.,*** 2003).

Clonación, expresión y obtención de anticuerpos contra las proteínas de interés

Una vez conocidos los dominios y la estructura tridimensional de las proteínas promisorias, se procede a su clonación y expresión como proteínas recombinantes, con el fin

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

de obtenerlas en estado nativo y producir sus anticuerpos. Dichas proteínas constituyen herramientas muy útiles en los experimentos encaminados a descifrar su funcionalidad. En nuestro ejemplo, las proteínas se clonaron en el sistema de expresión pQE30 y, tras ensayar diversas condiciones de solubilización y renaturación, finalmente se purificaron y se obtuvieron en su estado nativo, en tanto que los anticuerpos se obtuvieron mediante inmunización en conejos (**Nocua, *et al.*,** 2017).

Confirmación de la capacidad de unión a ARN tanto *in vitro* como *in vivo* de las proteínas de interés

Teniendo en cuenta que la técnica de pesca o *pull-down* empleada es una tamización del lisado de proteínas totales del parásito, el siguiente paso metodológico son los ensayos confirmatorios, los cuales combinan los ensayos de *pull-down* y visualización tras el *dot blotting,* utilizando exclusivamente las proteínas específicas de interés y los cebos de ARN, con el fin de confirmar su capacidad de unión a este. En el presente caso, con esta metodología se corroboró que tanto la LbSCD6 como la LbRBP42 son proteínas capaces de unirse al ARN e interactuar de forma específica con la región 3´ UTR-II de los mensajeros de la HSP70 (**Nocua, *et al.*,** 2017).

Después de demostrar la interacción *in vitro* de ambas proteínas (LbSCD6 y LbRPB42) con la región 3´ UTR de los genes *HSP70-II*, se hicieron ensayos para delimitar posibles elementos en *cis* involucrados en dicha interacción. Para lograr este objetivo, se sintetizaron los dos elementos en *cis* previamente identificados en la región 3´ UTR-II. El primero de ellos, correspondiente a la secuencia rica en adeninas y uridinas relacionada con los elementos ARE, se denominó 3´ UTR-II.1 y, el segundo, correspondiente a la region rica en citosinas, se denominó 3´ UTR-II.2. Para analizar la posible interacción entre las proteínas LbSCD6 y LbRBP42 con los motivos seleccionados, se hicieron ensayos de retraso en la movilidad electroforética (*electrophoretic mobility shift assay,* EMSA) utilizando las proteínas recombinantes, así como los oligorribonucleótidos marcados con digoxigenina en su extremo 5´. Los resultados mostraron una fuerte interacción entre el motivo 3´ UTR-II.1 y cada una de las proteínas recombinantes *rLbSC*D6 (Figura 3A) y rLbRBP42 (Figura 3B) (**Nocua***,* 2017). En cambio, en el ensayo con el motivo 3´ UTR-II.2 no se observó interacción con las proteínas recombinantes (**Nocua, *et al.*,** 2017). Los ensayos adicionales de EMSA de competición confirmaron los resultados y evidenciaron que la interacción entre las proteínas recombinantes y el motivo 3´ UTR-II.1 es específica y depende tanto de sus características estructurales como de su secuencia (**Nocua, *et al.*,** 2017).

Confirmación *in vivo* de la capacidad de unión al ARN de las proteínas de interés

Una vez confirmada la capacidad de estas proteínas de interactuar directamente con moléculas de ARN *in vitro*, se determinó esta misma capacidad *in vivo*, con el objetivo adicional de conocer los transcritos de ARN que pueden unirse a ellas en promastigotes de *L. braziliensis* cultivados a 26 ºC. Para ello, se hicieron ensayos de coinmunoprecipitación utilizando anticuerpos específicos para cada una de las proteínas, con el fin de obtener los complejos LbSCD6-ARN y LbRBP42-ARN. Estos mismos ensayos se realizaron utilizando el suero preinmunización correspondiente a cada anticuerpo (preSCD6 y preRBP42) y la información obtenida se utilizó como control de uniones no específicas, las cuales se descartaron de las lecturas obtenidas en las dos réplicas biológicas hechas para cada una de las proteínas estudiadas (**Nocua,** 2017). Los resultados en las dos proteínas confirmaron que estas interactúan *in vivo* con distintos transcritos del parásito, principalmente a través de sus regiones UTR (**Nocua,** 2017). Específicamente, para proteínas LbSCD6 se encontraron 155 transcritos que codifican, siendo la interacción con las regiones 3' UTR la más frecuente (66 %). Con el fin de categorizar estos genes según el proceso biológico en el que están implicados, se hizo un análisis de enriquecimiento con la herramienta Gene Ontology (http://geneontology.org/page/go-enrichment-analysis), y se

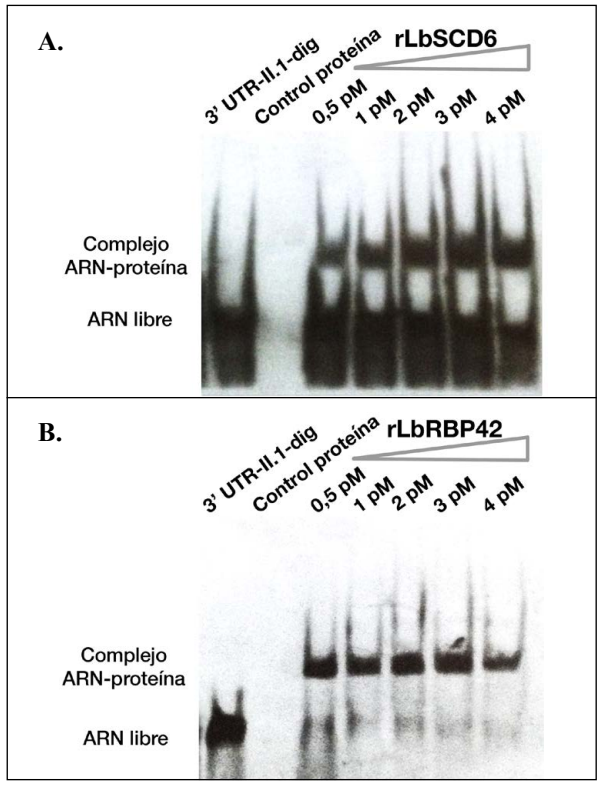


Figura 3. Interacción de las proteínas rLbSCD6 y rLbRBP42 con el motivo de ARN 3´ UTR-II.1 detectada mediante ensayos EMSA. (**A**) Análisis de la capacidad de interacción de rLbSCD6 con el motivo 3´ UTR-II.1 utilizando diferentes concentraciones de la proteína. (**B**) Análisis de la capacidad de interacción de rLbRBP42 con el motivo 3´ UTR-II.1 utilizando diferentes concentraciones de la proteína

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

encontró que 98 (63 %) correspondían a genes anotados en la base de datos TriTryp con una función conocida (**Aslett, *et al.*,** 2010), en tanto que el 37 % restante correspondió a genes hipotéticos. En cuanto a la adscripción de los 98 transcritos a procesos biológicos, se encontró que, en su mayoría, estos pertenecen a proteínas del metabolismo celular (30,61 %), seguidos por proteínas asociadas a procesos celulares (11,28 %), al transporte celular (8,16 %) y a la proteólisis celular (7,14 %). Resultó interesante observar la interacción de la LbSCD6 con transcritos que codifican para la proteína DNAJ-like, indispensable en la maquinaria de activación y funcionamiento de la proteína HSP70 (**Kampinga & Craig,** 2010). Se encontraron 192 (74,13 % del total) transcritos que codifican asociados a la proteína LbRBP42 (**Nocua,** 2017). En cuanto a la localización de la interacción ARNm-proteína, se encontraron principalmente las interacciones con las regiones 3′ UTR de los transcritos (57,8 %). De los 192 transcritos sometidos a coinmunoprecipitación, el 68,04 % correspondió a proteínas con anotación funcional en la base de datos TriTryp, en tanto que el 31,96 % correspondió a proteínas hipotéticas. Según su clasificación por asociación a procesos biológicos, se observó una gran proporción de proteínas asociadas al metabolismo celular (18,18 %), así como a diferentes procesos celulares, entre las cuales cabe resaltar las adscritas al ciclo celular (13,64 %). Asimismo, se encontraron proteínas asociadas a la respuesta a estímulos (7,58 %), entre ellas las asociadas a la respuesta al estrés. Cabe destacar que el transcrito correspondiente al gen *HSP70-II* se encontró asociado a la proteína LbRBP42, interacción localizada en la región 3′ UTR de este transcrito.

Teniendo en cuenta que tanto la LbSCD6 como la LbRBP42 se encontraron interactuando *in vivo* con la región 3′ UTR de más de cien transcritos y que *in vitro* se demostró la interacción de ambas proteínas con el motivo 3′ UTR-II.1, relacionado con el elemento ARE, se hizo una búsqueda preliminar de motivos en la región 3′ UTR de todos los transcritos asociados. Así, se encontró un motivo estructural asociado a las regiones que interactúan tanto con la proteína LbSCD6 (Figura 4A) como con la proteína LbRBP42 (Figura 4B). Puede observarse que, si bien la secuencia del motivo no corresponde a la de un elemento ARE típico, su estructura presenta una horquilla semejante a la observada en el motivo 3′ UTR-II.1, lo que sugiere que la interacción entre los ARNm y las proteínas LbSCD6 y LbRBP42 puede estar guiada principalmente por motivos estructurales más que por una secuencia específica.

Estudios de aproximación a la función biológica de las proteínas de interés

Con el propósito de dilucidar los posibles procesos biológicos en los cuales podrían estar involucradas estas proteínas, se determinó, en pirmer lugar, el interactoma de cada una. Los resultados evidenciaron que los interactomas de LbSCD6 y LbRBP42 comparten una alta proporción de proteínas, lo que sugiere algún tipo de relación funcional entre ellas; de hecho, las dos proteínas forman parte de los interactomas recíprocos. Es de resaltar que ambos interactomas están enriquecidos en proteínas asociadas a los procesos de traducción, al metabolismo del ARN y a la regulación de la expresión génica. Además, se encontraron varias proteínas cuyos homólogos se han reportado como constituyentes de gránulos de ARN, principalmente gránulos de estrés y cuerpos de procesamiento (**Nocua,** 2017); ambos son estructuras macromoleculares carentes de membrana en las que se acumulan ARN y proteínas. En eucariotas superiores los gránulos de estrés se forman transitoriamente en respuesta al estrés celular y están asociados con la traducción y estabilidad del ARNm. Bajo las condiciones apropiadas, los ARNm pueden salir de estos gránulos y asociarse de nuevo con polisomas (**Buchan & Parker,** 2009). En cuanto a los cuerpos de procesamiento, estos son estructuras constitutivas, las cuales contienen generalmente maquinaria relacionada con la degradación del ARNm (**Parker & Sheth,** 2007). Tanto los gránulos de estrés como los cuerpos de procesamiento interactúan entre sí y están en una estrecha asociación con el proceso de traducción (**Decker & Parker,** 2012).

Por último, para analizar la relevancia celular y funcional de LbSCD6 y LbRBP42 se generaron líneas mutantes de parásitos que sobreexpresan las proteínas fusionadas a la proteína fluorescente mCherry, y que denominamos LbSCD6-mCherry y LbRBP42-mCherry. La línea que sobreexpresó control (expresión de la proteína mCherry) de *L. braziliensis* pudo establecerse, pero luego de una semana de crecimiento, las líneas de sobreexpresión para cada una de estas proteínas perdieron viabilidad. Si bien estos resultados no son concluyentes, sugieren que la sobreexpresión de LbSCD6 y LbRBP42 en *L. braziliensis* afecta negativamente el desarrollo y la supervivencia del parásito. Como alternativa, se intentó con éxito la generación de estas líneas de sobreexpresión utilizando la especie *L. major,* lo que ha permitido vislumbrar importantes implicaciones de estas proteínas en el desarrollo de los parásitos, observándose

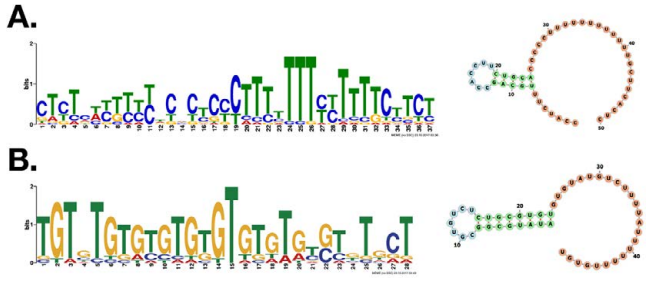


Figura 4. Motivos estructurales presentes en los transcritos asociados *in vivo* con las proteínas SCD6 y RBP42. Los posibles motivos asociados con las proteínas (**A**) SCD6 y (**B**) RBP42, se encontraron con la herramienta MEME, y las estructuras secundarias de un motivo representativo para cada proteína se obtuvieron con la herramienta RNAfold.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

alteraciones morfológicas significativas y el retardo del crecimiento de los parásitos en condiciones fisiológicas de crecimiento, siendo el efecto mucho más pronunciado en condiciones de estrés térmico. Por otra parte, la capacidad infectiva *in vitro* de estos parásitos mutantes resultó también significativamente afectada en relación con la cepa silvestre (**Nocua,** 2017). Teniendo en cuenta todos los hallazgos encontrados, en la figura 5 se presenta un modelo que refleja el papel de las proteínas LbSCD6 y LbRBP42 en el parásito.

Conclusiones

Se concluyó que la LbSCD6 y la LbRBP42 son proteínas de unión al ARN implicadas en la regulación de la estabilidad o degradación no solo del transcrito de *HSP70-II* sino de un amplio grupo de transcritos en *Leishmania*.

En cuanto a la estrategia aquí propuesta, la cual se resume en la figura 6, los resultados evidencian su bondad y su potencial para la identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos.

Perspectivas de la estrategia. La metodología empleada comprende varias modificaciones y mejoras que pueden implementarse para subsanar algunas falencias detectadas. Por ejemplo, para simular las condiciones *in vivo*, es posible someter a los parásitos a la acción de la luz ultravioleta antes de la obtención del lisado proteico, con el fin de inmovilizar los complejos de ARN y proteínas formados bajo condiciones fisiológicas. Asimismo, se puede trabajar con los componentes subcelulares de interés, así como usar técnicas más finas de separación de proteínas que en una misma reacción permitan elucidar las proteínas diferenciales en relación con el control no relevante utilizado.

Teniendo en cuenta que la estrategia aquí propuesta se focaliza en la búsqueda de RBP que modulen la expresión de factores de virulencia de los tripanosomátidos, que como se vio en el caso de las proteínas LbSCD6 y LbRBP42, no solo gobiernan la expresión de dicho factor, en este caso la proteína HSP70, sino de muchas otras proteínas; en consecuencia, se proponen estas RBP como nuevos blancos parasitarios para el desarrollo de medicamentos. En este sentido, no resulta extraño que, dado su papel preponderante en la desregulación asociada al desarrollo de las células cancerosas, hayan sido propuestas también como nuevos blancos para el desarrollo de alternativas terapéuticas frente a los procesos tumorales (**Turner & Díaz-Muñoz,** 2018).

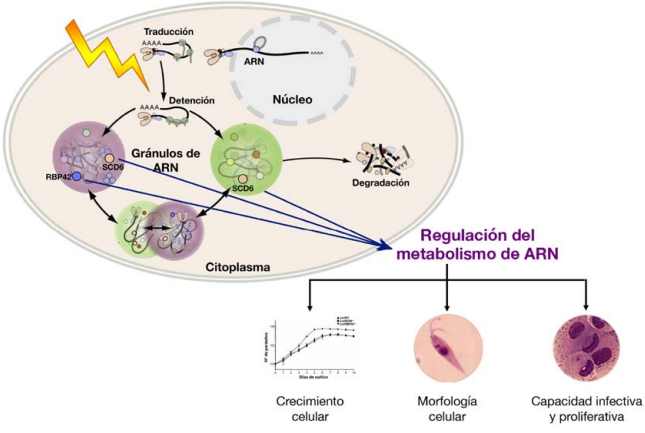


Figura 5. Modelo del rol de de las proteínas LbSCD6 y LbRBP42 en la regulación de la expresión génica a nivel del ARN en el parásito. Teniendo en cuenta todos los hallazgos derivados de este trabajo, se sugiere que las proteínas SCD6 y RBP42 están implicadas en la regulación de transcritos de ARN debido a su capacidad de unión con este tipo de moléculas y a la asociación que presentan con constituyentes de gránulos ribonucleoproteicos, como los cuerpos de procesamiento y los gránulos de estrés, localizados en el citoplasma. La localización citoplasmática granular se observa claramente cuando los parásitos están sometidos a condiciones de estrés, particularmente de estrés térmico (Datos no mostrados). Los cambios en la expresión de estas proteínas afectan la regulación de la estabilidad y su capacidad de traducción de los ARN mensajeros (metabolismo de ARN), lo cual desencadena un efecto pleitrópico en el parásito, observándose cambios en el crecimiento y morfología celular, así como en la capacidad infectiva y proliferativa del parásito.

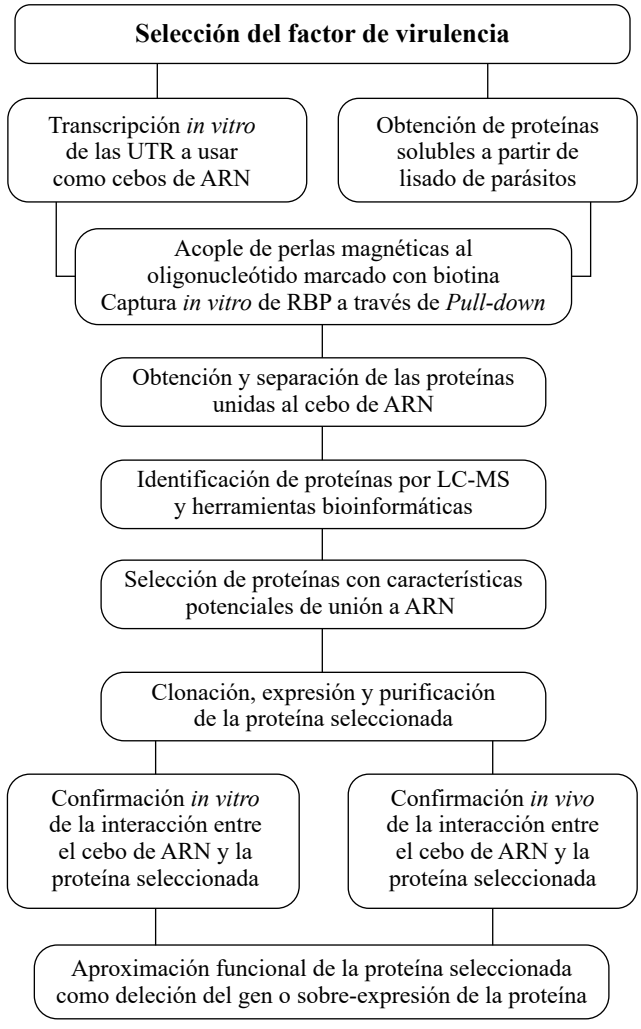


Figura 6. Esquema de resumen de la estrategia con el conjunto de pasos para la identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible sin el respaldo incondicional de la Pontificia Universidad Javeriana, en cabeza de sus distintas autoridades de gobierno, a lo largo de toda una vida de labor académica y científica. Agradecemos, asimismo, a todas las entidades que han financiado nuestros proyectos, principalmente Colciencias y la Pontificia Universidad Javeriana.

Contribución de los autores

Concepción J. Puerta: concepción del manuscrito, participación en su escritura, revisión y corrección, y en el diseño y seguimiento de los experimentos. José María Requena: participación en su escritura, revisión y corrección, y en el diseño y seguimiento de los experimentos. Elizabeth Ruiz, Cesar A. Ramírez y Paola Nocua: realización de los experimentos, participación en la elaboración de figuras y en la revisión y corrección del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

Agabian, N. (1990). Trans splicing of nuclear pre-mRNAs. Cell. **61**(7): 1157-1160. doi: 10.1016/0092-8674(90)90674-4

Álvar, J., Vélez, I.D., Bern, C., Herrero, M., Desjeux, P., Cano, J., Jannin, J., den Boer, M. (2012). Leishmaniasis worldwide and global estimates of its incidence. PLoS One. **7** (5): e35671. doi: 10.1371/journal.pone.0035671

Anantharaman, V., Aravind, L. (2004). Novel conserved domains in proteins with predicted roles in eukaryotic cell-cycle regulation, decapping and RNA stability. BMC Genomics. **5** (1): 45. doi: 10.1186/1471-2164-5-45

Araújo, P., Teixeira, S. (2011). Regulatory elements involved in the post-transcriptional control of stage-specific gene expression in *Trypanosoma cruzi* - A review. Mem Inst Oswaldo Cruz. **106** (3): 257-266. doi: 10.1590/S0074-02762011000300002

Aslett, M., Aurrecoechea, C., Berriman, M., Brestelli, J., Brunk, B.P., Carrington, M., Depledge, D.P., Fischer, S., Gajria B., Gao, X., Gardner, M.J., Gingle, A., Grant, G., Harb, O.S., Heiges, M., Hertz-Fowler, C., Houston, R., Innamorato, F., Iodice, J., Kissinger, J.C., Kraemer, E., Li, W., Logan, F.J., Miller, J.A., Mitra, S., Myler, P.J., Nayak, V., Pennington, C., Phan, I., Pinney, D.F., Ramasamy, G., Rogers, M.B., Roos, D.S., Ross, C., Sivam, D., Smith, D.F., Srinivasamoorthy, G., Stoeckert, C.J. Jr., Subramanian, S., Thibodeau, R., Tivey, A., Treatman, C., Velarde, G., Wang, H. (2010). TriTrypDB: A functional genomic resource for the *Trypanosomatidae.* Nucleic Acids Res. **38** (Database issue): D457-462. doi: 10.1093/nar/gkp851

Bangs, J.D., Crain, P.F., Hashizume, T., McCloskey, J.A., Boothroyd, J.C. (1992). Mass spectrometry of mRNA cap 4 from trypanosomatids reveals two novel nucleosides. J Biol Chem. **267** (14): 9805-9815. PMID: 1349605.

Bañuls, A.L., Hide, M., Prugnolle, F. (2007). *Leishmania* and the leishmaniases: A parasite genetic update and advances in taxonomy, epidemiology and pathogenicity in humans. Adv Parasitol. **64:** 1-10. doi:10.1016/S0065308X(06)64001-3

Baumeister, H. (1997). RNA-protein interactions. Oxford, Reino Unido: IRL Press at Oxford University Press.

Berriman, M., Ghedin, E., Hertz-Fowler, C., Blandin, G., Renauld, H., Bartholomeu, D.C., Lennard, N.J., Caler, E., Hamlin, N.E., Haas, B., Böhme, U., Hannick, L., Aslett, M.A., Shallom, Marcello, L., Hou, L., Wickstead, B., Alsmark, U.C., Arrowsmith, C., Atkin, R.J., Barron, A.J., Bringaud, F., Brooks, K., Carrington, M., Cherevach, I., Chillingworth, T.J., Churcher, C., Clark, L.N., Corton, C.H., Cronin, A., Davies, R.M., Doggett, J., Djikeng, A., Feldblyum, T., Field, M.C., Fraser, A., Goodhead, I., Hance, Z., Harper, D., Harris, B.R., Hauser, H., Hostetler, J., Ivens, A., Jagels, K., Johnson, D., Johnson, J., Jones, K., Kerhornou, A.X., Koo, H., Larke, N., Landfear, S., Larkin, C., Leech, V., Line A, Lord A, Macleod A, Mooney PJ, Moule S, Martin DM, Morgan G.W., Mungall, K., Norbertczak, H., Ormond, D., Pai, G., Peacock, C.S., Peterson, J., Quail, M.A., Rabbinowitsch, E., Rajandream, M.A., Reitter, C., Salzberg, S.L., Sanders, M., Schobel, S., Sharp, S., Simmonds, M., Simpson, A.J., Tallon, L., Turner, C.M., Tait, A., Tivey, A.R., Van Aken, S., Walker, D., Wanless, D., Wang, S., White, B., White, O., Whitehead, S., Woodward, J., Wortman, J., Adams, M.D., Embley, T.M., Gull, K., Ullu, E., Barry, J.D., Fairlamb, A.H., Opperdoes, F., Barrell, B.G., Donelson, J.E., Hall, N., Fraser, C.M., Melville, S.E., El-Sayed, N.M. (2005). The genome of the African trypanosome *Trypanosoma brucei.* Science. **309:** 416-422. doi: 10.1126/science.1112642

Buchan, J.R., Parker, R. (2009). Eukaryotic stress granules: The ins and outs of translation. Mol Cell. **36** (6): 932-941. doi: 10.1016/j.molcel.2009.11.020

Carrion, J., Folgueira, C., Soto, M., Fresno, M., Requena, J.M. (2011). *Leishmania infantum* HSP70-II null mutant as candidate vaccine against leishmaniasis: A preliminary evaluation. Parasit Vectors. **4:** 150. doi: 10.1186/1756-3305-4-150

Colombia – Instituto Nacional de Salud. (2011). Boletin Epidemiológico semana 40. Instituto Nacional de Salud Colombia. Bogotá, Colombia. Pp.9.

Cassola, A., Frasch, A. (2009). An RNA recognition motif mediates the nucleocytoplasmic transport of a *Trypanosome* RNA-binding protein J Biol Chem. **284** (50): 35015-35028. doi: 10.1074/jbc.M109.031633

Clayton, C. (2016). Gene expression in kinetoplastids. Curr Opin Microbiol. **32:** 46-51. doi: 10.1016/j.mib.2016.04.018

David, M., Gabdank, I., Ben-David, M., Zilka, A., Orr, I., Barash, D., Shapira, M. (2010). Preferential translation of Hsp83 in *Leishmania* requires a thermosensitive polypyrimidine-rich element in the 3' UTR and involves scanning of the 5' UTR. RNA. **16** (2): 364-74. doi: 10.1261/rna.1874710

De Gaudenzi, J., Frasch, A., Clayton, C. (2005). RNA-binding domain proteins in Kinetoplastids: a comparative analysis. Eukaryo Cell. **4** (12): 2106-2114. doi: 10.1128/EC.4.12.2106-2114.2005

Di Noia J.M., D'Orso I., Sánchez D.O, Frasch A.C. (2000). AU-rich elements in the 3'-untranslated region of a new mucin-type gene family of *Trypanosoma cruzi* confers mRNA instability and modulates translation efficiency. J Biol Chem. **275** (14): 10218-10227. PMID: 9556557

El-Sayed, N.M., Myler, P.J., Bartholomeu, D.C., Nilsson, D., Aggarwal, G., Tran, A.N., Ghedin, E., Worthey, E.A., Delcher, A.L., Blandin, G., Westenberger, S.J., Caler, E., Cerqueira, G.C., Branche, C., Haas, B., Anupama, A., Arner, E., Aslund, L., Attipoe, P., Bontempi, E., Bringaud, F., Burton, P., Cadag, E., Campbell, D.A., Carrington, M., Crabtree, J., Darban, H., da Silveira, J.F., de Jong, P., Edwards, K., Englund, P.T., Fazelina, G., Feldblyum, T., Ferella, M., Frasch, A.C., Gull, K., Horn, D., Hou, L., Huang, Y., Kindlund, E., Klingbeil, M., Kluge, S., Koo, H., Lacerda, D., Levin, M.J., Lorenzi, H., Louie, T., Machado, C.R., McCulloch, R., McKenna, A., Mizuno, Y., Mottram, J.C., Nelson, S., Ochaya, S., Osoegawa, K., Pai, G., Parsons, M., Pentony, M., Pettersson, U., Pop, M., Ramírez, J.L., Rinta, J., Robertson, L., Salzberg, S.L., Sanchez, D.O., Seyler, A., Sharma, R., Shetty, J., Simpson, A.J,, Sisk, E., Tammi, M.T., Tarleton, R., Teixeira, S., Van Aken, S., Vogt, C., Ward, P.N., Wickstead, B., Wortman, J., White, O., Fraser, C.M,, Stuart, K.D., Andersson, B. (2005). The genome sequence of *Trypanosoma cruzi*, etiologic agent of Chagas disease. Science. **309:** 409-415. doi: 10.1126/science.1112631

Decker, C.J., Parker, R. (2012). P-bodies and stress granules: Possible roles in the control of translation and mRNA degradation. Cold Spring Harb Perspect Biol. **4** (9): a012286. doi: 10.1101/cshperspect.a012286

Folgueira, C., Carrion, J., Moreno, J., Saugar, J.M., Canavate, C., Requena, J.M. (2008). Effects of the disruption of the HSP70-II gene on the growth, morphology, and virulence of Leishmania infantum promastigotes. Int Microbiol. **11** (2): 81-89. PMID: 18645958. En PUBMED no aparece el doi, coloqué el PMID.

Folgueira, C., Quijada, L., Soto, M., Abanades, D.R., Alonso, C., Requena, J.M. (2005). The translational efficiencies of the two *Leishmania infantum* HSP70 mRNAs, differing in their 3'-untranslated regions, are affected by shifts in the temperature of growth through different mechanisms. J Biol Chem. **280** (42): 35172-35183. doi: 10.1074/jbc.M505559200

Ivens, A.C., Peacock, C.S., Worthey, E.A., Murphy, L., Aggarwal, G., Berriman, M., Sisk, E., Rajandream, M.A., Adlem, E., Aert, R., Anupama, A., Apostolou, Z., Attipoe, P., Bason, N., Bauser, C., Beck, A., Beverley, S.M., Bianchettin, G., Borzym, K., Bothe, G., Bruschi, C.V., Collins, M., Cadag, E., Ciarloni, L., Clayton, C., Coulson, R.M., Cronin, A., Cruz, A.K., Davies, R.M., De Gaudenzi, J., Dobson, D.E., Duesterhoeft, A., Fazelina, G., Fosker, N., Frasch, A.C., Fraser, A., Fuchs, M., Gabel, C., Goble, A., Goffeau, A., Harris, D., Hertz-Fowler, C., Hilbert, H., Horn, D., Huang, Y., Klages, S., Knights, A., Kube, M., Larke, N., Litvin, L., Lord, A., Louie, T., Marra, M., Masuy, D., Matthews, K., Michaeli, S., Mottram, J.C., Müller-Auer, S., Munden, H., Nelson, S., Norbertczak, H., Oliver, K., O'neil, S., Pentony, M., Pohl, T.M,, Price, C., Purnelle, B., Quail, M.A., Rabbinowitsch, E., Reinhardt, R., Rieger, M., Rinta, J., Robben, J., Robertson, L., Ruiz, J.C., Rutter, S., Saunders, D., Schäfer, M., Schein, J., Schwartz, D.C., Seeger, K., Seyler, A., Sharp, S., Shin, H., Sivam, D., Squares, R., Squares, S., Tosato, V., Vogt, C., Volckaert, G., Wambutt, R., Warren, T., Wedler, H., Woodward, J., Zhou, S., Zimmermann, W., Smith, D.F., Blackwell, J.M., Stuart, K.D., Barrell, B., Myler, P.J. (2005). The genome of the kinetoplastid parasite, *Leishmania major*. Science. **309:** 436-442. doi: 10.1126/science.1112680

Jeffery, C.J. (2018). Protein moonlighting: What is it, and why is it important? Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. **373** (1738). pii: 20160523. doi: 10.1098/rstb.2016.0523

Justice, M.C., Hsu, M.J., Tse, B., Ku, T., Balkovec, J., Schmatz, D., Nielsen, J. (1998). Elongation factor 2 as a novel target for selective inhibition of fungal protein synthesis. J Biol Chem. **273** (6): 3148-51. doi: 10.1074/JBC.273.6.3148

Kampinga, H.H., Craig, E.A. (2010). The HSP70 chaperone machinery: J proteins as drivers of functional specificity. Nat Rev Mol Cell Biol. **11** (8): 579-592. doi: 10.1038/nrm2941

Kanehisa, M., Goto, S., Hattori, M., Aoki-Kinoshita, K.F., Itoh, M., Kawashima, S., Katayama, T., Araki, M., Hirakawi, M. (2006). From genomics to chemical genomics: New developments in KEGG. Nucleic Acids Res. **34:** D354-7. doi: 10.1093/nar/gkj102

Kramer, S., Carrington, M. (2011). Trans-acting proteins regulating mRNA maturation, stability and translation in trypanosomatids. Trends Parasitol. **27** (1): 23-30. doi: 10.1016/j.pt.2010.06.011

Krüger, T., Hofweber, M., Kramer, S. (2013). SCD6 induces ribonucleoprotein granule formation in trypanosomes in a translation-independent manner, regulated by its Lsm and RGG domains. Mol Biol Cell. **24** (13): 2098-2111. doi: 10.1091/mbc.E13-01-0068

Lapointe, C.P., Wilinski, D., Saunders, H.A., Wickens, M. (2015). Protein-RNA networks revealed through covalent RNA marks. Nat Methods. **12** (12): 1163-70. doi: 10.1038/nmeth.3651

LeBowitz, J.H., Smith, H.Q., Rusche, L., Beverley, S.M. (1993). Coupling of poly(A) site selection and trans-splicing in *Leishmania*. Genes Dev. **7** (6): 996-1007. doi: 10.1101/gad.7.6.996

Makeyev, A.V., Liebhaber, S.A. (2002). The poly(C)-binding proteins: A multiplicity of functions and a search for mechanisms. RNA. **8** (3): 265-278. doi: 10+1017+S1355838202024627

Maris, C., Domínguez, C., Allain, F.H. (2005). The RNA recognition motif, a plastic RNA-binding platform to regulate post-transcriptional gene expression. FEBS J. **272** (9): 2118-2131. doi: 10.1111/j.1742-4658.2005.04653.x

Mateyak, M.K., Kinzy, T.G. (2010). eEF1A: Thinking outside the ribosome. J Biol Chem. **285** (28): 21209-2113. doi: 10.1074/jbc.R110.113795

Mi, H., Dong, Q., Muruganujan, A., Gaudet, P., Lewis, S., Thomas, P.D. (2010). PANTHER version 7: Improved phylogenetic trees, orthologs and collaboration with the Gene Ontology Consortium. Nucleic Acids Res. **38:** D204-10. doi: 10.1093/nar/gkp1019

Mittal, N., Subramanian, G., Butikofer, P., Madhubala, R. (2013). Unique posttranslational modifications in eukaryotic translation factors and their roles in protozoan parasite viability and pathogenesis. Mol Biochem Parasitol. **187** (1): 21-31. doi: 10.1016/j.molbiopara.2012.11.001

Müller-McNicoll, M., Neugebauer, K.M. (2013). How cells get the message: Dynamic assembly and function of mRNA-protein complexes. Nat Rev Genet. **14** (4): 275-287. doi: 10.1038/nrg3434

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):306-318, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.671

Noble, C.G., Song, H. (2008). Structural studies of elongation and release factors. Cell Mol Life Sci. **65** (9): 1335-1346. doi: 10.1007/s00018-008-7495-6.

Nocua, P. A. (2017). Estudio de factores proteicos asociados a la regulación de los genes HSP70 en *Leishmania braziliensis.* Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Nocua, P.A., Ramírez, C.A., Barreto, G.E., González, J., Requena, J.M., Puerta, C.J. (2014). *Leishmania braziliensis* replication protein A subunit 1: Molecular modelling, protein expression and analysis of its affinity for both DNA and RNA. Parasit Vectors. **7:** 573. doi: 10.1186/s13071-014-0573-8

Nocua, P.A., Ramírez, C.A., Requena, J.M., Puerta, C.J. (2017). *Leishmania braziliensis* SCD6 and RBP42 proteins, two factors with RNA binding capacity. Parasit Vectors. **10** (1): 610. doi: 10.1186/s13071-017-2557-y

Parker, R., Sheth, U. (2007). P bodies and the control of mRNA translation and degradation. Mol Cell. **25** (5): 635-646. doi: 10.1016/j.molcel.2007.02.011

Puerta, C. (2007). Consideraciones taxonómicas, polimorfismo y clasificación. En: C.J. Puerta. Parásito, genoma y biología. Aproximación molecular al estudio de *Trypanosoma rangeli* y su relación con *Trypanosoma cruzi*. (59-68). Bogotá, Colombia: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

Quijada, L., Soto, M., Alonso, C., Requena, J.M. (2000). Identification of a putative regulatory element in the 3'-untranslated region that controls expression of HSP70 in *Leishmania infantum*. Mol Biochem Parasitol. **110** (1): 79-91. doi: 10.1016/S0166-6851(00)00258-9

Rajyaguru, P., Parker, R. (2012). RGG motif proteins: Modulators of mRNA functional states. Cell Cycle. **11** (14): 2594-2599. doi: 10.4161/cc.20716

Ramírez, C.A. (2012). Caracterización molecular de los genes HSP70, a-tubulina y ND8 de *Leishmania braziliensis* y detección de factores proteicos asociados a la regulación de los genes HSP70. Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Ramírez, C.A., Dea-Ayuela, M.A., Gutiérrez-Blázquez, M.D., Bolas-Fernández, F., Requena, J.M., Puerta, C.J. (2013). Identification of proteins interacting with HSP70 mRNAs in *Leishmania braziliensis*. J Proteomics. **94:** 124-137. doi: 10.1016/j.jprot.2013.09.008

Ramírez, C.A., Requena, J.M., Puerta, C.J. (2011). Identification of the HSP70-II gene in *Leishmania braziliensis* HSP70 locus: Genomic organization and UTRs characterization. Parasit Vectors. **4:** 166. doi: 10.1186/1756-3305-4-166

Requena, J.M. (2011). Lights and shadows on gene organization and regulation of gene expression in *Leishmania*. Front Biosci. **16:** 2069-2085. doi: 10.2741/3840

Requena, J. M. (2012). The stressful life of pathogenic *Leishmania* species. En: J.M. Requena. Stress response in Microbiology. (323-346). Norfolk, Reino Unido: Caiser Academic press. ISBN: 978-1-908230-04-1

Ribbeck, K., Lipowsky, G., Kent, H.M., Stewart, M., Gorlich, D. (1998). NTF2 mediates nuclear import of Ran. EMBO J. **17** (22): 6587-6598. doi: 10.1093/emboj/17.22.6587

Romaniuk, M.A., Cervini, G., Cassola, A. (2016). Regulation of RNA binding proteins in trypanosomatid protozoan parasites. World J Biol Chem. **7** (1): 146-157. doi: 10.4331/wjbc.v7.i1.146

Tourriere, H., Chebli, K., Zekri, L., Courselaud, B., Blanchard, J.M., Bertrand, E., Tazi, J. (2003). The RasGAP-associated endoribonuclease G3BP assembles stress granules. J Cell Biol. **160** (6): 823-831. doi: 10.1083/jcb.200212128

Turner, M., Díaz-Muñoz, M. (2018). RNA-binding proteins control gene expression and cell fate in the immune system. Nat Immunol. **19:** 120-129. doi: 10.1038/s41590-017-0028-4

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):319-322, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.784

Inaugural article

Physical Sciences

New universal 3-3-1 models

William A. Ponce

Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 6 de Diciembre de 2018

Abstract

We review in a systematic way how anomaly free $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$ models without exotic electric charges are constructed, using as basis closed sets of fermions which includes each one the particles and antiparticles of the electrically charged fields. Our analysis reproduce not only the known models in the literature, but also shows the existence of two new family independent ones not considered so far. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Gauge models; Extensions to the standard model; Gauge anomalies.

Nuevos modelos 3-3-1 universales

Resumen

Se revisa de manera sistemática como se construyen los modelos sin cargas eléctricas exóticas basados en el grupo gauge local $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$, usando como base conjuntos cerrados de fermiones los cuales incluyen las partículas y las antipartículas de los campos eléctricamente cargados. Nuestro análisis no solo reproduce los modelos presentes en la literatura, sino que muestra la existencia de dos modelos nuevos independientes de familias no estudiados a la fecha. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Modelos gauge; Extensiones al modelo estándar; Anomalías gauge.

Introduction

The impressive success of the Standard Model (SM) based on the local gauge group $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ with the color sector SU(3)c confined and the flavor sector $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ hidden and broken spontaneously by the minimal Higgs mechanism (**Donoghue, Golowich & Holstein,** 2014), has not been able enough to provide, among others, explanation for several fundamental issues, among them the masses and mixing angles for both, the quark and the lepton sectors, and the abundance of dark matter and dark energy in the universe. Because of this, many physicists believe that it does not stand for the final theory, representing only an effective model originated from a more fundamental one.

Minimal extensions of the SM arise either by adding new fields, or by enlarging the local gauge group (adding a right handed neutrino field constitute its simples extension, something that ameliorate, but not solve the two problems mentioned above).

Simple extensions of the local gauge group consider an electroweak sector with an extra abelian symmetry $SU(2)_L \otimes U(1)_w \otimes U(1)_z$ (**Ponce,** 1987), or either the so called left right symmetric model $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_{(B-L)}$ and also $SU(3)_L \otimes U(1)_X$, being the last the one we are going to consider next (**Pisano & Pleitez,** 1992; **Ponce, *et al.,*** 2001).

3-3-1 Models

In what follows we assume that the gauge group is $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$ (3-3-1 for short) in which the electroweak sector of the standard model $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ is extended to $SU(3)_L \otimes U(1)_X$. We also assume that, as in the SM, the color group $SU(3)_c$ is vector-like (free of anomalies) and that the left-handed quarks (color triplets) and left-handed leptons (color singlets) transform under the two fundamental representations of $SU(3)_L$ (the 3 and 3*).

Two classes of models will show up: universal models where the anomalies cancel in each family as in the SM, and family models where the anomalies cancel by an interplay between the several families.

For the 3-3-1 models, the most general electric charge operator in the extended electroweak sector is

$$Q = a\lambda_3 + \frac{1}{\sqrt{3}} b\lambda_8 + XI_3, \qquad (1)$$

where λ_α, $\alpha = 1, 2, \ldots, 8$ are the Gell-Mann matrices for $SU(3)_L$ normalized as $\mathrm{Tr}(\lambda_\alpha \lambda_\beta) = 2\delta_{\alpha\beta}$ and $I3 = Dg(1, 1, 1)$ is

Corresponding autor:
William A. Ponce, william.ponce@udea.edu.co
Received: October 25, 2018
Accepted: November 19, 2018
Editor: Diógenes Campos Romero

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):319-322, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.784

the diagonal 3 × 3 unit matrix. $a = 1/2$ if one assumes that the isospin $SU(2)_L$ of the SM is entirely embedded in $SU(3)_L$; b is a free parameter which fixes the model and the X values are obtained by anomaly cancellation. $X = 0$ for the 8 gauge fields A^{α}_{μ} of $SU(3)_L$, and thus they may be written as (**Ponce, *et al.*,** 2001):

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} A^{\alpha}_{\mu} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} D^{0}_{1\mu} & W^{+}_{\mu} & K^{(b+1/2)}_{\mu} \\ W^{-}_{\mu} & D^{0}_{2\mu} & K^{(b-1/2)}_{\mu} \\ K^{-(b+1/2)}_{\mu} & K^{-(b-1/2)}_{\mu} & D^{0}_{3\mu} \end{pmatrix},$$

where $D^0_{1\mu} = A^3_{\mu}/\sqrt{2} + A^8_{\mu}/\sqrt{6}$, $D^0_{2\mu} = -A^3_{\mu}/\sqrt{2} + A^8_{\mu}/\sqrt{6}$, and $D^0_{3\mu} = -2A^8_{\mu}/\sqrt{6}$. The upper indices on the gauge bosons stand for the electric charge of the particles, some of them being functions of the b parameter.

The Minimal Model

Pisano & Pleitez (1992) shown that, for $b = 3/2$, the following fermion structure is free of all the gauge anomalies: $\psi^T_{lL} = (\nu^0_l, l^-, l^+)_L \sim (1, 3, 0)$, $Q^T_{lL} = (d_i, u_i, X_i)_L \sim (3, 3^*, -1/3)$, $Q^T_{3L} = (u3, d3, Y) \sim (3, 3, 2/3)$, where $l = e, \mu, \tau$ is a family lepton index, $i = 1, 2$ for the first two quark families, and the numbers after the similarity sign means 3-3-1 representations. The right handed fields are $u^c_{aL} \sim (3^*, 1, -2/3)$, $d^c_{aL} \sim (3^*, 1, 1/3)$, $X^c_{iL} \sim (3^*, 1, 4/3)$ and $Y^c_L \sim (3^*, 1, -5/3)$, where $a = 1, 2, 3$ is the quark family index and there are two exotic quarks with electric charge $-4/3$ (X_i) and other with electric charge 5/3 (Y).

This version is called minimal in the literature, because it does not make use of exotic leptons including possible right-handed neutrinos.

3-3-1 Models Without Exotic Electric Charges

If one wishes to avoid exotic electric charges in the fermion and boson sectors as the ones present in the minimal model, one must choose $b = 1/2$, in Eq. (1) as shown in **Ponce, *et al.*** (2001).

To start with, let us consider the following six closed sets of fermions, closed in the sense that they contain the antiparticles of all the charged particles

- $S_1 = [(\nu^0_e, e-, E-) \otimes e+ \otimes E+]_L$ with quantum numbers (1, 3, −2/3); (1, 1, 1) and (1, 1, 1) respectively.
- $S_2 = [(e-, \nu^0_e, N^0) \otimes e+]_L$ with quantum numbers (1, 3*, −1/3) and (1, 1, 1) respectively.
- $S_3 = [(d, u, U) \otimes u^c \otimes d^c \otimes U^c]_L$ with quantum numbers (3, 3*, 1/3); (3*, 1, −2/3); (3*, 1, 1/3) and (3*, 1, −2/3) respectively.
- $S_4 = [(u, d, D) \otimes u^c \otimes d^c \otimes D^c]_L$ with quantum num-bers (3, 3, 0); (3*, 1, −2/3); (3*, 1, 1/3) and (3*, 1, 1/3) respectively.
- $S_5 = [(N^0_1, E^+_1, e+) \otimes E^-_1 \otimes e-]_L$ with quantum numbers (1, 3*, 2/3) (1, 1, −1), and (1, 1, −1) respectively.
- $S_6 = [(E^+_2, N^0_2, N^0_3) \otimes E^-_2]_L$ with quantum numbers (1, 3, 1/3) and (1, 1, −1) respectively.

Table 1. Anomalies for 3-3-1 fermion fields structures

Anomalies	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$[SU(3)_C]^2 U(1)_X$	0	0	0	0	0	0
$[SU(3)_L]^2 U(1)_X$	−2/3	−1/3	1	0	2/3	1/3
$[Grav]^2 U(1)_X$	0	0	0	0	0	0
$[U(1)_X]^3$	10/9	8/9	−12/9	−6/9	-10/9	-8/9
$[SU(3)_L]^3$	1	−1	−3	3	−1	1

In the former sets N^0 and N^0_3 can play the role of the right handed neutrino $\nu^{0\,c}_e$ in an SO(10) basis.

Notice that our approach here is different to the one presented in **Ponce, *et al.*** (2001), the difference being that only one $SU(3)_L$ triplet is used in each set, instead of the composite ones present in the former reference.

The several gauge anomalies calculated for these six sets are proportional to the values quoted in Table 1 (a common constant value or a Kronecker delta can be present in each row in the table). Notice that the anomaly values for S_1, S_2, S_3 and S_4 coincide with the ones presented in **Ponce, *et al.*** (2001), being the values for S_5 and S_6 new results.

Now, if we want to consider only one family of quarks, either the sets S_3 or S_4 are enough, but for 3 quark families, one of the following combinations must be used: $3S_3$, $3S_4$, $(2S_3 + S_4)$ and $(S_3 + 2S_4)$.

Taking this into account and using the values in Table 1, we can see that with the particle sets under consideration it is impossible to construct one family (universal) models.

An unrealistic two family model is for example $S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ [unrealistic because there is strong evidence for at least three families in nature (**Donoghue, Golowich & Holstein,** 2014)].

Right from Table 1 it is simple to read the following two three family models free of anomalies:

- Model A: $3S_2 + S_3 + 2S_4$.
- Model B: $3S_1 + 2S_3 + S_4$,

two well known models in the literature; A being named as a "Model with right-handed neutrinos" (**Foot, *et al.*,** 1994; **Benavides, *et al.*,** 2009; **Montero, *et al.*,** 1993) and B named as a "Model with exotic charged leptons" (**Özer,** 1996; **Ponce & Zapata,** 2006; **Salazar, *et al.*,** 2007).

The strategy now is to use the lepton sets S_1, S_2, S_5 and S_6 to build non vector-like new sets of leptons. Notice that Vector-like sets as for example $S_1 + S_5$ and $S_2 + S_6$ are free of anomalies and not suitable for constructing realistic models due to the non zero anomalies in the quark sector [Vector-like sets are free of anomalies by definition (**Donoghue, Golowich & Holstein,** 2014)].

The new lepton sets we want to consider are now:

- $S_7 = [(e-, \nu^0_e, N^0_1) \otimes (N^0_2, E+, e+) \otimes E-]_L$ with quantum numbers $(1, 3^*, -1/3)$; $(1, 3^*, 2/3)$ and $(1, 1, -1)$ respectively.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.784

- $S_8 = [\nu_e^0,\ e^-,\ E^-) \otimes (E^+,\ N_1^0,\ N_2^0) \otimes e^+]_L$ with quantum numbers (1, 3, −2/3), (1, 3, 1/3) and (1, 1, 1) respectively.
- $S_9 = [(e^-,\ \nu e,\ N_1^0) \otimes (E^-,\ N_2^0,\ N_3^0) \otimes (N_4^0,\ E^+,\ e^+)]_L$ with quantum numbers (1, 3*, −1/3); (1, 3*, −1/3) and (1, 3*, 2/3) respectively.
- $S_{10} = [\nu e,\ e^-,\ E_1^-) \otimes (E_2^+,\ N_1^0,\ N_2^0) \otimes e^+ \otimes (N_3^0,\ E_2^-,\ E_3^-) \otimes E_1^+ \otimes E_3^+]_L$ with quantum numbers (1, 3, −2/3); (1, 3, 1/3); (111); (1, 3, −2/3); (111); (111), and (111) respectively.

The anomalies for these new lepton sets are given in Table 2. Again, the $SU(2)_L$ singlets N_1^0 in S_7 and S_9, N_2^0 in S_8 and S_{10} and N_3^0 in S_9 can play the role of the right handed neutrino field $\nu_e^{0\,c}$.

Notice that again $S_7 + S_8$ is Vector-like and because of this free of anomalies.

With the anomaly values in Table 1 and Table 2 new one family and three family models can be constructed. As a matter of fact, the following three family models show up:

• Model C: with unique lepton generation one $S_1 + S_2 + S_3 + 2S_4 + S_9$

• Model D: with unique lepton generation two $S_1 + S_2 + 2S_3 + S_4 + S_{10}$

• Model E: hybrid one $S_3 + 2S_4 + 2S_9 + S_{10}$

• Model F: hybrid two $2S_3 + S_4 + S_9 + 2S_{10}$

The phenomenology for the lepton sector of the two models with unique lepton generation (models C an D) has been presented by **Anderson & Sher** (2005). The phenomenology of the two hybrid models E and F have not been presented in the literature as far as we know.

Also, the following four one family models (universal) are readily constructed:

• Model G: carbon copy one $S_4 + S_9$

• Model H: carbon copy two $S_3 + S_{10}$

• Model I: carbon copy three $2S_2 + S_4 + S_5$

• Model J: carbon copy four $2S_1 + S_3 + S_6$

According to **Sanchez, *et al.*** (2001), the fermion structure of model G can be embedded in the unification group E(6), with some phenomenology of this structure allready presented in the same reference.

In a similar way, the fermion structure of model H can

be embedded in the gauge group $SU(6) \otimes U(1)$ as presented by **Martinez, *et al.*** (2001).

As can be seen, the first eight models A.....H have been already reported in the literature (**Ponce, *et al.,*** 2001); but models I and J are new ones!

The name “Carbon Copy” we adopted is due to the fact that realistic, 3 family models, can be constructed just by repeating three times the corresponding fermion structures, just as in the SM.

All the models presented here can also be enlarged by adding to each one of them an extra vector like structure ($S_1 + S_5$ and/or $S_2 + S_6$).

The fermion structures studied in this section are so rich, that they can be used to construct non universal models for several families (two, three, four, five, etc.). In particular, four family models using these structures were presented for the first time by **Ponce, *et al.*** (2010).

Table 2. Anomalies for the 3-3-1 non Vector-Like lepton fields structures

Anomalies	S_7	S_8	S_9	S_{10}
$[SU(3)_C]^2 U(1)_X$	0	0	0	0
$[SU(3)_L]^2 U(1)_X$	1/3	-1/3	0	-1
$[Grav]^2 U(1)_X$	0	0	0	0
$[U(1)_X]^3$	−2/9	2/9	6/9	12/9
$[SU(3)_L]^3$	−2	2	−3	3

To conclude this section let us mention that the extension of this analysis to non universal three family models (work in progress) can be used to explain the experimental anomalies reported recently in the Large Hadron Collider.

The 3-3-1 model with righthanded neutrinos

To make explicit our notation, let us present here the Fermion structure of the most popular of the models analyzed here, the so called “model with right-handed neutrinos”, introduced in the literature for the first time by **Montero, *et al.*** (1993) and **Foot, *et al.*** (1994). This model has the following 3-3-1 anomaly free fermion structure:

$$\psi_{lL}^T = (l^-, \nu_l^0, N_l^0)_L \sim (1, 3^*, -1/3),\ l_L^+ \sim (1, 1, 1),$$
$$Q_{iL}^T = (u_i, d_i, D_i)_L \sim (3, 3, 0),$$
$$Q_{3L}^T = (d_3, u_3, U)_L \sim (3, 3^*, 1/3),$$

where $l = e, \mu, \tau$ is a family lepton index, N_{lL}^0 stands for electrically neutral Weyl states, and $i = 1, 2$ for the first two quark families. The right handed quark fields are

$$u_{aL}^c \sim (3^*, 1, -2/3),\quad d_{aL}^c \sim (3^*, 1, 1/3),$$
$$D_{iL}^c \sim (3^*, 1, 1/3),\quad U_L^c \sim (3^*, 1, -2/3),$$

where again $a = 1, 2, 3$ is the quark family index. Once more, there are two exotic quarks with electric charge −1/3 (D_i) and other with electric charge 2/3 (U).

The extended phenomenology studies done for this model shows that N_l^0, $l = e, \mu, \tau$ can be identified with the right-handed neutrinos ν_l^{0c}, which belong to the same 3-3-1 representation of the neutrino fields; so, lepton number is not a good quantum number for this particular model and it is not conserved (**Chang & Long,** 2006).

New universal 3-3-1 models

Let us see the fermion structure of these two new models which appears from our systematic analysis:

Model I. The particle content for this model is the following:

$$[(e^-, \nu_e^0, N^0) \oplus e^+ \oplus (E_1^-, N_1^0, N_2^0) \oplus E_1^+]_L \oplus$$
$$[(N_3^0, E_2^+, E_3^+) \oplus E_2^- \oplus E_3^-]_L \oplus$$
$$[(u, d, D) \oplus u^c \oplus d^c \oplus D^c[_L$$

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):319-322, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.784

A model with an extra down quark, three exotic electrons and five neutral Weyl states in each family.

Model J. The particle content for this model is the following

$$[(\nu_e^0, e^-, E_1^-) \oplus e^+ \oplus E_1^+ \oplus (N_1^0, E_2^-, E_3^-)]_L \oplus$$
$$[E_2^+ \oplus E_3^+ \oplus (E_4^+, N_2^0, N_3^0) \oplus E_4^-]_L \oplus$$
$$[(d, u, U) \oplus u^c \oplus d^c \oplus U^c]_L$$

A model with an extra up quark, four exotic electrons and four neutral Weyl states in each family.

The phenomenology for these two new models is being carried through right now by our research group and will be presented elsewhere.

Summary

In this paper we have done a systematic analysis in order to construct 3-3-1 models without exotic electric charges; ten models appear, eight of them already considered in our previous analysis (**Ponce, *et al.,*** 2001) and two new ones which we believe deserve special attention.

The next question is how to break the 3-3-1 gauge symmetry and provide with masses to the fermion fields in each model. The answer for this is a matter not settled yet. In **Ponce, *et al.*** (2003) the minimal set of Higgs scalars able to break the symmetry is presented, something called in the literature as the economical 3-3-1 model; unfortunately, it is not clear yet if this minimal set provides with masses to all the fermion fields in each model, something which is very unlike (**Montero & Sánchez-Vega,** 2015). A more realistic set of Higgs scalars able to break the symmetry and to provide masses to the fermion fields has been studied in detail (**Ponce & Giraldo,** 2001; **Ponce, *et al.,*** 2009).

A very attractive fact about the economical 3-3-1 structure is that in some versions of it, the troublesome Majoron is gauged away and is not present en the particle spectrum (**Benavides, *et al.,*** 2015).

Finally, let us mention that the phenomenology for the two new models presented is under consideration right now, and the results will be presented else where.

References

Anderson, D.L. and Sher, M. (2005). Phys. Rev. D 72, 095014.

Benavides, R.H., Epele, L.N, Fanchiotti, H., García Canal, C., and Ponce, W.A. (2015). Adv. in High Energy Physics, 813129.

Benavides, R.H., Giraldo, Y. and Ponce, W.A. (2009). Phys. Rev. D 80, 113009.

Chang, D. and Long, H.N. (2006). Phys. Rev. D 73, 053006.

Donoghue, J.F., Golowich, E. and Holstein, B.R. (2014). Dynamics of the standard model, Second Edition. Cambridge, England: Cambridge University Press. This reference is an excellent compendium for the SM.

Foot, R., Long, H.N. and Tran, T.A. (1994). Phys. Rev. D50, R34.

Martinez, R. Ponce, W.A. and Sánchez, L.A. (2002). Phys. Rev. D 65, 055013.

Montero, J.C., Pisano, F. and Pleitez, V. (1993). Phys. Rev. D47, 2918.

Montero, J.C. and Sánchez-Vega, B.L. (2015). Phys. Rev. D 91, 037302.

Özer, M. (1996). Phys. Rev. D 54, 1143.

Pisano, F. and Pleitez, V. (1992). Phys. Rev. D 28, 540.

Ponce, W.A. (1987). Phys. Rev. D 36, 962.

Ponce, W.A., Benavides, R.H. and Giraldo, Y. (2010). Phys. Rev. D 82, 013004.

Ponce, W.A., Flórez, J.B., and Sánchez, L.A. (2001). Int. J. Mod. Phys. A 17, 643.

Ponce, W.A. and Giraldo, Y. (2011). The European Physical Journal C71, 1693.

Ponce, W.A., Giraldo, Y. and Sánchez, L.A. (2009). The European Physical Journal C63, 461.

Ponce, W. A., Giraldo, Y. and Sánchez, L.A. (2003). Phys. Rev. D 67, 075001.

Ponce, W.A. and Zapata, O. (2006). Phys. Rev. D 74, 093007.

Salazar, J.C., Ponce, W.A. and Gutiérrez, D. (2007). Phys. Rev. D 75, 075016.

Sánchez, L.A, Ponce, W.A. and Martinez, R. (2001). Phys. Rev. D 64, 075013.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):323-329, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.646

Original article

Natural Sciences

External morphology of the fish parasite *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae), under the scanning electron microscope

José Christian Díaz del Basto[1], José Iván Mojica[2,*], Hans-Werner Koyro[3]

[1] Independent researcher, Limburg, Germany.
[2] Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia.
[3] Institut für Pflanzenökologie Interdisziplinäres Forschungszentrum für Umweltsicherung (IFZ), Justus-Liebig-Universität, Giessen, Germany.

Abstract

Based on the three-dimensional images of the endemic Colombian ichthyoparasite *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) taken with a high-resolution scanning electron microscope (SEM), we described and analysed the superficial morphological structures developed as adaptations to their temporary hematophagous form of life. We centered on the emergent functional aspects of these adaptations and on the mechanisms used by these parasites of the subfamily Vandellinae to locate its host fish with precision adhering on its gills. We concluded that these parasites detect the host using their neuromasts, the mechanical receptors in their cephalic pores system and their lateral line, and not through the chemical reception of catabolic nitrogen products, as commonly suggested. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Magdalena basin; Vandellinae; Neuromast channel; Superficial neuromast.

Morfología externa del pez parásito *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae) observada mediante imágenes de microscopía electrónico de barrido

Resumen

Con base en imágenes de microscopía electrónica de barrido tridimensional (SEM) de alta resolución de *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943), especie de ictioparásito endémica de Colombia, se describieron y analizaron las estructuras morfológicas superficiales desarrolladas en su proceso evolutivo de adaptación a la forma de vida hematófaga. La atención se enfocó en los aspectos emergentes de la función de estas adaptaciones y en los mecanismos que estos parásitos de la subfamilia Vandellinae han utilizado para localizar con precisión su pez huésped y fijarse en sus branquias. Se concluyó que detectan al huésped utilizando los neuromastos, receptores mecánicos del sistema de poros cefálicos y de la línea lateral, y no a través de la recepción química de productos del nitrógeno catabólico, como se ha sugerido. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Cuenca del Magdalena; Vandellinae; Canal de neuromastos; Neuromastos superficiales.

Introduction

Paravandellia phaneronema (**Miles,** 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae) is an endemic fish parasite from the basins of the Magdalen and Cauca rivers and is the only species of the genus in Colombia (**DoNascimiento, *et al.,*** 2017). As is usual with temporary hematophagous parasites of large fish species, *P. phaneronema* is often found with its intestines full of blood in the gills of the streaky catfish (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) (**Buitrago, *et al.,*** 2007), hence its common name in English: "lancet, bloodsucker" or "son of streaky catfish" (**Miles,** 1947; **Dahl,** 1971).

The Trichomycteridae includes some of the most remarkable feeding specializations found among fishes. All the species of the subfamily Vandelliinae are exclusively hematophagous, sucking blood from the gills of other fishes (**Kelley & Atz,** 1964; **Machado & Sazima,** 1983; **Zuanon & Sazima,** 2005). Stegophilines and Vandelliines are popularly known in the Amazon as "candirus" and their accidental penetration of the urethras of humans and other mammals has been reported several times (**Gudger,** 1930). A detailed account of that remarkable phenomenon, however, has not yet been published. Their most conspicuous synapomorphies lie in the structure of the opercular

***Corresponding autor:**
José Iván Mojica, jimojicac@unal.edu.co
Received: April 17, 2018
Accepted: October 9, 2018
Editor: Néstor Campos

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):323-329, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.646

apparatus. The interopercle is modified into a compact structure with a large ventroposterior platform that supports a patch of odontodes. The opercle is also highly modified as an odontode-bearing structure. The parasitic forms also use the opercular apparatus for penetrating and anchoring themselves to their hosts (**de Pinna,** 1998).

By means of micrographs obtained from material examined under a scanning electronic microscope (SEM), we attempted to clarify the external morphologic adaptations of this species. We used repeated magnifications to study the evolutionary processes underlying their detection habits with neuromasts (mechanical receptors), the reduction and elongation of the body for penetration of the gill chambers, as well as some adaptations of morphologic character used for their anchor on the gills and the modification of teeth for the incision of the gill filaments and lamellae arteries of the host.

The biology of this fish has not been studied in detail. It is only known to inhabit muddy river beds (**Román-Valencia**, 1998; **Maldonado-Ocampo,** ***et al.***, 2005). Our study was based on the examination of its external morphological adaptations using SEM images.

Methods

Using the scanning electron microscope at the University of Giessen (Germany), we obtained images from three of the eighteen specimens of *P. phaneronema* collected in February 1965 (**Díaz del Basto,** 1970) during an expedition conducted along the Cesar River, a tributary of the Magdalena River in Colombia. The samples were taken in the area known as Boca de La Miel (9º47´37" N; 73º37´12" W). They were swimming freely in a shoal near the water surface at the end of the dry period when the sediments of decomposing organic material from minor tributaries caused by the first rains had already appeared. The sediment load was inducing the fish to rise to the surface due to water eutrophication and oxygen insufficiency. The specimens were fixed in 3% formalin and later preserved in 70% ethanol.

Preparation of the specimens for scanning electron microscopy. The preparation of the three specimens (total length: 17 mm, 18 mm, and 20 mm each) for their observation under the SEM was carried out after a medium-sized dorsal-ventral dissection for assembly on the specimen mount. Specimens were immersed in 2% glutaraldehyde and 1% formalin (buffered in 0.1 M sodium cacodylate adjusted to a pH of 7.2) for two hours at room temperature. They were stored overnight (15-20 hours) in the fixative in a refrigerator (4-8 ºC). Specimens were chilled in 0.5 ml of tap water in a refrigerator (4-8 ºC) for 30 minutes. They were sequentially fixed by adding four drops of cold 4% glutaraldehyde and 2% formalin (buffered with 0.1 M sodium cacodylate, pH 7.2) every half hour until the final concentration of fixative reached 2% glutaraldehyde and 1% formalin. Fixation continued overnight (15-20 hours) in the cold. After fixation, all specimens were postfixed in 2% osmium tetroxide (buffered in 0.1 M sodium cacodylate, pH 7.2) for eight hours in the cold (4 ºC), dehydrated in a seven-step acetone, and dried by the critical point method with CO_2 using standard procedures (**Eisenback,** 1985). The samples were then sputter-coated with a thin layer (200nm) of gold to enhance conductivity, mounted onto aluminium stubs, and viewed with a Philips SEM XL20 scanning electron microscope at 10kV. The sturdiness of the sample was evaluated creating a 5 x 5 cm focusing window in the image display at 1000x for one minute and then reduced to lower magnification 4000x to determine whether any depression, changes or edges were left in the focusing window or could be seen by full frame observation.

Results

We obtained a series of back, side and ventral SEM images of the specimens of processed *P. phaneronema* which provided the details of the surface and external texture of different morphologic structures of the anatomical adaptations for its parasitism. The SEM images are presented in eighteen micrographs as follows.

The general anterodorsal head view (Figure 1a) shows where the nostrils, the six cephalic pores and the operculum with a patch of odontodes are located. The head is spindle-shaped with a convex back profile and the egg-shaped snout has a distal disc whose function remains unknown. The eyes are only visible as circular nodes to the sides of the latter nostrils due to the SEM technology. The eyes in living specimens are rounded and entirely visible. A system of eight sensory cephalic pores spread obliquely from the snout back to the operculum presumed to be the mechanism for host location.

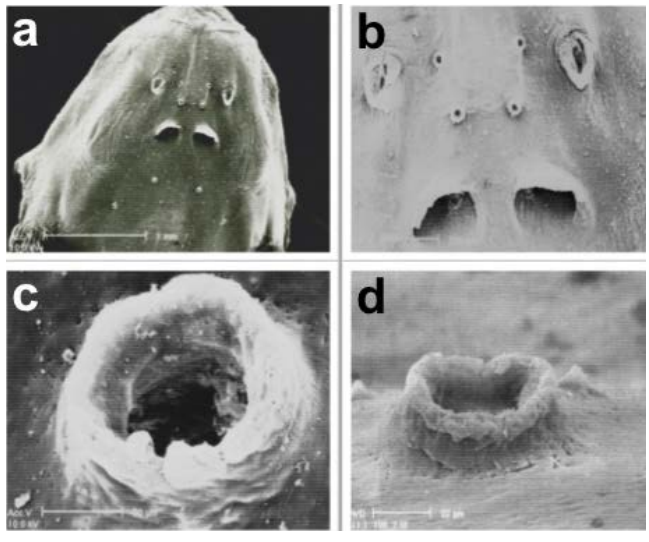


Figure 1. Head, dorsal view (a); two pairs of cephalic pores between the nostrils and a pair inside the posterior nostrils (b); detail of dorsal view of the cephalic pore (c); detail of a cephalic pore, side view (d)

The two pairs of nostrils and the first three pairs of cephalic pores are detailed in Figure 1b. The anterior nostrils have a spindle-shaped tubular structure with a frame of protuberant dermal flap. The distance between the anterior nostrils is wider than between the posterior nostrils, which are rounded and almost half covered by a proximal semicircular dermal fold. The first two pairs of cephalic pores form a square between the anterior nostrils. A third pair of cephalic pores is just visible inside the posterior nostrils.

The magnified frontal and side views (Figures 1c and 1d) show more details of these pores, which appear like structures in the shape of a chimney. Apparently, their function could be that of facilitating the water flow to the interior of the cephalic channels where the neuromasts are located, like a morphologic adaptation of the sensory system for orientation in the aquatic environment and for the reception of the hydrodynamic information produced by the host.

In the upper ventral torso (Figure 2a) the egg-shaped outline of the snout, the mouth cavity with numerous teeth, and two pairs of maxillary barbels can be observed: the longest and thinnest barbels do not reach the interopercular plate of odontodes while the slightly thicker internal barbels scarcely reach the labial rim. Nasal barbels are absent.

From the ventral position, the mouth cavity is not as wide as the head, and the top lip forming a moderately sharp arch with straight sides can be seen (Figure 2b). The internal rims of the top lip form a sharp posterior margin covered with a crease of tegument. The premaxillary has two types of teeth: a) twelve central located canine teeth that are long and curved and rest on a semi-circular muscular lobe. These are probably the teeth adapted to anchor onto the gills of the host, an evolutionary mechanism that permits the parasite to perforate the arteries of the gills (phlebotomy); b) six shorter teeth are dispersed towards the flanks of the premaxillary teeth. The number of teeth can vary between individual specimens.

With another specimen we carried out a microdissection of the separated lobes of the lower lip to confirm the existence of teeth (Figure 2c). Two long and vaulted teeth under the tegument of every lobe can also be seen as a row of four vaulted teeth, all joined to the dentary, which are not functional (Figure 2d).

The left side of the trunk has a relatively curved back profile. The under part of the head is flat and continues obliquely from the pectoral fins to the posterior part of the body (Figure 3a). The image shows the hook-shaped teeth relatively parallel to the snout line. The maxillary barbels, the operculum, and the interoperculum with the odontodes plates, the operculum, and the pectoral fin can also be seen.

The interopercular odontodes varied between the analysed specimens, from eight long and pointed ones, barely curved **(**Figure 3b**),** up to twelve with an extremely hooked form (Figure 3c), possibly retractable to adhere to the gill plates of the host. The dermal retractable fold perfectly surrounds the odontodes in a semicircle to cover them and, hence, facilitate its mobilization inside the gills.

The operculum plate has 14 curved odontodes and a circular dermal flange, possibly for the recovery of the thorn-like odontodes (Figure 3d). Behind the five pores previously seen in Figure 1, there are other three pairs of cephalic pores: the sixth is located in the forward base of the operculum plate, the seventh in the posterior base, and the eighth, more distally at the end level of the pectoral fin. Channels between the pores and the lateral line connect these pores.

With an increased magnification of the operculum plate (Figure 4a), eighteen curved odontodes are visible, as well as the retractable odontode on the dermal crease and the seventh and eighth cephalic pores referred to above. Further magnification of the operculum plate (Figure 4b) shows

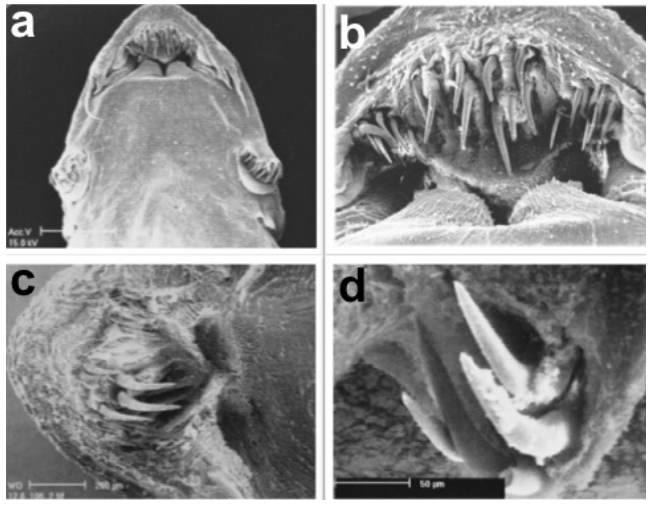


Figure 2. Head in ventral view (a); oral cavity (b); lower lip (c); two pairs of mandibular teeth under the lower lip (d)

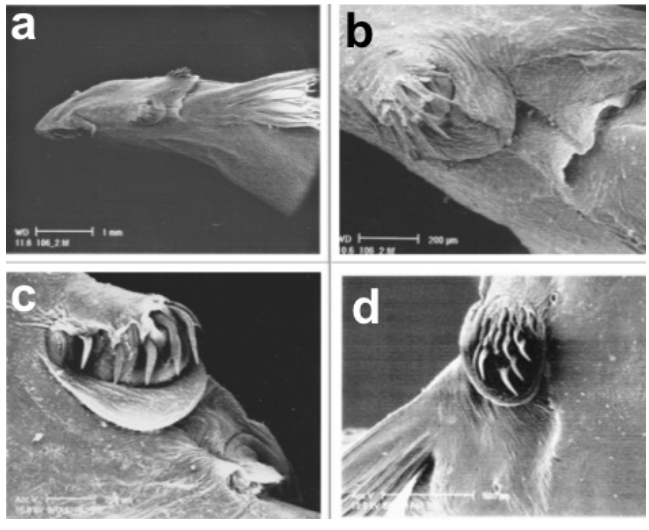


Figure 3. Head, left side view (a); interoperculum with straight odontodes and membranous fold (b); interoperculum with curved odontodes and membranous fold (c); details of opercular plate, dorsal view, and lateral line pores 7, 8 and 9 (d)

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):323-329, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.646

the odontodes lightly raised from the individual fusiform-shaped dermal chamber. This proves that the odontodes are not rigid but retractable structures that possibly act as part of the active system of adhesion to hosts gills.

The details of the external striated abdominal musculature developed to satisfy the enormous dilatation potential are shown in Figure 4c. As soon as the blood sucking ends, the specimens release themselves from the gills with the abdomen full of blood and they continue the digestive process in their habitat.

With a transversal cut of the abdominal musculature, highly flexible muscular fibres can be observed with very elastic connections to the abdominal cavity. These enable the storage of the enormous quantity of blood extracted from the host (Figure 4d). Figures 5a and b could be superficial neuromasts. Often the cupula is lost in the preparation and so the hair bundles of the sensory cells.

Discussion

Parasite and host relationship. After highlighting the dynamics of the interrelation between parasite and host, it is time to consider the complex physiological osmoregulation and the function of the mechanoreceptor organs of the teleost freshwater fish. There appear to be two possible operating modes of this parasitic fish for detecting its host: the commonly accepted chemical attraction to the ammonia waste of the host and the hypothesis we present in our study, i.e., the remote perception of the host by means of the parasites' canal or superficial neuromasts. Our results offer a possible solution to this question, but further experimental research on the sensory system of this genus is required.

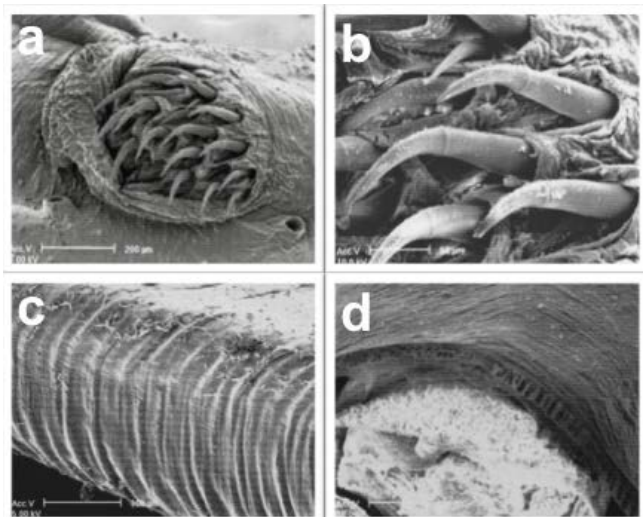


Figure 4. Detail of opercular plate, dorsal view, and lateral line pores 7 and 8 (a); detail of retractable odontodes on a fusiform base (b); striated abdominal musculature for blood storage (c); cutting of striated abdominal muscles for blood storage (d)

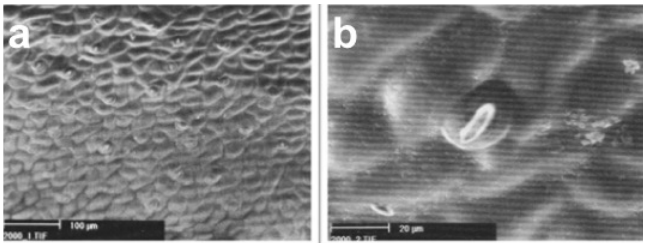


Figure 5. SEM micrograph of the skin with superficial neuromasts (a); enlargement of a neuromast (b)

The function of neuromasts in remote detection of hosts. By means of the SEM images we were able to detect alternative or complementary mechanical reception centers on the structures viewed. The lateral line is a hydrodynamic sensory system and fish use its information in many of their behaviors including spatial orientation, rheotaxis, schooling, prey detection, predator avoidance, and intraspecific communication (**Bleckmann,** 1994).

The smallest functional unit of the fish lateral line is the neuromast, a sensory structure that can stand out on the skin (superficial neuromast) or in the fluid-filled canals (canal neuromast) that usually open to the environment through a series of pores (**Puzdrowski,** 1989; **Schmitz, *et al.,*** 2008; **Bleckmann, *et al.,*** 2010).

The organs responsible for this lateral line system consist of units of gelatine provided with nerve connections. These neuromasts form groups of cells covered by a gelatinous dome moved by the water which, in its turn, moves the cilia of the hair cells in charge of sending messages to the brain. The neuromasts of the body are supplied by branches of the vagus nerve (X) and those of the head, by the facial nerve (VII) and the glossopharyngeal nerve (IX). The nerves send signals to the ciliated cells for their activation in the brain and these locate and identify possible sources of the changes detected in the movement of the water (**Norman,** 1966).

The hair cell is the main sensory cell of the lateral line system. Like all hair cells, these have a hair bundle at their apical surface comprised of up to 150 stereovilli that grow longer from one edge of the bundle to the other. A single true kinocilium always occurs eccentrically at the tall edge of the hair bundle. Within the sensory epithelium of a neuromast, the hair cells are oriented into two opposing directions that define the most sensitive axis of a neuromast (**Flock & Wersäll,** 1962). The hair bundles protrude into a cupula that connects the bundles with the water surrounding the fish or with canal fluid. Lateral line neuromasts are innervated by afferent and efferent nerve fibers. Morphological and physiological studies indicate that a single afferent fiber most likely innervates only hair cells with the same orientation (**Münz,** 1985; **Bleckmann,** 1994).

The hydrodynamic information provides the basis for many behavioural decisions. There is evidence that fish use it for prey detection, predator avoidance, intraspecific communication, schooling, object discrimination, entrainment, and rheotaxis (**Bleckmann,** 1993, 1994; **Montgomery, *et al.,*** 1997).

As mentioned, canal neuromasts are pressure gradient detectors. One of the stimulus parameters that is clearly encoded in the central lateral line pathway is the direction of the motion of an object, i.e., some central lateral line units require a certain temporal and spatial pattern of water motions (**Müller, *et al.,*** 1996; **Wojtenek, *et al*.,** 1998; **Plachta, *et al*.,** 2003; **Bleckmann & Zelick,** 2009).

Some authors have suggested that the *Vandellia* species in the Amazon basin are unable to actively absorb the blood of their host, therefore, they make an incision in the main gill arteries and use the blood pressure of the host to pump the blood into their intestines (**Zuanon & Sazima,** 2004).

The concept that nitrogen waste products from the host attract the parasite is questionable. On the basis of published values for teleost fish plasma ionic concentrations (**Keys,** 1931; **Smith,** 1932; **Krogh,** 1939) and the knowledge that freshwater teleosts have significantly lower plasma salt contents, we can conclude that they are still distinctly hyperosmotic in relation to their environment (~300 mOsm/l vs ~1 mOsm/l), Na and Cl^{-} being the dominant ions in the plasma. Because of these osmotic and ionic gradients, freshwater teleosts are overhydrated. These authors also knew that, as a consequence of these osmotic and ionic gradients, freshwater teleosts produce large volumes of dilute urine (**Evans,** 2008).

The salts are removed from the blood of bony fish in two ways: through the kidneys (mainly bivalent ions) or else through the gills (monovalent ions). As noted above, freshwater fish internal fluids are hypertonic to the external medium. In freshwater bony fish the main osmoregulatory function does not lead to the retention but to the excretion of surplus quantities of the water which has entered osmotically (**Nikolsky,** 1963).

The teleost fish gill is a multi-purpose organ, specialized in respiratory gas exchanges, the clearance of waste products from the nitrogenous metabolism, and the maintenance of acid-base and mineral balances. Structural studies reveal a complex epithelium. The chloride cells are almost certainly the site of ion exchange in relation to salt balance. Functional studies show that the gill is responsible for the net absorption of Na^{+} and Cl^{-} present in fresh water and that there is a coupling between endogenous NH_4^{+}, or H^{+} and HCO_3^{-} excretion and Na^{+} and Cl^{-} absorption. Biochemical studies have revealed two enzymes that play important roles in the ionic pumps: carbonic anhydrase and Na-K activated ATPase (**Maetz,** 1971).

The large electrochemical gradients for both Na^{+} and Cl^{-} between fish plasma and the medium in freshwater dictate that there should be mechanisms for the extraction of both of these ions from extremely diluted environments. Given that Na^{+} or Cl^{-} can be taken up independently by fishes, **Krogh** (1938) suggested that the extrusion of internal counterions, such as NH_4^{+}, H^{+}, or HCO_3^{-}, was probably chemically coupled to Na^{+} and Cl^{-} uptake in order to maintain reasonable electrical gradients across the gills. The gill epithelium of fish possesses a suite of transport steps for Na^{+} and Cl^{-} that also functions in the excretion of acid vs base and ammonium ions. The fish gill is also the site for the excretion of excess nitrogen in the form of ammonia. The multistring nature of the junctions between adjacent cells in the freshwater fish gill presumably hinder paracellular diffusion of NH_4^{+} and apical H^{+}-ATPase will not extrude NH_3. Given these limitations, it is generally assumed that the dominant and possibly sole mode of ammonia extrusion across the freshwater fish gill is via the paracellular diffusion of NH_3 (e.g., **Wilkie,** 1997).

Interestingly acidification of the apical unstirred layer by either proton extrusion or carbonic anhydrase-mediated hydration of expelled CO_2 would facilitate NH_3 diffusion by reducing the NH_3 to NH_4^{+}. This would maintain the partial pressure gradient for NH_3 diffusion across the gill (**Evans, *et al.,*** 1999).

These considerations on the regulation and the excretion of teleost freshwater fish lead us to question the supposed attraction of the parasite for nitrogenous metabolic products originating from the host. Considering the urea concentrations expelled in the urine or that of the ammonia (toxicant) that has to be dissolved by the gills and eliminated in the river currents in the form of non-poisonous ammonium, it is unlikely that they work as the only stimulus adapted for the attraction of these parasites. These suggestions have not been experimentally verified. Likewise, the anecdotes on the penetration of the hematophagus "candirú" into human orifices when attracted by urine have not been scientifically checked either. Experiments carried out on candirú behaviour in aquaria, together with *Carassius aureus* and *Cichlasoma auratus,* throw doubts on their preference for this fish species and on their reaction to attractive chemicals (aminoacids, ammonia, mucilaginous textile of fresh fish and human urine) when added to the aquarium. Instead, a visual interaction between parasite and host seems a more likely explanation for the parasitic attack (**Spotte, *et al*.,** 2001).

Conclusions

The crucial question for our study was to try to explore the adaptations that provide *P. phaneronema* with the ability to reach the nutritive source of the gills once it leaves its habitat on the muddy and sandy river beds using SEM images.

Some of the results of basic research on the lateral line sensory system and for osmoregulation in teleost freshwater fish have been useful in the discussion regarding the dynamics of the interrelation between parasite and host. A review of published studies on the structure and function of the neuromasts supported our hypothesis on the remote sensing of the host through mechanoreceptors (canal and superficial neuromasts) of the lateral line system and the skin. The opinion that the traces of nitrogenous waste products of the host are the attractants for the parasite seems uncertain in view of the papers published on osmoregulation and, therefore, it seems necessary to conduct new relevant investigations in this context.

According to the osmoregulation mechanisms of dilute urine, the ionic interchange at the gill epithelium, and the extrusion of nitrogen wastes as non-poisonous ammonium by fresh-water teleost fish, we question whether the attraction of the parasite responds merely to a chemical nature, as claimed by a variety of studies.

The SEM micrographs show details of the external structures of the species never before seen at such magnification and they verify the optimized adaptations for the parasitic way of life. Detailed analyses lead to the supposition that the geometrical arrangement of cephalic pores that connect the channels of the lateral line system with the surrounding aquatic environment are the key components of the sensory mechanical reception system.

Therefore, we suggest that in order to carry out the parasitic attack, *P. phaneronema* needs two neurosensory components. First, they utilise the canal neuromasts within the cephalic pores, as well as the superficial neuromasts on the skin for remote detection and subsequent tracking of the host. The second step is carried out on or near the host and consists of the location of the gills, the penetration of the gill camera, the incision of the arteries and the blood sucking, undoubtedly as a result of the cooperation, coordination, and synergy with other sensory organs.

Acknowledgments

We would like to express our deep gratitude to H. Bleckmann for the competent guidance and help in the field of the lateral line system and for the application of the neuromasts in the present study. We also wish to thank F. Herder for his comments on the manuscript that greatly improved this paper, as well as our great appreciation to B. Werding for his valuable and constructive suggestions during the development of this publication. We also thank Andrea Villalba for her help with typing and editing the figures, and to Thomas Defler for his help with the English revision and improvements to an earlier draft.

Authors' contributions

José Christian Díaz del Basto: Capture of the specimens, preparation of the samples, assistance in the taking of the microphotographs, and writing of the manuscript. José Iván Mojica: Writing of the manuscript. Hans-Werner Koyro: Preparation of the specimens for microphotography, intrepretation and analysis of the microphotographies, and review of the manuscript

Conflict of interest

None

References

Bleckmann, H. (1993). Role of the lateral line and fish behaviour. In: Pitcher T. J., ed. Behaviour of Teleost Fishes, 2nd ed. (pp 201-46). Chapman and Hall, London, New York, Tokyo.

Bleckmann, H. (1994). Reception of hydrodynamic stimuli in aquatic and semiaquatic animals. Progress in Zoology. Vol. **41.**

Bleckmann, H., Zelick, R. (2009). Lateral line system of fish. Integrative Zoology. **4** (1): 13-25.

Bleckmann, M., Erös, T., Schmit, A., Bleckmann, H. (2010). Number and distribution of superficial neuromasts in twelve common European Cypriniform fishes and their relationship to habitat occurrence. Internat. Rev. Hydrobiol. **95** (3): 273-284.

Dahl, G. (1971). Los peces del norte de Colombia. Ministerio de Agricultura. Instituto de los Recursos Naturales (INDERENA). Talleres de Litografía Arco. Bogotá D.C., Colombia. 285 p.

de Pinna, M. C. (1998). Phylogenetic relationships of Neotropical Siluriformes (Teleostei: Ostariophysi): historical overview and synthesis of hypotheses. In: Malabarba, L.R., Reis, R.E., Vari, R.P., Lucena, Z. M., Lucena, C.A. (Editors). Phylogeny and classification of Neotropical fishes. (p. 279-330). Porto Alegre: Edipucrs.

Díaz del Basto, J. (1970). Untersuchungen über die Fischfauna des Río Cesar. Ein Beitrag zur Tiergeographie Kolumbiens. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Justus-Liebig-Universität Gießen. Germany.

DoNascimiento, C., Herrera-Collazos, E., Herrera-R. G., Ortega-Lara, A., Villa-Navarro, F. A., Usma-Oviedo, J.S., Maldonado-Ocampo, J. A. (2017). Checklist of the freshwater fishes of Colombia: A Darwin Core alternative to the updating problem. ZooKeys. **708:** [1-114] 25-138.

Eisenback, J. (1985). Techniques for preparing nematodes for scanning electron microscopy. In: Barker, K., Carter, C., Sasser, J. (Editors). An advanced treatise on Meloidogyne. Volume 2: Methodology. (p. 79-105). North Carolina: State University Graphics.

Evans, D., Piermarini, P., Potts, W.T. (1999). Ionic transport in the fish gill epithelium. Journal of Experimental Zoology. **283:** 641-652.

Evans, D.H. (2008). Teleost fish osmoregulation: What have we learned since August Krogh, Homer Smith, and Ancel Keys. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. **295** (2): R704-R713.

Flock, A., Wersäll J. (1962). A study of the orientation of sensory hairs of the receptor cells in the lateral line organ of a fish with special reference to the function of the receptors. Journal of Cell Biology**. 15:** 19-27.

Gudger, E.W. (1930). The Candirú. The only vertebrate parasite of man. Ann Intern Med. **4** (4): 410-411.

Kelley, W. E., Atz, J. W. (1964). A pygidiid catfish that can suck blood from goldfish. Copeia. **4:** 702-704.

Keys, A. (1931). Chloride and water secretion and absorption by the gills of the eel. Zeit. Vergl. Physiol. **15:** 364-389.

Krogh, A. (1938). The active absorption of ions in some fresh-water animals. Zeit. Vergl. Physiol. **25:** 335-350.

Krogh, A. (1939). Osmotic Regulation in Aquatic Animals. Cambridge, MA. Cambridge University Press. 242 p.

Machado, F. A., Sazima, I. (1983). Comportamento alimentar do peixe hematófago, *Branchioica bertonii* (Siluriformes, Trichomycteridae). Ciência e Cultura. **35** (3): 343-348.

Maetz, J. (1971). Fish Gills: Mechanisms of Salt Transfer in Fresh Water and Sea Water. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. **262** (842): 209-249.

Maldonado-Ocampo, J.A., Ortega-Lara, A., Usma, J.S., Galvis, G., Villa-Navarro, F., Vásquez, L., Prada-Pedreros, S., Ardilla, R. (2005). Peces de los Andes de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Humboldt. Bogotá, D. C. Colombia. 346 p.

Miles, C. (1943). Peces de Agua Dulce del Valle del Cauca. Publicaciones de la Secretaría de Agricultura del Departamento del Valle del Cauca, Cali. 99 p.

Miles, C. (1947). Los Peces del Río Magdalena. Ministerio de Economía Nacional, Sección de Piscicultura, Pesca y Caza. Editorial El Gráfico, Bogotá. 214 p.

Montgomery, J.C., Baker, C.F., Carton, A.G. (1997). The lateral line can mediate rheotaxis in fish. Nature. **389** (9): 60-63.

Müller, H.M., Fleck A., Bleckmann, H. (1996). The responses of central octavolateralis cells to moving sources. Journal of Comparative Physiology. **179** (4):55-71.

Münz, H. (1985). Single unit activity in the peripheral lateral line system of the cichlid fish *Sarotherodon niloticus* L. Journal of Comparative Physiology A. **157** (5): 555-568.

Nikolsky, G. (1963). The Ecology of Fishes. Academic Press Inc. London.

Norman, J. R., (1966). Die Fische. Verlag Paul Parey. Berlin. 458 p.

Plachta, D., Hanke W., Bleckmann, H. (2003). A hydrodynamic topographic map and two hydrodynamic sub-systems in a vertebrate brain. Journal of Experimental Biology. **206:** 3479-3486.

Puzdrowski, R.L. (1989). Peripheral distribution and central projections of the lateral-line nerves in goldfish, *Carassius auratus*. Brain Behavior and Evolution. **34:** 110-31.

Román-Valencia, C. (1998). Redescripción de *Branchioica phaneronema* Miles (Pisces:Trichomycteridae) de la Cuenca del río Magdalena, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **17** (83): 299-303.

Schmitz, A., Bleckmann, H., Mogdans, J. (2008). Organization of the superficial neuromast system in goldfish, *Carassius auratus*. Journal of Morphology. **269:** 751-61.

Smith, H. (1932). Water regulation and its evolution in the fishes. The Quarterly Review of Biology. **7** (1): 1-26.

Spotte, S., Petry, P., Zuanon, J. (2001). Experiments on the Feeding Behavior of the *Hematophagous candiru*, Vandellia cf. plazaii. Environmental Biology of Fishes. **60** (4): 459-464.

Wilkie, M. P. (1997). Mechanisms of ammonia excretion across fish gills. Comp Biochem Physiol (A). **118A:** 39-50.

Wojtenek, W., Mogdans, J., Bleckmann, H. (1998). The responses of midbrain lateral line units of the goldfish *Carassius auratus* to moving objects. Zoology. **101:** 69-82.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):330-342, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

Original article

Natural Sciences

Sizes of the centric diatom *Actinocyclus normanii* as salinity function, a new tool for the assessment of paleoenvironments

Luis Alfonso Vidal[1,*], Luis Eduardo Castro[2], Javier Rodríguez-Barrios[3], María Isabel Vélez[4], Orlando Rangel[5]

[1] Grupo de Investigación en Ecología y Diversidad de Algas Marinas y Arrecifes de Coral, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia
[2] Grupo de Investigación en Biodiversidad y Ecología Aplicada (GIBEA), Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia
[3] Grupo de Investigación en Ecología Neotropical (GIEN), Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia
[4] Department of Geology, University of Regina, Regina, Canada
[5] Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Abstract

Two studies on the phytoplankton and the physical and chemical characteristics of the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) lagoon in the Colombian Caribbean, carried out in 1987 and 1995, found that salinity has been a key factor in the variation of the cell diameter of the diatom *Actinocyclus normanii*. Small cells are produced when salinity is low, while big ones are produced when salinity is higher. In turn, salinity variations are determined by precipitation: during the rainy season salinity decreases while it increases during the dry season. Small cells are produced by asexual reproduction during the rainy season. Bigger cells result from sexual reproduction and the production of auxospores, normally when salinity concentrations are above 8 PSU and up to 30 PSU. Bio-essays in the lab have confirmed that auxospores were not formed at 2.8 PSU salinity concentrations but they did at 10 and 20 PSU concentrations. To prove the use of cell diameter in paleoenvironmental reconstructions, 300 valves of *A. normanii* were measured in 15 diatom slides from a 6 m sedimentary core extracted from the lagoon in front of Sevilla River (río Frío) in October 2010. The core interval selected (5 to 265 cm) represents approximately the last 2,300 years before present (BP). Statistical analyses indicated that the diameter of 40 µm marked the division between small and bigger cells. Diameters under 40 µm indicated fresher water conditions, and those larger than these, more saline conditions. Due to the relationship between small and bigger cells of *A. normanii* and taking into consideration that they are part of the same life cycle of this species, forms and varietes *subsalsa* and *normanii* were not considered. We concluded that variations in the diameter of *A. normanii* were dependent on salinity concentrations. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: *Actnocyclus normanii* cell diameter; Salinity; Ciénaga Grande de Santa Marta; Biological indicator; Holocene environments.

Tamaños de la diatomea céntrica *Actinocyclus normanii* en función de la salinidad, una nueva herramienta aplicada a la interpretación de paleoambientes

Resumen

En estudios anuales sobre el fitoplancton realizados en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), costa caribe colombiana, en 1987 y 1995, en los que se hicieron análisis cualitativos y cuantitativos y se establecieron las relaciones con variables fisicoquímicas, entre ellas la salinidad, se concluyó que la variación del diámetro de *Actinocyclus normanii* está ligada a la variación de la salinidad del agua. Así, las células pequeñas se generan cuando la salinidad baja durante la estación lluviosa, y las grandes lo hacen cuando la salinidad se incrementa, durante la estación seca. Las células pequeñas y las grandes son el resultado de la reproducción asexual y sexual, respectivamente. Durante la reproducción asexual, *A. normanii* se divide profusamente y se generan las células pequeñas. Durante la reproducción sexual, se generan las auxosporas, que dan lugar a las células grandes. Las auxosporas no se generan por debajo de 8 USP, pero sí lo hacen por encima de este valor, hasta cerca de 30 USP. Se hicieron, también, bioensayos en el laboratorio con *A. normanii* para establecer su relación con la salinidad y se llegó a los mismos resultados hallados en el medio natural: las auxosporas no se generaron en una concentración salina de 2.8 USP, pero sí en concentraciones de 10 y 20 USP. Con el fin de probar la utilidad de la medición del diámetro de *A. normanii* en función de la salinidad como herramienta aplicada a la interpretación de paleoambientes, se midieron 300 valvas de *A. normanii* que se hallaban en 15 placas permanentes de diatomeas obtenidas a partir

***Corresponding autor:**
Luis Alfonso Vidal; lavidalve@yahoo.com; **Received:** July 31,2018, **Accepted:** November 13, 2018, **Editor:** Elizabeth Castañeda

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

de las muestras de sedimento de un núcleo de 6 m de profundidad en la desembocadura del río Sevilla (río Frío), en octubre de 2010. Para la prueba del método, se escogieron placas dentro de los primeros 265 cm del núcleo (ca. 2.300 años antes del presente [AP]). Con base en la definición de un diámetro de 40 µm en promedio como el punto de inflexión entre las células pequeñas de la especie y las grandes, se determinó que las pequeñas serían indicadoras del predominio de agua dulce y las grandes del predominio de agua marina. Debido a que las células pequeñas y grandes de *A. normanii* son generadas en el mismo ciclo de vida de esta especie, no se consideraron las formas o variedades *subsalsa y normanii*. Los resultados permiten concluir que *A. normanii* puede ser utilizado como indicador de la variabilidad salina de los cuerpos de agua. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Diámetro, *Actnocyclus normanii;* Salinidad; Ciénaga Grande de Santa Marta; Indicador biológico; Paleoambientes.

Introduction

Studies on the phytoplankton of the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) lagoon (Figure 1) conducted in 1987 and 1995 (**Vidal,** 1995, 1997, respectively), found that *Actinocyclus normanii* was the second most abundant species in the lagoon, both for its density and frequency. According to different authors, *A. normanii* has bigger cells and inhabits estuaries with greater marine influence (**Hustedt,** 1930; **Sinkeldam,** 1983; **Krammer & Lange-Bertalot,** 1991; **Rehbehn, *et al.*,** 1993; **Sims,** 1996; **Soler, *et al*.,** 2003; **Hermany, *et al*.,** 2013). In contrast, *A. normanii* fo. *subsalsa* is smaller and inhabits estuarine environments with greater influence of freshwater (**Hustedt,** 1930; **Holland & Claflin,** 1975; **Hasle,** 1977; **Sinkeldam,** 1983; **Gómez,** 1991; **Krammer & Lange-Bertalot,** 1991; **Stoermer, *et al*.,** 1992; **Bradbury & Krebs,** 1995; **Sims,** 1996; **Liukkonen, *et al.*,** 1997; **Medvedeva, *et al*.,** 2009; **Rebekah,** 2010; **Hermany, *et al*.,** 2013; **Witak,** 2013; **Anne, *et al*.,** 2015; **Vidakovic, *et al*.,** 2016). These field observations were followed by laboratory testing to examine the influence of several physical and chemical variables on *A. normanii* (**Vidal & Galán,** 1999).

In our study we make a case to demonstrate that variations in cell diameters of *A. normanii* (and, therefore, of the forms or varieties s*ubsalsa* and *normanii*), are dependent of salinity changes within the system, arguing that these forms or varieties are simply the result of natural changes in *A. normanii* caused by variations of salinity in the system. We then concluded that cell diameter variations of *A. normanii* are dependent on salinity and, thus it can be used as a proxy for salinity in the interpretation of paleoenvironments. This is the first time that the diameter of a centric diatom is used as

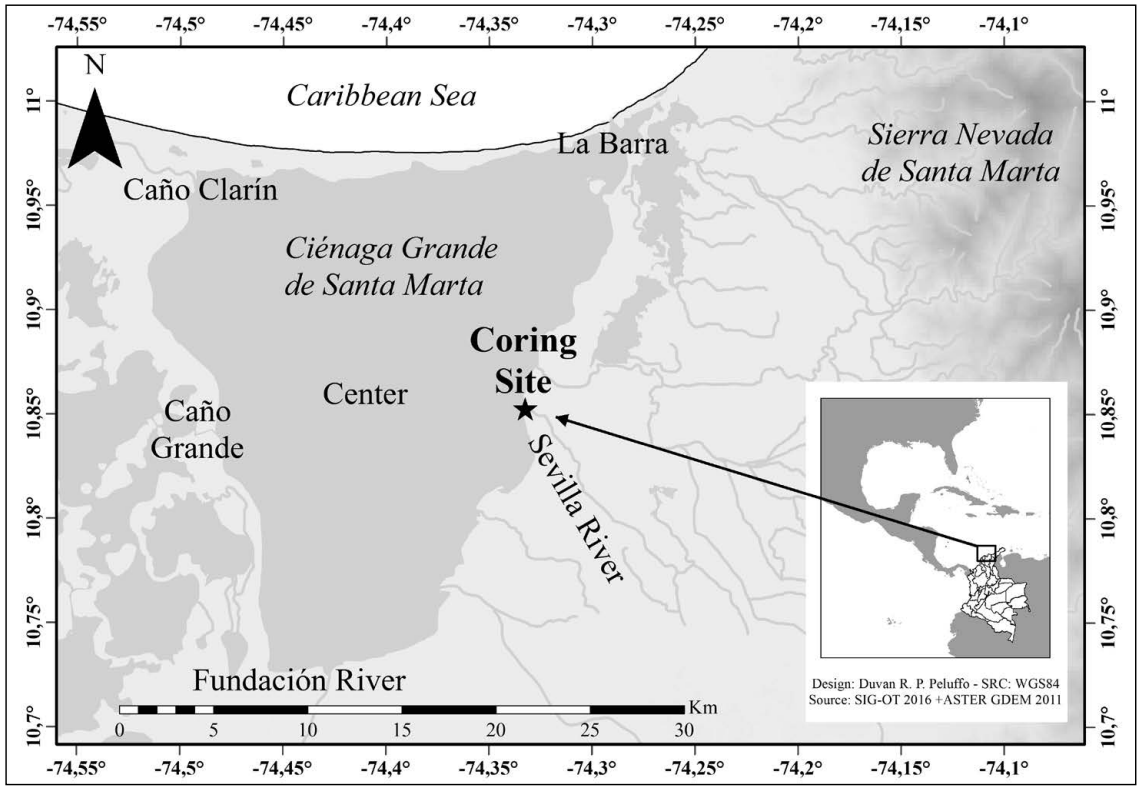


Figure 1. Map of the Ciénaga Grande de Santa Marta Lagoon

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):330-342, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

a proxy for the reconstruction of past salinity and, therefore, the reconstruction of paleoenvironments. We pro-posed that when small cells of *A. normanii* have prevailed over large cells, fresher water conditions predominated in the system and that when larger cells were more numerous than smaller ones, salinity was higher, i.e., the marine influ-ence was stronger over the system.

Study area

The Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) (Figure 1) is a lagoon located at 74º 16´, 74º 29´ W and 10º 44´, 10º 57´ N on the Caribbean Coast of Colombia. The lagoon is wider to the north, with an extensión of 450 km^2, and has an average depth of 1.7 m; it is part of the delta of the Magdalena River, the most important river in Colombia. The CGSM is separated by the ocean through a sand barrier, isla de Salamanca, with a 200-300 m opening on the east side that allows communication with the open ocean. The water depth at this site is 7-10 m. To the east, the lagoon is bounded by the floodplain of three main rivers that feed it and that originate in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). The SNSM is a 5000 m mountain with permanent ice caps. The three rivers are, from north to south, Sevilla (also known as río Frío, closer to the sand barrier), Aracataca and Fundación; these rivers reach the lagoon after crossing banana plantations. Together, these rivers contribute to with approximately 56 m^3 s^{-1} of freshwater. To the west, the lagoon is bound by a marsh complex, called Complejo Pajarales. Through the Complejo Pajarales and the Caño Clarín channel, the lagoon receives almost 163 m^3 s^{-1} of freshwater from the Magdalena River. The bottom of the lagoon is muddy, except for some sandy bottoms to the north. Mangrove forests grow around the lagoon; it is affected by a dry season, from February to May, characterized by the dominance of the Trade Winds, and a rainy season, from September to December, characterized by intense precipitation. Between these, there are two periods: one from June to August, with relatively low precipitation, known locally as Veranillo de San Juan, while the second one, from January to February, is a sort of transitional period between the rainy and dry seasons. The difference between the high and low tide in the lagoon is around 30 cm and the circulation is counter clockwise. Salinity ranges from 0 to 35 PSU in tandem with seasonal precipitation: during the dry season salinity is at its peak due to the greater influence of the ocean whereas during the rainy season salinity decreases even to 0. The Secci depth is 30 cm, but it has been recorded even at 70 cm. Solar insulation on the region (> 1700 µE m^{-2} s^{-1}) is the most intense in the entire country. Temperature ranges between 26 and 33 ºC with the highest ones occurring during the dry season. The population around the lagoon is clustered in five towns (Tasajera, Palmira, Isla Rosario, Pueblo Viejo y Trojas de Cataca), located mainly in the northeast and east of the lagoon, whose main economic activity is fishing (**Vidal,** 2010).

Materials and methods

Actinocyclus normanii (Gregory ex Greville) Hustedt 1957 ex Van Landingham, is a centric diatom that resembles a drum. Its frustule, in valve view, has a diameter of 8 to 90 µm and in connective view, a height of 18 to 32 µm. The valve face is generally flat, although sometimes it can be slightly convex or concave in the centre. A ring of rimoportulae is present on the mantle; these do not project to the exterior in a tube but seem like little holes around the mantle. Areolae (8-10/10 µm) have a hexagonal shape and are of poroid type (cribra outside and foramen into). Areolae form striae and striae form sectors. Usually, in the distant part of the sector there is one rimoportula. The valve is without a central rosette. In the intersection valve-mantle there is a pseudonodule, only observable under the Scannig Electron Microscope (SEM) (**Vidal,** 2010, partim). For a wider description of the species see **Kiss, *et al.*** (2012). *A. normanii* is classified in the Class Coscinodiscophyceae, Subclass Coscinodiscophycidae, Order Coscinodiscales, Family Hemidiscaceae (**Round, *et al.,*** 1990). *A. normanii* is cosmopolitan inhabiting mainly on the mouth of rivers and estuaries from the equator to the poles (Supplementary information, annex 1, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/713/3145).

Two field studies were carried out in the 1980s and 1990s. In the first study (**Vidal,** 1995) five stations were sampled on a bi-weekly basis. One station was located at the opening of the sand barrier, two close to the marsh complex on the west, one in the center of the lagoon, and another one in front of the mouth or Sevilla River (Figure 1). In the second study (**Vidal,** 1997), an additional sixth station close to the mouth of Fundación River was included and monitored bi-weekly as well (Figure 1). In the first study, carried out between February and December 1987, water samples were collected in a 1.8 m-long tube with a 12 cm diameter, which reached almost to the bottom of the lagoon (2 m). The tube was shaken to homogenize the sample and 1 liter was extracted for analysis. In the second study, carried out between March 1995 and February 1996, water samples were collected using a 1 L-Ruttner bottle. Samples were taken at 30 cm from the water surface and at 30 cm from the bottom. During the two studies, the density of auxospores was calculated (unpublished data) (Figure 2; Table 1).

Bioassays with *A. normanii* were carried out in the laboratory (**Vidal & Galán,** 1999) at salinities of 2.7, 10 and 20 PSU on culture medium (Guillard L1) and under constant conditions of temperature (22-24° C), light (30.97 µEins m^{-2} s^{-1}) and aeration. The culture medium was prepared with water from the lagoon filtered through a Whatman® GF/C microfiber glass filter. Salinity gradients were prepared from filtered seawater (UV filter system) diluted with water from the lagoon sampling station. The salinity of the sample taken in front of the mouth of Sevilla River was 2.7 PSU; the maximum concentrations of *A. normanii* during the

year of study were at 10 PSU (Figure 3); a moderately high salinity value within the range observed for the lagoon was 20 PSU.

In the second part of this work, we measured *A. normanii* cell diameters from 15 permanent plates prepared for a diatom count as part of a published paleoenvironmental reconstruction for the CGSM lagoon (**Vélez, *et al*.,** 2014). Each of these plates contained two aliquots of 0.6 ml prepared from specific depths within a sedimentary core extracted in the lagoon (Figure 1). The drilling site for the core was at the mouth of Sevilla River (also known as río Frío), on the eastern side of the lagoon. The code of the 15 samples indicates the core name (Bocas López –BL) followed by the core depth in cm: BL05, BL15, BL35, BL55, BL95, BL115, BL125, BL135, BL154, BL165, BL175, BL195, BL205, BL245, BL265. The age of the samples was recalculated from those presented in **Vélez, *et al.*** (2014). For the present study, ^{14}C dates were calibrated using the Bacon software (**Blaauw & Christiansen,** 2011). For observing and measuring the diameters of the valves, we used a Zeiss® Primo Star microscope coupled with a computer and equipped with the ZEN microscope software for light microscopy system Zeiss®. The core interval selected (5 to 265 cm) represents approximately the last 2,300 years before present (BP).

We measured the diameters of 300 *A. normanii* valves in each plate: 150 in one of the aliquots and 150 in the other one. If the valve was broken, but it had at least an edge and the center, it was counted; in these cases, the radius was measured and multiplied by two. With this data we constructed a 15-column matrix where each column corresponded to a sample (in the core) with 300 measurements of diameters, which were organized from the lowest to the highest value, while the samples were placed by seniority from left to right. Diameter values were given with a tenth of precision and the units were expressed in microns (µm). We counted the diameters below ≤40 µm and above >40 µm (Table 2). We made linear regression curves with the average of the diameters of each sample ordered from low to high and the number of cells whose diameters were under or above 40 µm (Figure 4). In our hypothesis, diameters with an average of ≤ 40 µm indicate a predominance of freshwater, whereas averages of > 40 µm diameters indicate a predominance of marine water.

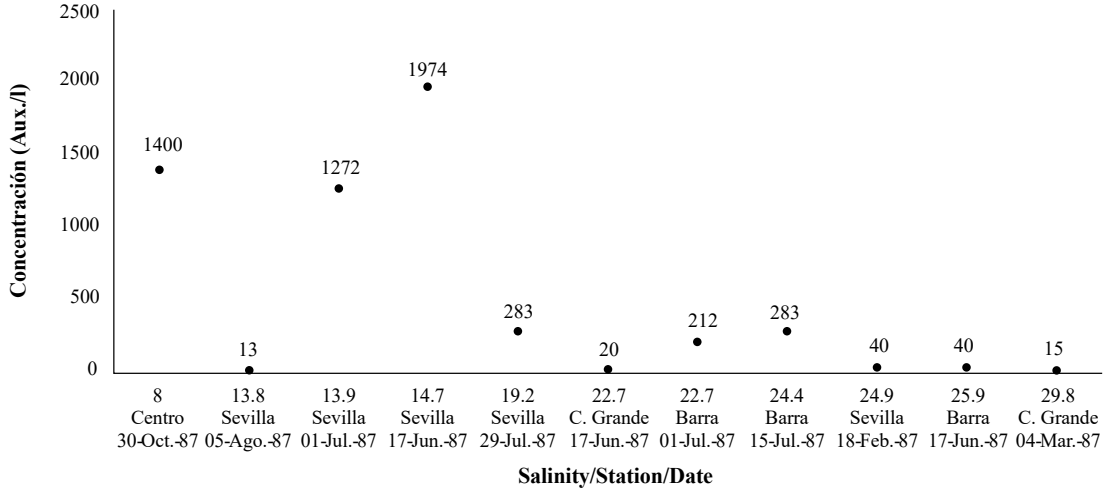


Figure 2. Auxospores formation (Aux/l) according to variation in salinity at different stations: Sevilla, Barra, Centro and Caño Grande in Ciénaga Grande de Santa Marta, 1987. Under 8 PSU, no auxospores were found.

Table 1. Concentration of auxospores of *Actinocyclus normanii* in different stations in CGSM. The collection dates are shown, the salinity measured in the station and the collection location, either in the water column or in the background.

Date	Stations	Sal (PSU)	Location	Cell/L
18 Feb 1987	Sevilla River mouth	24.9	Mix water column	40
17 Jun 1987	Sevilla River mouth	14.7	Mix water column	1974
30 Oct 1987	Swamp at the center	8.0	Mix water column	1400
30 Jan 1996	Fundación River mouth	14.8	Background*	5552
13 Feb 1996	Fundación River mouth	17.6	Background*	5552
13 Feb 1996	Swamp at the center	18.4	Background*	13570

* 30 cm from the bottom

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):330-342, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

For the sedimentation rates of *A. normanii* in the different samples, we estimated cell concentrations according to the following equation: Cells/ml = N/surface counted field (ml), where N corresponds to the number of cells counted. The concentrations of the different samples are shown in Table 3. The values of samples BL125 and BL115 were not considered because they were atypical (Table 3).

To evaluate the real differences between measured diameters, the following analyses were made: assumption of randomness of the residues (Durbin Watson test), homogeneity of variance (Bartlett's test) and normality of the ANOVA residues (Shapiro-Wilks test: SW). The assumptions of normality and homogeneity were not met, so all statistical analyses were based on non-parametric tests. The Kruskal-Wallis (K-W) non-parametric variance analysis was used to find differences in the variable defined as "diameter of *A. normanii*". The analysis of the power of the test and the required sample size to evaluate whether 300 data per column were enough, was made through the notation function (**Cohen,** 1988). To determine the 40 µm value in the matrix, i.e., to find the best possible partition of the groups of diameters in the measured cells, a K-Medias analysis was carried out (**Guisande, *et al.*,** 2011). The statistical program R version 2.3.2 (R Development Core Team 2016, available at www.r-project.org) was used for all the analyses. The results of the ANOVA analysis of variance are shown in Figure 4.

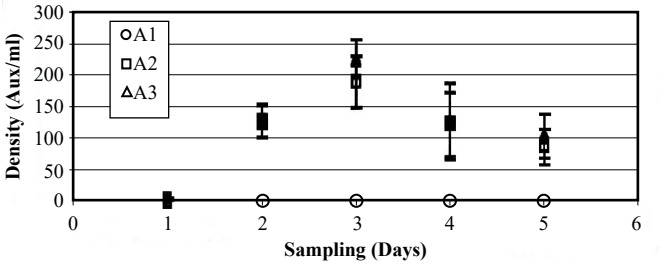


Figure 3. Generation of auxospores of *Actinocyclus normanii* (Aux/ml) at three concentrations of salinity: A1 = 2.7 PSU; A2 = 10 PSU; A3 = 20 PSU. The vertical bars correspond to the value of the standard error. The values (aux/ml) of the treatments A2 at 10 PSU (squares) and A3 at 20 PSU (triangles) during the days two and four are almost equal.

Reconstructions of the Late Holocene marine transgression were obtained from **Vélez, *et al.*** (2014), **Wiedemann** (1973), and **Van der Hammen & Noldus,** (1984). In addition, a study about the migration of the intertropical convergence zone (ITCZ) (**Haug, *et al.*,** 2001), was used to reconstruct changes in precipitation.

Results

Field observations showed that during the rainy season, when freshwater enters the lagoon decreasing salinity, *A. normanii* splits profusely through the mechanism of asexual reproduction generating a large number of cells (Figure 5). During the dry season, when the Trade Winds blow from the NE and marine water enters into the lagoon increasing salinity, *A. normanii* reproduces sexually, auxospores form (Figure 2), and cells reach their maximum size. Then, in the cell divisions that follow, large cells start to decrease in size and the cycle starts again.

We calculated the density of auxospores (unpublished data) (Figure 2; Table 1) and we observed that in February, during the dry season, when the Trade Winds still dominate and salinity is higher, there were 40 auxospores per liter. The lowest value of salinity at which auxospores formed was 8 PSU. Since the sample collected in the tube contained several water depths (the total water column was 1.8 m), the exact depth at which auxospores formed within the water column could not be established. The second study conducted in 1996 (**Vidal,** 1997) showed that auxospores were abundant at the bottom of the lagoon (unpublished data) (Table 1).

Bioassays with *A. normanii´*s auxospores carried out in the laboratory (**Vidal & Galán,** 1999) showed that at 2.7 PSU salinities auxospores did not form as they started to

Table 2. Summary matrix of the measurement of the diameter of 300 cells of *Actinocyclus normanii* in each sample. The averages of the diameters, the number of cells ≤ 40 µm and the number of cells >40 µm are noted.

Sample	BL265	BL245	BL205	BL195	BL175	BL165	BL145	BL135
# cells	300	300	300	300	300	300	300	300
mean	35.4	34.3	41.2	49.9	53.7	49.7	39.6	40.3
# cells≤40	207	225	129	58	46	49	138	147
# cells>40	93	75	171	242	254	251	162	153

Sample	BL125	BL115	BL95	BL55	BL35	BL15	BL05
# cells	300	300	300	300	300	300	300
mean	22.3	25.8	50.6	46.6	45.6	40.0	35.9
# cells≤40	269	240	53	98	105	161	204
# cells>40	31	60	247	202	195	139	96

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

form at 10 PSU (61 ± 14.4 auxospores ml^{-1} day^{-1}) and had an optimal formation at 20 PSU (75 ± 9.7 auxospores ml^{-1} day^{-1}) (Figure 3).

The regression analyses (Figure 4) indicated that valves under ≤ 40 µm (curve with circles) had a negative correlation with the number of cells: their number increased as their diameter decreases; conversely, the number of large cells above > 40 µm (curve with squares) decreased as their diameter decreased. Additionally, in the "freshwater predominance field", from a 40 µm average diameter downwards (to the left), the small cells of *A. normanii* were more numerous than the large cells. Similarly, in the "marine water predominance field", from a 40 µm average diameter upwards (to the right), large *A. normanii* cells were more numerous than small cells.

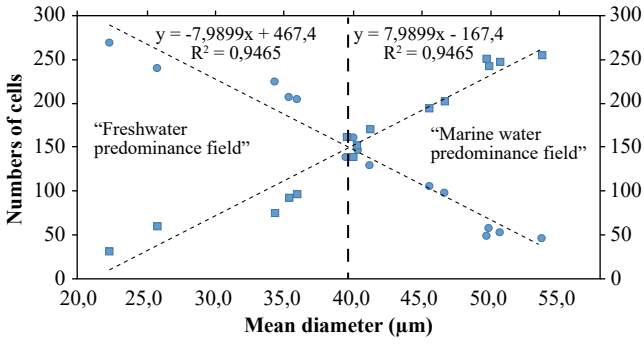


Figure 4. Lineal regression curves of mean diameters of *A. normanii* of each sample, ordered from low to high and counting the number of cells whose diameters were under or above 40 µm. The curve with the negative slope (circles) corresponds to small cells (≤ 40 µm) and the curve with the positive slope (squares) corresponds to large cells (> 40 µm). The 40 µm average diameter to the left is called "freshwater predominance field" and the 40 µm average diameter to the right is called "marine water predominance field". In the upper part, the equations of the regression curves with their R2 are shown.

Table 3. Concentrations of *Actinocyclus normanii* (cell / ml), in the different samples and their corresponding average diameters. The underlined data (25.8 and 22.3) correspond to apparently non-consecutive data within the table.

Samples	Average diameters	Cells/ml
245	34.3	223
205	41.2	721
265	35.3	1682
5	35.9	2318
145	39.6	3142
135	40.3	4499
15	40.0	5409
175	53.7	9031
115	**25.8**	**9720**
165	49.7	12397
55	48.2	13427
35	45.6	13513
195	49.8	13650
125	**22.3**	**19590**
95	50.6	25429

Figure 6 shows a general oscillatory tendency of cell diameters medians and averages in the samples. The bottom samples BL265 and BL245 (the oldest ones) were similar (Table 4) and fell below the line of 40 µm, i.e., they were located in the predominance of freshwater conditions. These samples are dated between 2,292- and 2,160-years BP. The next four samples, BL205, BL195, BL175, BL165, dated from 1,870 to 1,345 years BP, were statistically different (Table 4), and fell above the line of 40 µm, therefore, they were located in the predominance of marine water conditions. The average diameters of the following upper samples BL145 and BL135, dated between 1,058- and 912-years BP, were 39.5 µm and 40.3 µm, respectively, close to the line of division. The average diameters of these samples were statistically similar (Table 4). The following upper samples, BL125 and BL115, dated between 770- and 625-years BP, had the lowest and similar average diameters, 22.3 and 25.8 µm, respectively (Table 4) and were located in the predominance of freshwater conditions (lower marine influence). In the following interval, the average diameter values of BL95, BL55, and BL35 were similar (50.6, 46.6, 45.6) (Table 4) and fell in the predominance of the marine water conditions (marine transgression). These samples are dated older than 500 years BP (after 1550 AD). Finally, the uppermost samples BL15 and BL05 were different from each other (Table 4) and fell into the transition and fresher water predominance, respectively.

Discussion

The variation of the diameter of the cells of *A. normanii* in function of a salinity gradient is inherent to the life cycle of the species. It is through these gradients, sexual reproduction, and the formation of the auxospores that *A. normanii* increases its size 3 to 6 times (gametes transformed

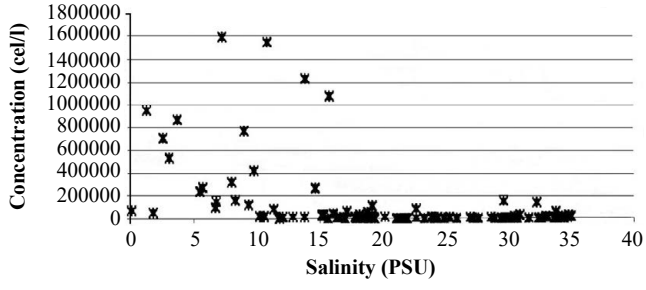


Figure 5. Concentration of *Actinocyclus normanii* (cell/l) according to salinity variations in CGSM during 1987

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):330-342, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

from small cells) in a few hours. That is to say that small and large cells are a product of the alternation between asexual and sexual reproduction. In this paper, we did not use the concepts of forms and varieties *subsalsa* and *normanii* for small and large cells. Instead, we centered the discussion regarding small and larger sizes as part of the same life cycle of *A. normanii as* reflected in the life cycle of centric diatoms (**Round, *et al*.,** 1990) in which large diatoms decrease in size until the formation of the gametes. After this, gametes fuse and auxospores are formed giving place to large cells, which decrease in size, closing again to complete the full cycle. In the light of the SEM, **Hasle** (1977) did not differentiate between the morphotypes. **Kiss, *et al*.,** (1990) suggest that the forms of this species do not have taxonomic value and that they should not be considered as separated taxa. The fact that auxospores were abundant at the bottom of the lagoon (Vidal, unpublished data) (Table 1) suggests that these migrate through the water column and accumulate at the bottom. It is possible that this journey along the water column facilitates the collection of nutrients (**Smetacek,** 1985; **Finkel, *et al*.,** 2005).

The formation of auxospores has been also observed in the lab for *Coscinodiscus granii* Gough when salinity increased to 900 and 950 mOsmol (ca.28-30 PSU) (**Schmid,** 1994), as well as for *C. wailesii* Gran & Angst, *Odonterlla regia* (Schultze) Simonsen, *O. sinensis* (Greville) Grunow,

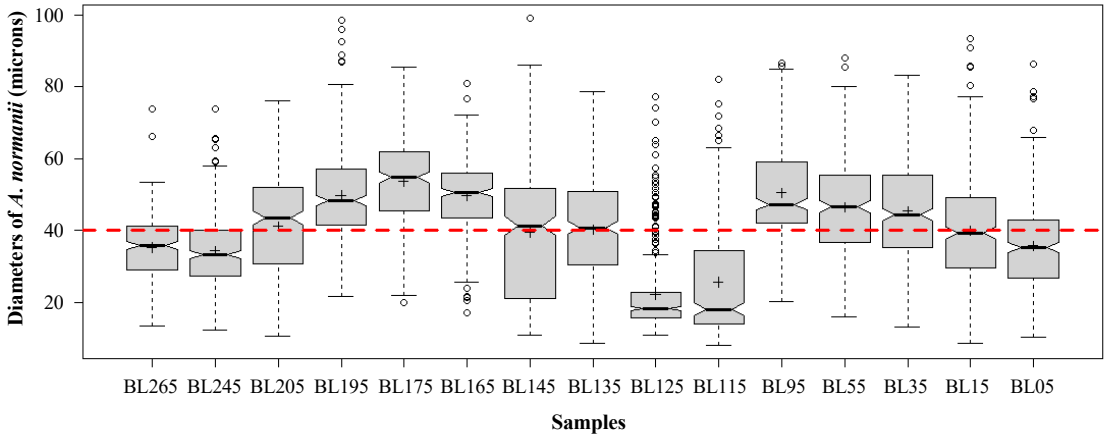


Figure 6. Mean diameters of the 300 cells or cell segments of *A. normanii* measured in the 15 samples (BL265 to BL05, codes of the 15 samples evaluated). The red line represents the boundary between large and small cells (40 µm). The boxes represent the interquartile range of the data and are divided by the value of the median (solid line) and the average (crossings) of the variable; the bounded lines correspond to the standard errors. Above the red line is the saline domain (marine influence) and below the red line is the fresher water domain (influence of freshwater).

Table 4. Non-parametric comparison of relative effects (REC), for the multiple comparison of differences between the different samples reviewed. Some samples are recorded, considered in the description of the results, where their significance is shown (value p <0.05, value p> 0.05)

Comparison	Estimator	Lower limit	Higher limit	REC Statistical	Significance	P value
BL265-BL245	0.546	0.466	0.624	1.93926304	$8.652444e^{-01}$	> 0.05
BL205-BL195	0.352	0.280	0.430	-6.32381333	$3.163598e^{-09}$	< 0.05
BL195-BL175	0.390	0.314	0.469	-4.64258701	$2.765145e^{-04}$	< 0.05
BL175-BL165	0.602	0.523	0.678	4.30963233	$1.387732e^{-03}$	< 0.05
BL165-BL145	0.688	0.611	0.758	7.9252446	$1.809664e^{-14}$	< 0.05
BL145-BL135	0.486	0.407	0.566	-0.58780704	$1e^{0}$	> 0.05
BL125-BL115	0.500	0.419	0.582	0.01140037	$1e^{0}$	> 0.05
BL95-BL55	0.572	0.492	0.694	3.04051252	$9.998887e^{-01}$	> 0.05
BL55-BL35	0.525	0.446	0.604	1.57604769	$1.383505e^{-01}$	> 0.05
BL15-BL05	0.585	0.505	0.661	3.59539831	$2.278667e^{-02}$	< 0.05
BL265-BL05	0.508	0.428	0.588	0.33096762	1e0	> 0.05
BL245-BL05	0.473	0.395	0.552	-1.11640642	$9.998069e^{-01}$	> 0.05

Cyclotella meneghiniana Kützing, and *C. cryptica* Reimann (**Schultz & Trainor,** 1968, 1970). For the first four species, it seems that the key factor for the formation of the auxospore is related to the light intensity and the specific salt ions, possibly Na^+ (**Schmid,** 1994). For the last two species, sexual reproduction seems to be related with the increase in the concentration of Na^+ (**Schultz & Trainor,** 1968, 1970) and would indicate that salinity is a key variable in the formation of the auxospores of several centric brackish diatom species.

Samples BL265 and BL 245 had diameters under 40 µm (Figure 6) which indicates fresh water conditions. **Cohen & Wiedemann** (1973) found remains of the marine indicator *Rhizophora mangle* 2 km north of the coring site (**Vélez, *et al*.,** 2014) at a 200 cm depth. At this depth and at 4 km south of the coring site, **Cohen & Wiedemann** (1973) found *Laguncularia recemosa* and the fern *Acrosticum aureum*, both indicators of freshwater conditions. North and south of the present study coring site, **Wiedemann** (1973) dated the 200 cm sample depth from a core extracted very close to the point reported by **Cohen & Widemann** (1973), at ^{14}C, 2300 ± 65 años BP and 1920 ± 65 años BP, respectively. These prior works indicate that samples BL265 and BL245 were not exposed to marine conditions.

In Cienaga Caimanera (Sucre, Colombia) on the Colombian Caribbean coast, southwest of the CGSM, a palynological record shows that by 2,100 years BP freshwater vegetation composed by forest and other plants inhabited the flood-plains, surrounded Caimanera (**Beltrán,** 2015).

Actinocyclus normanii cells from BL205 to BL165 samples have diameters above the limit of 40 µm, which indicates that a transgression was already affecting the lagoon by 1,870 years BP (**Van der Hammen & Noldus,** 1984; **Vélez, *et al*.,** 2014). Then, a transition state has been identified from 1,058 to 912 years BP (samples BL145 and BL135) as indicated by average cell diameters of 40 µm. Transition states are probably the result of a series of rapid salinity changes.

The period from 770 BP to 625 years BP (1240 AD to 1385 AD) (samples BL125 and BL115) is difficult to interpret as these samples had the smallest cell diameters (25.8 µm and 22.3 µm, respectively), extremely high concentrations (9720 and 19590 cell/ml, respectively), and do not fit into the upward condition of the second column (Table 3). It is possible that the period from 1240 to 1385 AD (ca. 140 years) could have been punctuated by short and frequent periods of drought. Alternatively, the lagoon became isolated from the Caribbean, perhaps as a result of the formation of a sandbar that transformed the estuary into a coastal lagoon or a marsh with very sporadic inputs of freshwater and even smaller inputs of seawater. The predominance of *A. normanii* small cells over large ones in these samples (Table 2, Figure 4) and the high cell concentrations (Table 3) might be a sign of a limited possibility of cells to form auxospores and large cells probably as a result of a long-lasting period of very low salinity. Palynological and petrographic analyses (**Wiedemann,** 1973; **Cohen & Wiedemann,** 1973; **Van der Hammen & Noldus,** 1984) were used to contrast our findings. From **Velez, *et al.*** (2014), it is clear that the percentage of freshwater diatoms was low for samples BL125 and BL115 (Figure 7), but samples BL195, BL185, BL175 and BL165 with a low percentage of freshwater diatoms too, presented a high concentration of diatoms living in environments with marine water predominance (**Vélez, *et al*.,** 2014). It is possible, then, that very low salinity conditions prevailed in the CGSM between 770 BP to 625 years BP.

Samples BL95, BL55, and BL35, dated from the last 490 years BP, correspond with the "Little Ice Age" (LIA), a very cold and dry period (**Van der Hammen,** 1984, p. 571-572; **Haug, *et al*.,** 2001, p. 1307), and fall in the marine water predominance field. Sample BL15 is interpreted to represent a state of transition between marine and freshwater conditions and corresponds to the end of the LIA. Negative oscillations in titanium (Ti) concentrations in the Cariaco record suggest that during the LIA short dry periods prevailed (**Haug, *et al*.,** 2001). The

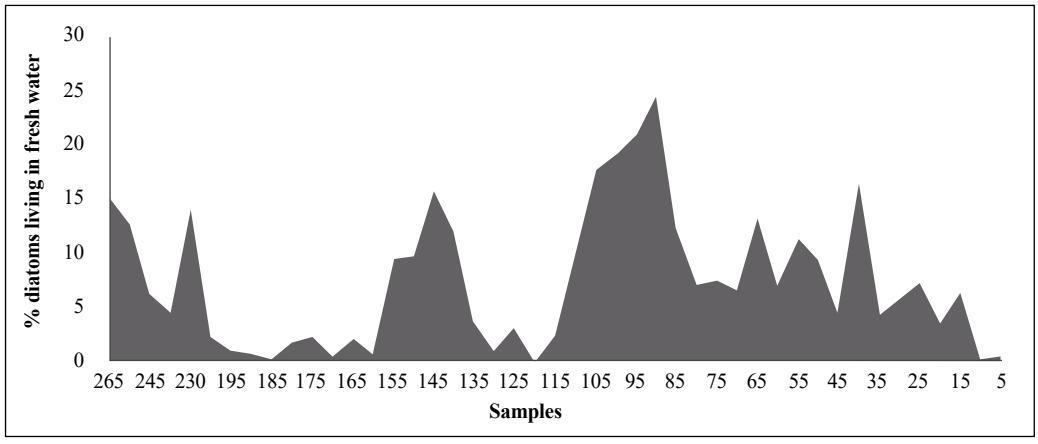


Figure 7. Percentage of diatoms that live in freshwater in different samples from BL265 (adapted from **Vélez, *et al*.**, 2014)

most outstanding recent oscillations in Ti from the Cariaco record occurred in 1590 AD, 1630 AD, 1650 AD, 1700 AD, 1730 AD, and 1840 AD. This last date is close to the date of the BL15 sample (approximately 170 years BP). In 1850 (termination of the LIA) the city of Santa Marta, close to the lagoon, was flooded by an overflow of the Manzanares River that even led to a large part of the population leaving the city (*Opinión Caribe* journal, January 18-24, 2017, p. 12). It could be postulated that the overflow of the Manzanares River was caused by meltwater of the ice accumulated in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) during the LIA. It is expected that the rivers on the western side of the SNSM that carry their waters to the lagoon have suffered the same phenomenon of increased flow. The sample BL05 falls in the freshwater predominance field and could correspond to the 1950s (1950, 1955, 1956). In those years the water levels in the Low Magdalena River were among the highest in 30 years (between 1941 and 1970), with values of 6.27, 6.27 and 6.36 m, respectively (**Kaufmann & Hevert,** 1973).

The fact that small cells of *A. normanii* (<40 µm) are more numerous than large cells (>40 um) of the same species when freshwater conditions prevail and, similarly, that large cells of the same species are more numerous than small cells in the marine water predominance field (Figure 4) test our hypotheses.

It is interesting to note that the point of inflection between small and large cells (40 µm) corresponds to the maximum size of *A. normanii* var. *subsalsa* (Juhlin-Dannfelt) Hustedt (**Hustedt,** 1930, as *Coscinodiscus rothii* var. *subsalsa*), which identifies the small cells of *A. normanii*.

It is worth noting that the smallest diameters (ca. 8 µm) of *A. normanii* obtained during this study were smaller than the smaller diameters found in the articles consulted (13 µm and 16 µm) (**Kiss, *et al.*,** 2012; **Krammer & Lange-Bertalot,** 1991; **Hasle & Syvertsen,** 1996). The number of areolas per 10 µm of the smallest cells of *A. normanii* falls within the range reported for the species (6-8 areolas/10 µm) (**Hustedt,** 1930). The maximum diameters measured in this study (99.1 µm) were below the biggest value reported for the species: 110 µm (**Hustedt,** 1930; **Krammer & Lange-Bertalot,** 1991; **Hasle & Syvertsen,** 1996) and 113 µm, registered for the Adélie Land in the Antarctic, (**Manguin,** 1960).

The method described here, based on the *A. normanii* cells average diameter and related to salinity should be explored further and be considered as a complementary proxy for salinity.

Conclusions

Variations in the diameter of *A. normanii* frustules depend on the variation of salinity in the system. When the salinity in the system is falling due to the precipitation, *A. normanii* reproduces asexually producing small cells with diameters of ≤ 40 µm. When the salinity is rising during the dry season and exceeds a value of 8 PSU and increases up to 30 PSU, *A. normanii* reproduces sexually and generates auxospores and, thus, cell diameters are greater than >40 µm.

Fossil assemblages with *A. normanii* cells of ≤ 40 µm predominating over larger cells of >40 µm suggest the prevalence of fresher conditions. Conversely, when large cells of *A. normanii* are more abundant that small cells, it can be concluded that more marine conditions prevailed at that time.

Supplemental materials

Supplementary information, annex 1. *Actinicyclus normanii* global distribution. Species name as it appears in the literature. It is indicated if the sample was collected in water column or in sediment. See annex 1 in https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/713/3145

Acknowledgements

The authors are grateful to Dr. Rocío García, director of the research group "Ecology and Diversity of Marine Algae and Coral Reefs" at *Universidad del Magdalena* for facilitating room in her laboratory and the microscope equipment to carry out this work. Likewise, they thank Mr. Duvan Peluffo who prepared the map of the CGSM for this work. The Inter-American Institute for Global Change Research (IAI Grant No. CRN3038, the US Natural Science Foundation (Grant GEO-1128040) provided funds to M. Velez

Authors' contribution

Luis Alfonso Vidal created the original idea, led the laboratory and field work, and wrote the text. Luis Eduardo Castro assisted laboratory work and manuscript production. Javier Rodríguez produced statistical analysis and data interpretation. María I. Vélez provided fossil material, supported manuscript production and discussion of data, and translated the article into English. Orlando Rangel facilitated core collection and radiocarbon dating.

Conflicts of interest

The authors have not declared any conflict of interests.

References

Afonso-Carrillo, J. (2014). Lista actualizada de las algas marinas de las islas Canarias. Elaborada para la Sociedad Española de Ficología (SEF), Las Palmas. p. 1-64.

Anne, O., Bugajev, D., Koreiviene, J. (2015). Determining Optimal Growth Conditions for the Highest Biomass Microalgae Species in Lithuanian Part of the Curonian Lagoon for further Cultivation. Int. J. Environ. Res. **9** (1): 233-246.

Ávila, G. (1971). Variación de grupos planctónicos presentes en la C.G.S.M. durante el período comprendido entre Dic.1969 a Mayo 1971. Bol. Inf. I. **6:** 31-65.

Ávila, G. (1972). Variación de grupos planctónicos presentes en la C.G.S.M. (Junio 1971-Mayo 1972). Divulgación Pesquera. Inderena. **12:** 4-5.

Belcher, J. H., Swale, E. M. F. (1979). English freshwater records of *Actinocyclus normanii* (Greg.) Hustedt (Bacillariophyceae). Br. Phycol. J. **14** (3): 225-229.

Beltrán, J.D. (2015). Historia de la vegetación, el clima y los paleo ambientes presentes en la Ciénaga de La Caimanera durante los últimos 6000 años. (Departamento de Sucre – Colombia). Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología. Instituto de Ciencias Naturales. 70 p.

Blaauw, M., Christiansen, J.A. (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. Bayesian Anal. **6** (3): 457–474. Accessed on June 2018. https://doi.org/10.1214/11-BA618

Botero, L. (1988). Estudio ecológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Editor. Invemar. Inf. Proy. **12:** 47 pp.

Bradbury, J. P., Krebs, W. N. (1995). The diatom genus *Actinocyclus* in the western United States. U.S Geological Survey Professional Paper (N° 1543A-B).

Cardozo, A. Y. V., Gomes, D. F., Da Silva, E. M., Duque, S. R. E., Rangel, J. C., Sifeddine, A., Albuquerque, A. L. S. (2014). Holocene paleolimnological reconstruction of a high altitude Colombian tropical lake. Palaeo3. **415:** 127-136.

Carmona, G. E. (1979). Contribuciones al conocimiento de la ecología del plancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Biol. Univ. Antioquia, 80 p.

Choudhury, A. K., Pal, R. (2010). Phytoplankton and nutrient dynamics of shallow coastal stations at Bay of Bengal, Eastern Indian coast. Aquat. Ecol. **44** (1): 55-71.

Clarke, K. B. (1992). Centric diatoms in the Norfolk Broads. Microscopy. **36:** 692-702.

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd. edn. Erlbaum, Hillsdale, NJ. Rev. Edn., Erlbaum, Hillsdale, NJ. 2e, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Cohen, A. D., Wiedemann, H. U. (1973). Distribution and depositional history of some pre-lagoonal Holocene sediments in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas. **7:** 139-154.

De Melo-Magalhaes, E. M., Koening, M. L. Sant'Anna, C. L. (2004). Fitoplancton e variaveis ambientais nos canais do sistema estuarino lagunar Mundali/Manguaba, Alagoas, Brasil. Hoehnea. **31** (1): 73-86

Devercelli, M., O'Farrell, I. (2013). Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters. **43** (2): 67-78.

Ector, L., Wetzel, C. E., Novais, M. H., Guillard, D. (2015). Atlas des diatomées des rivières des Pays de la Loire et de la Bretagne. Nantes: DREAL Pays de la Loire. 649 pp.

Finkel, Z. V., Katz, M. E., Wright, J. D., Schofield, O. M., Falkowski, P. G. (2005). Climatically driven macroevolutionary patterns in the size of marine diatoms over the Cenozoic. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **102** (25): 8927-8932.

Florin, M. B. (1970). The late glacial diatoms of Kirchner Marsh southeastern Minnesota. Nova hedwigia. Beihefte. H. **31:** 667-755

Fluin, J., Tibby, J., Gell, P. (2010). The palaeolimnological record from Lake Cullulleraine, lower Murray River (south-east Australia): Implications for understanding riverine histories. J. Paleolimnol. **43** (2): 309-322.

García-Rodríguez, F., Anderson, C. R., Adams, J. B. (2007). Paleolimnological assessment of human impacts on an urban South African lake. J. Paleolimnol. **38** (3): 297-308.

García-Rodríguez, F., Puerto, L. D., Venturini, N., Pita, A. L., Brugnoli, E., Burone, L., Muñiz, P. (2011). Diatoms, protein and carbohydrate sediment content as proxies for coastal eutrophication in Montevideo, Río de la Plata Estuary, Uruguay. Brazilian Journal of Oceanography. **59** (4): 293-310.

Gell, P., Mills, K., Grundell, R. (2013). A legacy of climate and catchment change: The real challenge for wetland management. Hydrobiologia. **708** (1): 133-144.

Genkal, S. I., Terenko, L. M., Nesterova, D. A. (2009). New data on the centric diatoms (Centrophyceae, Bacillariophyta) of the Danube region of the Black Sea. Hydrobiological Journal. **45** (6): 51-69

Gómez, N. (1984). Presencia de *Actinocyclus normanii* f. *subsalsa* (Juhl.-Dannf.) Hustedt 1957 (Bacillariophyceae) en aguas Mediterraneas Argentinas. Limnobios. **2** (8): 579-580.

Gómez, N. (1991). Poblaciones de diatomeas planctónicas en una represa subtropical: Embalse Río lll, Argentina. Annl. Limnol. **27** (1): 3-14.

Gómez, N., Licursi, M. (2003). Abnormal forms in *Pinnularia gibba* (Bacillariophyceae) in a polluted lowland stream from Argentina. Nova Hedwigia. **77** (3-4): 389-398.

Guisande C., C. Vaamonde y A. Berrío, (2011). Tratamiento de datos con R, STATISTICA y SPSS. Días de Santos. 978 pp.

Hagelstein, R. (1938). The diatomaceae of Porto Rico and the Virgin Islands. Scientific Survey of Porto Rico and the Virgin Islands. **8** (3): 313-450

Hasle, G. R. (1977). Morphology and taxonomy of *Actinocyclus normanii* f. *subsalsa* (Bacillariophyceae). Phycologia. **16** (3): 321-328.

Hasle, G. R., Syvertsen E. E. (1996). Marine Diatoms. In: Tomas, C. R. Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates. Acad. Press, 385pp.

Hašler, P., Hindak, F., Hindakova, A. (2007). Phytoplankton of the Morava and Dyje Rivers in spring and summer 2006. Fottea, Olomouc. **7** (1): 49-68.

Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., Röhl, U. (2001). Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. Science. **293** (5533): 1304-1308.

Hendey, N. I. (1964). Bacillariophyceae (diatoms). An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. Fisheries Investigations (Series IV) London. Part. V. 317 pp.

Hermany, G., Souza, P. A., Torgan, l. C. (2013). Paleoecologia do sistema Pinguela-Palmital-Malvas, Holoceno da Bacia de Pelotas, RS, Brasil: uma abordagem focada na utilização de análises multivariadas para obtenção de diatomáceas descritoras. Pesquisas em Geociências. **40** (1): 31-49.

Heynig, H. (1992). Beitrag zur Kenntnis des Planktons in Gewässern des Parks Branitz bei Cottbus (Deutschland, Niederlausitz). Limnologica. **22** (2): 151-163.

Holland, R.E., Claflin, L.W. (1975). Horizontal distribution of planktonic diatoms in Green Bay, mid-July 1970. Limnol. Oceanogr. **20:** 365-378.

Hustedt, F. (1930). Die Kieselalgen Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz unter Berucksichtigung der Ubrigen Lander Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete. Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreichs und der Schweiz. 920 pp.

Hustedt, F. (1956). Diatomeen aus dem Lago de Maracaibo in Venezuela. Gessener, Ergebnisse der deutchen limnologischen Venezuela-Expedition. **1:** 93-140.

Jaraula, C. M. B., Siringan, F. P., Klingel, R., Sato, H., Yokoyama, Y. (2014). Records and causes of Holocene salinity shifts in Laguna de Bay, Philippines. Quaternary International. **349:** 207-220.

John, J. (1983). The diatom flora of the Swan River estuary Western Australia. Bibliotheca phycologica. **64:** 359.

Kaufmann, R., Hevert, F. (1973). El régimen fluviométrico del Río Magdalena y su importancia para la Ciénaga Grande de Santa Marta. Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas. **7:** 121-137.

Kiss, K. T., Le Cohu, R., Coste, M., Genkal, S. I., Houk, V. (1990). *Actinocyclus normanii* (Bacillariophyceae), in some rivers and lakes in Europe. Morphological examinations and quantitative relations. Ouvrage dedié a la Memoire du Professeur Henry Germain (1903-1989), Koeltz Scientific, Koenigstein. p. 111-123.

Kiss, K., Klee, R., Ector, L., Ács, E. (2012). Centric diatoms of large rivers and tributaries in Hungary: morphology and biogeographic distribution. Acta Bot. Croat. **71** (2): 311-363.

Kitaba, I., Harada, M., Hyodo, M., Katoh, S., Sato, H., Matsushita, M. (2011). MIS 21 and the Mid-Pleistocene climate transition: Climate and sea-level variation from a sediment core in Osaka Bay, Japan. Palaeo3. **299** (1-2): 227-239.

Korneva, L. G. (2003). On the distribution patterns and dispersal of *Actinocyclus normanii* (Greg.) Hust. emend. Genkal et Korneva (Bacillariophyta) in the reservoirs of the Volga River Basin. International Journal on Algae. **5** (1).

Korneva, L. G. (2014). Invasions of alien species of planktonic microalgae into the fresh waters of Holarctic. Russian journal of biological invasions. **5** (2): 65-81.

Krammer, K., Lange-Bertalot, H. (1991). Bacillariophyceae3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In Pascher's Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/3, 598 pp.

Kucklick, M. (1987). Biomasa del fitoplancton y contenido del seston en un estuario de manglar (Ciénaga Grande de Santa Marta) (Doctoral dissertation, Tesis (Ph. D) Universitat Stuttgart-Hohenheim. Botanishes institut. Stuttgart, Alemania). 315 pp.

Lee, J. H., J. Chung., Gotoh, T. (1994). Diatoms of the Kwang River (Kwangchun), South Korea. I. Centrales, Pennales except Naviculaceae. Diatoms. **9:** 17-27.

Licursi, M., Gómez, N. (2003). Aplicación de índices bióticos en la evaluación de la calidad del agua en sistemas lóticos de la Llanura Pampeana Argentina a partir del empleo de diatomeas. Biol. Acuat. **21:** 31-49.

Liukkonen, M., Kairesalo, T., Haworth, E. Y. (1997). Changes in the diatom community, including the appearance of *Actinocyclus normanii* f. *subsalsa*, during the biomanipulation of Lake Vesijärvi, Finland. Eur. J. Phycol. **32** (4): 353-361.

Lozano-Duque, Y., Vidal, L. A., Navas, G. R. (2010). Listado de diatomeas (Bacillariophyta) registradas para el Mar Caribe colombiano. Bol. Invest. Mar. Cost. **39** (1): 83-116.

Ludwig, T. A., Flores, T. L., Moreira Filho, H., Veiga, L. A. S. (2004). Inventário florístico das diatomáceas (ochrophyta) de lagoas do sistema hidrológico do Taim, Rio Grande do Sul, Brasil: Coscinodiscophyceae. Iheringia. Sér. Bot. **59** (1): 97-106.

Manguin, E. (1960). Les Diatomées de la Terre Adélie. Campagne du "Commandant Charcot" 1949-1950. Ann. Sci. Nat. Bot. Ser. 12 **1** (2): 223 -364.

Marshall, H. G., Lacouture, R. V., Buchanan, C., Johnson, J. M. (2006). Phytoplankton assemblages associated with water quality and salinity regions in Chesapeake Bay, USA. Estuar. Coast. Shelf Sci. **69** (1): 10-18.

Medvedeva, L., Nikulina, T., Genkal, S. (2009). Centric diatoms (Coscinodiscophyceae) of fresh and brackish water bodies of the southern part of the Russian Far East. Oceanol. Hydrobiol. St. **38** (2): 139-164.

Mialet, B., Gouzou, J., Azémar, F., Maris, T., Sossou, C., Toumi, N., Tackx, M. (2011). Response of zooplankton to improving water quality in the Scheldt estuary (Belgium). Estuar. Coast. Shelf Sci. **93** (1): 47-57.

Montoya-Moreno, Y., Sala, S., Vouilloud, A., Aguirre, N., Plata-Díaz, Y. (2013). Lista de las diatomeas de ambientes continentales de Colombia. Biota Colombiana. **14** (2): 13-78.

Morales, E. A. (2002). Studies in selected fragilarioid diatoms of potential indicator value from Florida (USA) with notes on the genus Opephora Petit (Bacillariophyceae). Limnologica. **32** (2): 102-113.

Navarro, J. N., Hernández-Becerril, D. U. (1997). Check-list of marine diatoms from the Caribbean Sea. Universidad Autónoma de México. México D.F. 48pp

Naya, T., Tanimura, Y., Nakazato, R., Amano, K. (2007). Modern distribution of diatoms in the surface sediments of Lake Kitaura, central Japan. Diatom. **23:** 55-70.

Pankow, H. (1976). Algenflora der Ostesee II. Plankton: (einschl. benthischerkieselalgen). Gustav Fisher Verlag. 493 pp.

Pérez, M. D. C., Maidana, N. I., Comas, A. (2009). Phytoplankton composition of the Ebro River estuary, Spain. Acta Bot. Croat. **68** (1): 11-27.

Procopiak, L. K., Fernandes, L. F., Moreira-Filho, H. (2006). Diatomáceas (Bacillariophyta) marinhas e estuarinas do Paraná, Sul do Brasil: lista de espécies com ênfase em espécies nocivas. Biota Neotrop. **6** (3): 1-28.

R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Accessed in May 2017. https://www.R-project.org/

Rashid, T., Suzuki, S., Sato, H., Monsur, M. H. Saha, S. K. (2013). Relative sea level changes during the Holocene in Bangladesh. J. Asian Earth Sci. **64:** 136-150.

Rebekah M. K. (2010). *Actinocyclus normanii* fo. *subsalsa*. USGS Non indigenous Aquatic Species Database, Gainesville, FL. Accessed in June 2018. http://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.aspx?speciesID=1695

Rehbehn, R., Schuchardt, B., Schirmer, M., Kirst, G. O. (1993). The distribution of *Actinocyclus normanii* (Bacillariophyceae) in estuaries: Field observations and laboratory investigations. Neth. J. Aquatic Ecol. **27** (2): 205-214.

Ribeiro, F. C. P., do Socorro Fernandes de Senna, C., Torgan, L. C. (2008). Diatomáceas em sedimentos superficiais na planície de maré da praia de Itupanema, estado do Pará, Amazônia. Rodriguésia. **59** (2): 309-324.

Round, F. E., Crawford, R. M., Mann, D. G. (1990). Diatoms: Biology and morphology of the genera. Cambridge University Press. 747 pp.

Ruiz, D. (1999). Variación cualitativa y cuantitativa del fitoplancton en ciénagas del delta exterior oriental del río Magdalena y su relación con la reapertura del canal El Clarín. Trabajo de grado Biol. Mar., Univ. Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta.

Sabater, S., Muñoz, I. (1990). Successional dynamics of the phytoplankton in the lower part of the river Ebro. J. Plankton Res. **12** (3): 573-592.

Sánchez, G. E., Morales, E., Guillot, G., Vidal, L. A. (2003). Respuesta de la diatomea *Actinocyclus normanii* Hustedt, a las variaciones en la densidad celular inicial, concentración de salinidad, silicato y fosfato en condiciones de laboratorio. Bol. Invest. Mar. Cost. **32** (1): 169-181.

Santos-Fischer, C.B., Corrêa, I.C.S., Weschenfelder, J., Torgan, L.C., Stone, J.R. (2016). Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. Palaeo3. **446:** 108-124.

Saunders, R. P., Glenn, D. A. (1969). Diatoms: Memoirs of the Hourglass Cruises. Tech. Ser. Fla. Dep. Nat. Resour. Mar. Res. Lab. **1:** 1-119.

Schmid, A.M. (1994). Sexual reproduction in *Coscinodiscus granii* Gough in culture: A preliminary report. 13th International Diatom Symposium. p. 139-159.

Schuchardt, B., Schirmer, M. (1991). Phytoplankton maxima in the tidal freshwater reaches of two coastal plain estuaries. Estuar. Coast. Shelf Sci. **32** (2): 187-206.

Schultz, M.E., Trainor, R.R. (1968). Production of male gametes and auxospores in the centric diatoms *Cyclotella meneghiniana* and *C. cryptica*. J. Phycol. **4:** 85-88.

Schultz, M.E., Trainor, R.R. (1970). Production of male gametes and auxospores in a polymorphic clone of the centric diatom *Cyclotella*. Canad. J. Bot. **48:** 947-951.

Shin, S. (Ed.). (2010). Algal Flora of Korea. Chrysophyta: Bacillariophyceae: Centrales. Freshwater Diatoms I. Nat. Inst. Biol. Res. Min. Env. **3** (1): 172 pp.

Sims, P.A. (Ed.). (1996). An atlas of British diatoms. Biopress Limeted. Dorchester. 601 pp.

Sinkeldam, J. A. (1983). Het plankton van de Maarsseveense Plassen, 1978. RIN-rapport 83/1 103pp

Smetacek, V. S. (1985). Role of sinking in diatom life-history cycles: Ecological, evolutionary and geological significance. Mar. Biol. **84** (3): 239-251.

Soler, A. B., Pérez, M. I., Aguilar, E. G. (2003). Diatomeas de las Costas del Pacífico en Panamá: estudio florístico. Universidad de Panamá (Centro de Ciencias del Mar y Limnología). Vice-Rectoría de Investigación y Postgrado. 384 pp.

Stoermer, E.F., Andresen, N.A., Schelske, C.L. (1992). Diatom succession in the recent sediments of Lake Okeechobee, Florida, U.S.A. Diatom Research. **7** (2): 367-386.

Taffs, K. H., Farago, L. J., Heijnis, H., Jacobsen, G. (2008). A diatom-based Holocene record of human impact from a coastal environment: Tuckean Swamp, eastern Australia. J. Paleolimnol. **39** (1): 71-82.

Tamura, T., Saito, Y., Sieng, S., Ben, B., Kong, M., Sim, I., Akiba, F. (2009). Initiation of the Mekong River delta at 8 ka: Evidence from the sedimentary succession in the Cambodian lowland. Quat Sci Rev. **28** (3-4): 327-344.

Tobón, I. C. (1989). Inventario preliminar de las diatomeas y dinoflagelados de la Ciénaga de Tesca (Costa del Caribe, Colombia), con anotaciones ecológicas. Tesis de Grado. Univ. Gießen.

Unrein, F., Tell, G. (1994). Respuesta del fitoplancton al enriquecimiento con fósforo y nitrógeno en aguas de una laguna de inundación del rio Paraná. Revue d'hydrobiologie tropicale. **27** (4): 315-328.

Van der Hammen, T. (1984). Datos sobre la historia del clima, vegetación y glaciación de la Sierra Nevada de Santa Marta. En: Van der Hammen, T. et P. M. Ruiz (Ed.). Estudios de ecosistemas tropandinos. La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), Transecto Buritaca-La Cumbre. J. Cramer. **2:** 561-573.

Van der Hammen, T., & Noldus, G.W. (1984). Paleoecología de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Studies on the Tropical Andean Ecosystems: la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). Transecto Buritacá-La Cumbre. Berlin-Stuttgart: J. Cramer. **2:** 581-588.

Van Iperen, J.M., Van Weering, T.C.E., Jansen, J.H.F., Van Bennekom, A.J. (1987). Diatoms in surface sediments of the Zaire deep-sea fan (SE Atlantic Ocean) and their relation to overlying water masses. Neth. J. Sea Res. **21** (3): 203-217.

Van Wichelen, J., Muylaert, K., Van Der Gucht, K., Vyverman, W. (2006). Observations on little studied protists (chytrids and an amoeba), affecting phytoplankton populations in the upper reaches of the Schelde Estuary (Belgium). Belg. J. Bot. **139** (2): 153-166.

Varela, M., Varela, R. (1983). Microalgas del bajo Orinoco y Delta Amacuro, Venezuela. II. Bacillariophyceae, Dinophyceae. Mem. Soc. Cienc. Nat. La Salle. **43:** 89-111.

Vélez, M.I., Escobar, J., Brenner, M., Rangel, O., Betancourt, A., Jaramillo, A.J., Moreno, J.L. (2014). Middle to late Holocene relative sea level rise, climate variability and environmental change along the Colombian Caribbean coast. The Holocene. **24** (8): 898-907.

Vidaković, D., Krizmanić, J., Subakov-Simić, G., Karadžić, V. (2016). Distribution of invasive species *Actinocyclus normanii* (Hemidiscaceae, Bacillariophyta) in Serbia. Studia Bot. Hung. **47** (2): 201-212.

Vidal, L. A. (1995). Estudio del fitoplancton en el sistema lagunar estuarino tropical Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, durante el año 1987. Tesis de Grado, Maestría, Univ. Nacional de Colombia. 207 pp.

Vidal, L. A. (1997). Estudio del Fitoplancton en la Ciénaga Grande de Santa Marta durante el año 1995. Resultados Cualitativos y variación en el tiempo. Informe INVEMAR: 55 pp.

Vidal, L.A. (2010). Manual del fitoplancton hallado en la Ciénaga Grande de Santa Marta y cuerpos de agua aledaños. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 384 pp.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):330-342, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.713

Vidal, L. A., Galán, A. (1999). Bioensayos con *Actinocyclus normanii* (Bacillariophyta), para determinar condiciones de su mantenimiento en laboratorio. Informe técnico. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR. Informe sin publicar. Santa Marta. 25 pp.

Wiedemann, H.U. (1973). Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history. Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient. **7:** 85-119.

Witak, M. (2013). Diatom biofacies in the SW Gulf of Gdańsk and the Vistula Lagoon (the southern Baltic Sea) as indicators of the basin evolution in the Middle and Late Holocene. Oceanol. Hydrobiol. St. **42** (1): 70-88.

Witon, E., Malmgren, B., Witkowski, A., Kuijpers, A. (2006). Holocene marine diatoms from the Faeroe Islands and their paleoceanographic implications. Palaeo3. **239** (3-4): 487-509.

Zalocar de Domitrovic, Y., Poi de Neiff, A. S. G., Casco, S. L. (2007). Abundance and diversity of phytoplankton in the Paraná River (Argentina) 220 km downstream of the Yacyretá reservoir. Braz. J. Biol. **67** (1): 53-63.

Zong, Y., Zheng, Z., Huang, K., Sun, Y., Wang, N., Tang, M., Huang, G. (2013). Changes in sea level, water salinity and wetland habitat linked to the late agricultural development in the Pearl River delta plain of China. Quat. Sci. Rev. **70:** 145-157.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):343-352, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

Artículo original

Ciencias Naturales

Identificación de hongos y bacterias asociados a fustes de melina (*Gmelina arborea* ROXB) en el departamento del Tolima, Colombia

Vivian Andrea Coy-Rodríguez[1], Lily Julieth Vargas-Osorio[1], Maryeimy Varón-López[1,*], Nathali López-Cardona[2]

[1] Grupo de Genética y Biotecnología Vegetal y Microbiana (GEBIUT), Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
[2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoica, C.I, La Libertad, Meta, Colombia

Resumen

La melina (*Gmelina arborea* Roxb) es una especie de amplia distribución mundial y de elevado valor comercial por su crecimiento rápido y las excelentes propiedades físicas y mecánicas de su madera; sin embargo, constantemente se ve amenazada por diversos factores físicos, químicos y biológicos, siendo los hongos y las bacterias los microorganismos que más pueden afectar su producción. El presente estudio tuvo como objetivo aislar e identificar hongos y bacterias asociados con fustes enfermos de *G. arborea* en plantaciones ubicadas en el departamento del Tolima (Colombia). La caracterización morfológica de las colonias fúngicas se realizó en el medio Papa-Dextrosa-Agar (PDA) con posterior identificación microscópica, después de inducir la producción de las estructuras reproductivas. El aislamiento de las bacterias se realizó en Agar Nutritivo (AN), con posterior caracterización bioquímica. La identificación molecular fue realizada mediante la amplificación de la región ITS para hongos y 16S para bacterias. Se identificaron los hongos *Lasiodiplodia theobromae*, *Coniothyrium aleuritis*, *Curvularia geniculata*, *Chaetomium globosum*, *Phomopsis columnaris*, *Diaporthe* sp y un aislamiento perteneciente a la clase Dothideomycetes. Las bacterias correspondieron a *Bacillus cereus*, *Pseudomonas alcaligenes* y *Pantoea dispersa*. Mediante pruebas de patogenicidad se determinó que los microorganismos causantes de la pudrición del tejido vascular en fustes jóvenes de melina fueron *L. theobromae y C. geniculata.* © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Especie forestal; ITS; 16S; Microorganismos; Postulados de Köch.

Identification of fungi and bacteria associated with candahar stems (*Gmelina arborea* ROXB) in the department of Tolima, Colombia

Abstract

Gmelina (*Gmelina arborea* Roxb) is a species of global distribution with a high commercial value due to its rapid growth and excellent physical, chemical, and biological features. Fungi and bacteria are the most important microorganisms that can affect its production. The present study aimed at isolating and identifying fungi and bacteria associated with *G. arborea* stem diseases in plantations located in the department of Tolima (Colombia). The morphological characterization of the fungal colonies was carried out in Potato Dextrose Agar medium (PDA) with subsequent microscopic identification after inducing the reproductive structures. Bacteria isolation was conducted in nutrient agar with subsequent biochemical characterization. The molecular identification was made by the amplification of the ITS region for fungi and the 16S for bacteria. We identified the fungi *Lasiodiplodia theobromae*, *Coniothyrium aleuritis*, *Curvularia geniculata*, *Chaetomium globosum*, *Phomopsis columnaris*, *Diaporthe* sp, as well as an isolate belonging to the Dothideomycetes class. The bacteria corresponded to *Bacillus cereus*, *Pseudomonas alcaligenes,* and *Pantoea dispersa*. The pathogenicity tests determined that *L. theobromae* and *C. geniculate* caused rot of vascular tissue in young candahar stems. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Forest species; ITS; 16S; Koch's postulates; Microorganisms.

Introducción

Melina (*Gmelina arborea*) es una especie de planta que pertenece a la familia Verbenecea y tiene la capacidad de desarrollarse en distintos hábitats que varían desde los húmedos hasta los secos. Es nativa de los bosques tropicales de India, Birmania, Sri Lanka y el sur de China (**Umana, *et al*.,** 2015). Esta especie es de gran interés debido a su rápido crecimiento y a las excelentes propiedades físicas y mecánicas de su madera (**Salas-Rodríguez, *et al.,*** 2016; **Anuagasi, *et al*.,** 2017).

Las plantaciones de melina se ven amenazadas por insectos, plagas y organismos patógenos (**Wingfield & Robison,** 2004; **Balu, *et al*.,** 2015). Se han reportado 34 especies de insectos que las afectan, de los cuales el hemíptero *Tingis beesoni* causa la mayoría del daño foliar, en tanto que los hongos son los principales microorganismos

***Correspondencia:**
Maryeimy Varón-López, mvaronl@ut.edu.co
Recibido: 2 de octubre de 2018
Aceptado: 11 de diciembre de 2018
Editor: Jairo Castaño Zapata

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

causantes de enfermedades en los fustes de *G. arborea* (**Balu, *et al.*,** 2015; **Umana, *et al*.,** 2015), destacándose las especies *Aspergillus flavus, Aspergillus niger, Apodachlya pyrifera, Botryodiplodia theobromae, Dacromyces deliquescens, Fusarium oxysporum, Phoma herbarum, Phomopsis gmelinae, Trichosporonoide oedocephalus, Graphium penicilliodes, Ceratocystis fimbriata y Thronectria pseudotricha* (**Umana, *et al*.,** 2015; **Murillo-Gamboa, *et al*.,** 2016; **Anuagasi, *et al*.,** 2017). Se han encontrado pocos géneros de bacterias causantes de enfermedades en *G. arbórea,* pero se menciona *Agrobacterium tumefaciens,* especie que causa agallas en la base del fuste (**Wingfield & Robison,** 2004; **Arguedas,** 2004).

Se atribuye a las enfermedades que afectan el fuste las mayores pérdidas económicas debido a que causan cancros, necrosis, agallas y muerte vascular (**Arguedas,** 2004), lo que afecta significativamente la rentabilidad del producto aprovechable (**Obregón,** 2006).

En Colombia se conoce poco sobre las enfermedades de la melina, y la mayoría de las investigaciones se ha enfocado en su incorporación en sistemas agroforestales (**Guillermo-Ramírez, *et al*.,** 2017), el mejoramiento genético (**Mariño & Rodríguez,** 2010; **Espitia, *et al*.,** 2016), el manejo hídrico (**Vergara, *et al*.,** 2017) y la modulación del crecimiento (**Barrios, *et al*.,** 2011; **Melo,** 2015). Varias plantaciones de esta especie forestal en el departamento del Tolima (Colombia) han evidenciado signos de cancros, necrosis, decoloración de la médula y muerte parcial del tejido vascular, por lo que esta investigación se propuso aislar, caracterizar e identificar los posibles agentes causantes de las enfermedades asociadas con esta especie mediante el análisis de sus características fenotípicas, la identificación molecular y las pruebas de patogenicidad.

Materiales y métodos

Área de estudio y sitios de muestreo. Las muestras se recolectaron en plantaciones de melina en los municipios de Guamo, Armero-Guayabal, Espinal y Venadillo en el departamento del Tolima en una zona de formación de bosque seco tropical y en la franja altitudinal de 300 a 500 msnm, con una temperatura promedio entre 26 y 29 °C, humedad relativa entre 60 y 72 % y precipitación media anual entre 1.488 y 1.840 mm.

Obtención de la muestra. Se observó el estado fitosanitario de los árboles en las cuatro localidades; en cada zona se seleccionaron tres individuos con algún síntoma de enfermedad en el tejido vascular (cancros basales, necrosis, decoloración de la médula) (Figura 1) y se tomó una muestra por individuo. Se retiró la corteza y con un machete previamente desinfectado con hipoclorito al 5 %, se hicieron los cortes del tejido. Las muestras se almacenaron en bolsas de papel y de plástico marcadas con la fecha, el número del árbol y la localidad, y se transportaron en una nevera portátil a 4 °C hasta el Laboratorio de Microbiología y Micorrizas de la Universidad del Tolima para su procesamiento.

De cada ejemplar con síntomas de enfermedad se extrajeron 25 cortes de tejido de 3 a 5 mm en una proporción de tres muestras de material sano por cada muestra de material enfermo, luego se lavaron con agua destilada estéril (ADE), y se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 2 % durante un minuto y en alcohol al 70 % durante otro minuto y, finalmente, se lavaron tres veces con agua destilada estéril (**French & Hebert,** 1980).

Aislamiento e identificación morfológica de las cepas fúngicas. Las doce muestras previamente desinfectadas obtenidas de tres árboles en cada una de las cuatro localidades se sembraron en (PDA) (extracto de papa: 4 g, dextrosa: 20 g y agar papa, dextrosa: 15 g, en un litro de agua destilada) para obtener cepas puras. Todos los aislamientos se caracterizaron microscópica y macroscópicamente, a las colonias se les evaluó el tipo de borde, la textura, las características de esporulación, el tamaño y la coloración según la tabla de Munssell (**Agrios,** 2005). Para inducir la esporulación se emplearon los medios agar extracto de malta (EMA) (agar: 20 g, dextrosa: 10 g, extracto de levadura: 3 g, extracto de malta: 3 g y peptona: 5 g en un litro de agua destilada) (**Atlas,** 2005); agar avena (AA)(avena en hojuelas: 40 g y agar: 20 g en un litro de agua destilada); agar enriquecido con ocho vegetales (V8) (200 ml de V8, 3 g de $CaCO_3$, 20 g de agar en un litro de agua destilada) (**López-Cardona & Castaño-Zapata,** 2013); agar agua con acículas de pino (AAAP) al 2 % (acículas de pino previamente esterilizadas con luz ultravioleta de onda larga durante 24 h); agar hojas de clavel (*Carnation Leaf-piece Agar* - CLA) al 2 % (hojas de clavel previamente esterilizadas con luz ultravioleta de onda larga durante 24 horas) (**Atlas,** 2005), los cuales se cultivaron a temperaturas entre 28 y 35 ºC, con ciclos

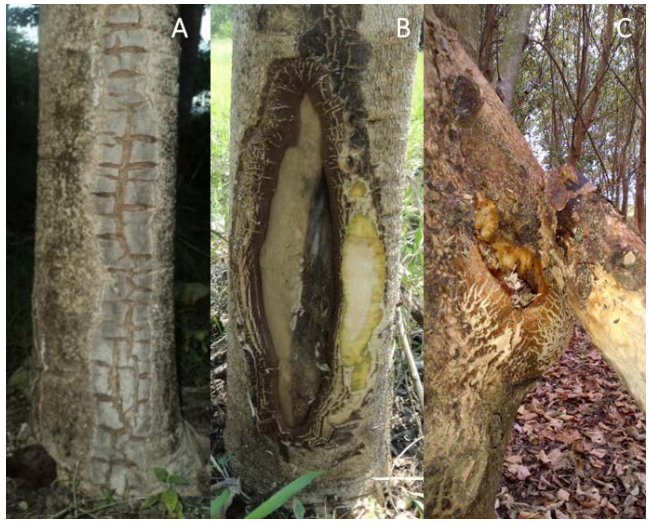


Figura 1. Sintomatología de los fustes enfermos de *G. arborea* evaluados en el departamento del Tolima. **A.** Necrosis, decoloración de la médula en la parte basal del fuste y muerte parcial del tejido vascular. **B.** Cancro basal. **C.** Decoloración de la médula en los entrenudos de las ramas

de oscuridad total y fotoperiodo de 12 horas con luz negra (luz ultravioleta cercana). Otra parte del tejido se colocó en cámaras húmedas para favorecer la formación de estructuras reproductivas como ascas, picnidios, peritecios y conidias (**French & Herbert,** 1980; **del Río & Castaño-Zapata,** 1994). Posteriormente, las muestras se montaron para su visualización en el microscopio y su identificación mediante las claves de **Hanlin** (1990) y **Barnett & Hunter** (1998).

Aislamiento e identificación bioquímica de las colonias bacterianas. Las muestras desinfectadas se sembraron en medio agar nutritivo (AN): (5 g de peptona, 4 g de extracto de carne, y 15 g de agar en un litro de agua destilada) (**Atlas,** 2005), se incubaron en la oscuridad a temperaturas entre 26 y 28 ºC, y 24 horas después se evaluó el crecimiento. Se registró la forma de la colonia y se hizo la identificación bioquímica siguiendo el esquema de **Schaad** (2001), el cual incluyó los parámetros de tinción de Gram, reconfirmación del Gram con hidróxido de potasio (KOH) al 3 %, crecimiento en extracto de levadura, dextrosa y carbonato de calcio (*Yeast extract-dextrose-*$CaCO_3$ –YDC) (20 g de $CaCO_3$, 20 g de glucosa, 15 g de agar, y 10 g de extracto de levadura en un litro de agua destilada), agar King B (KB) (20 g de peptona, 1,5 g de K_2HPO_4, 1,5 g de $MgSO_4.7H_2O$, y 15 g de agar en un litro de agua destilada), y medio de Hugh y Leifson (2 g de peptona, 5 g de NaCl, 0,3 g de K_2HPO_4, azul de bromotimol al 0,2 %, 100 ml de solución de carbohidratos), con el fin de determinar el metabolismo oxidativo o fermentativo; se usó agar MacConkey (1,5 g de peptona de carne, 17 g de peptona de gelatina, 1,5 g de tripteína, 10 g de lactosa, 1,5 g de mezcla de sales biliares Nº 3, 5 g de NaC_l, 0,03 g de rojo neutro, 0,001 g de cristal violeta, y 13,5 g de agar en un litro de agua destilada) como medio indicador de bacterias fermentadoras de lactosa, y agar hierro triple azúcar (*Triple Sugar Iron* – TSI) (20 g de peptona, 12 g de agar, 10 g de lactosa, 10 g de sacarosa, 5 g de NaCl, 3 g de extracto de carne, 3 g de extracto de levadura, 1 g de glucosa, 0,3 g de citrato férrico, 0,3 g de $Na_2S_2O_3$, y 0,025 g de fenol rojo en un litro de agua destilada), el cual permite la diferenciación de enterobacterias con base en la producción de sulfuro de hidrogeno (SO_2) y la fermentación de azúcares (**Atlas,** 2005). Se empleó la prueba de la catalasa para constatar si los microorganismos eran capaces de descomponer el peróxido de hidrógeno en agua y oxigeno) (**Valdés,** 2014), la pudrición de la papa mediante la inoculación de un aislamiento bacteriano en rodajas de papa para demostrar la producción de enzimas (**Cortés,** 2011), en tanto que la movilidad se verificó en medio SIM (*Sulfide Indole Motility*) (20 g de tripteína, 6 g de peptona, 0,2 g de sulfato de hierro y amonio, 0,2 g de tiosulfato de sodio, y 3,5 g de agar en un litro de agua destilada), el cual se emplea para diferenciar especies de la familia Enterobacteriaceae (**Atlas,** 2005).

Identificación molecular de hongos y bacterias. Las colonias puras de hongos en crecimiento durante ocho días en PDA a 28 ºC, se rasparon superficialmente y se maceraron con nitrógeno líquido. A esta mezcla se le adicionó tampón de extracción (SDS al 1 %, 25 mmol l^{-1} de EDTA, 200 mmol l^{-1} de tris- HCl pH 8,0, 250 mmol l^{-1} de NaCl) y se incubaron a 60 °C durante 30 minutos, con una posterior centrifugación a 10.000 rpm durante 10 minutos. Las proteínas se removieron por extracción con cloroformo: alcohol isoamílico (24:1). El ADN se recuperó con isopropanol helado y se hicieron dos lavados con etanol al 80 %. El precipitado resultante se suspendió en 50 µl de agua MilliQ y se almacenó a 4 °C hasta su utilización (**Glienke-Blanco,** ***et al.,*** 2002).

La extracción del ADN de las bacterias se realizó a partir del cultivo bacteriano en caldo de infusión cerebro corazón (*Brain Heart Infusion* – BHI) (200 g de infusión de cerebro de vacuno, 250 g de infusión de corazón de vacuno, 5 g de NaCl, 2 g de glucosa, 2,5 g de Na_2HPO_4, 2 g de glucosa, y 10 g de proteasa peptona en un litro de agua destilada) (**Atlas,** 2005), con un máximo de 24 horas de crecimiento. El cultivo se centrifugó a 7.400 rpm durante 10 minutos, y al precipitado se le adicionaron 50 µl de SDS al 10 % (p/v) y 50 µl de tampón de lisis (SDS al 0,1 %, 50 mM pH 8,0 de EDTA, 50 mM de tris-HCl pH 8,0, 50 mM de NaCl), se incubó a 37 °C durante 30 minutos, y se extrajo con dos volúmenes de fenol, una homogenización de 30 segundos y centrifugación a 1.200 rpm durante 10 minutos; a la fase acuosa se le adicionó un volumen igual de cloroformo, repitiendo la homogenización y la centrifugación, y se obtuvo una nueva fase acuosa a la cual se le adicionaron 2,5 volúmenes de etanol absoluto frío. El precipitado de ADN se suspendió en 50 µl de tampón TE (10 mM de tris-HCl pH 8,0 y 1 mM de EDTA pH 8,0) y se almacenó a 4 °C hasta su utilización.

La integridad del ADN se evaluó por electroforesis en gel de agarosa al 1 % (TBE 0,5X) en una cámara horizontal ENDURO™ de Labnet, a 120 V. Los geles se tiñeron con HydraGreen™ y se observaron en un transiluminador UV Spectroline®.

Se amplificó el ADN de la región del espaciador transcrito interno (*internal transcribed spacer*, ITS), con los iniciadores universales ITS1 (5’ TCC GTA GGT GAA CCT GCG G 3’) e ITS4 (5’ TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC 3’) (**White,** 1990) para hongos, y con los iniciadores U1 (5’-CCAGCAGCCGCGGTAATACG-3’) y U2 (5’ATCGG(C/T)TACCTTGTTACGACTTC-3’) (**Lu,** ***et al*.,** 2000) para la amplificación del ARN ribosomal 16s en bacterias.

Las reacciones de amplificación se hicieron en un volumen total de 25 µl de una mezcla (Corpogen PCR-2x) que contenía solución tampón para PCR 1x (20 mM de tris-HCl pH 8,5, 100 mM de KCL), 400 uM de DNTP, 3 mM de $MgCl_2$, 0,1 unidad/µl de polimerasa *Taq* ADN, 10 ng de ADN total, y una concentración final de 0,5 uM y 0,2 uM de los iniciadores de hongos y bacterias, respectivamente. Las amplificaciones se hicieron en un termociclador a 95 ºC durante 2 minutos, 30 ciclos a 94 ºC durante 30 segundos, a 53 ºC durante 45 segundos, a 72 ºC durante 1 minuto, y una

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):343-352, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

extensión final a 72 ºC durante 7 minutos para los hongos, y a 95 º C durante 1 minuto, 35 ciclos a 95 ºC durante 1 minuto, a 54 ºC durante 1 minuto, a 72 ºC durante 1,30 minutos, y una extensión final a 72 ºC durante 10 minutos para las bacterias.

Una vez obtenidos los productos de la PCR se verificaron mediante electroforesis el tamaño de los fragmentos de 500 a 600 pb para hongos y de 970 a 990 pb para bacterias, los cuales se secuenciaron en Macrogen Inc. en Corea del Sur.

El análisis filogenético de las secuencias se inició con la edición utilizando Chromas Pro-versión 1.49 (http://www.technelysium.com.au/ChromasPro.html), seguida del alineamiento con la herramienta BLAST®n 2.8.1 del *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) y la comparación con todas las secuencias de referencia de la base de datos del GenBank. Los árboles se hicieron mediante el programa *Molecular Evolutionary Genetics Analysis* (Mega), versión 7 (**Kumar, *et al.*,** 2016), el alineamiento con el programa Muscle y el método de máxima verosimilitud sobre el modelo de Kimura 2 (**Kimura,** 1980), en tanto que para el soporte interno se utilizó el análisis de *bootstrap* con 1.000 repeticiones.

Pruebas de patogenicidad para hongos y bacterias. La patogenicidad se evaluó siguiendo los postulados de **Köch** (1876) bajo condiciones controladas en el Jardín Botánico "Alejandro Von Humboldt" de la Universidad del Tolima; se utilizaron cuatro repeticiones para cada una de las cepas fúngicas y bacterianas, obteniéndose así un total de 32 plantas de cuatro meses de edad para los aislamientos fúngicos (siete aislamientos y un control de PDA) y 16 plantas de dos meses de edad para los bacterianos (tres aislamientos y un control de agua estéril). Cada planta se aisló y se cubrió con una bolsa de polietileno transparente de 40 x 80 cm sostenida en un marco de alambre (aro y soporte de dos varillas) para evitar el contacto de la bolsa con la planta (Figura 2) **(Kiraly, *et al*.,** 1970).

Las cepas fúngicas se evaluaron con la técnica de herida en el cambium vascular de la parte media del tallo mediante cortes de tipo ventana, ubicándose en su interior un disco de micelio de 5 mm de diámetro cultivado durante siete días a 27 ºC en PDA; posteriormente, la herida se cubrió con cinta de tela transpirable (esparadrapo). Las plantas se evaluaron a los 15 y 30 días de la inoculación para observar la aparición de síntomas (**Alama, *et al.*,** 2006; **Ismail, *et al*.,** 2012; **Juárez-Palacios, *et al*.,** 2013).

Las cepas bacterianas se incubaron en AN durante 24 horas, luego se ajustaron las muestras en ADE en una concentración de 9,0 x 10^8 UFC ml-1 en la escala de McFarland, y se inocularon en las hojas de las plantas de dos meses de edad con el método de inyección utilizando una jeringa de insulina de 1 ml en la cual se incrustó un tapón de caucho para permitir la distribución homogénea del inóculo (Figura 2) (**Escalona & Contreras,** 2011). La valoración se efectuó a los 10 y 20 días de la inoculación para observar la sintomatología (**Cardona, *et al*.,** 2012).

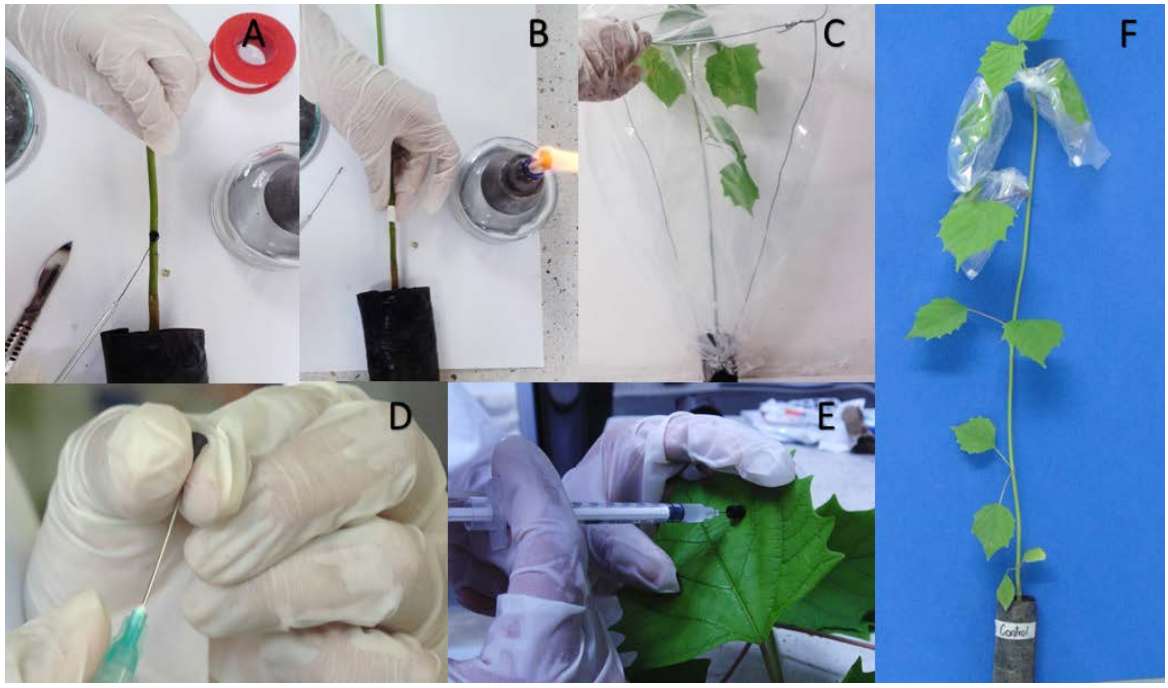


Figura 2. Inoculación de hongos (A, B, C) y bacterias (D, F, G) para pruebas de patogenia en plantas jóvenes de melina. **A.** Inoculación de disco de micelio en cortes de tipo ventana en la base del tallo. **B.** Herida inoculada y cubierta con cinta de tela transpirable (esparadrapo). C. Plantas inoculadas y aisladas en una bolsa de polietileno transparente de 40 x 80 cm sostenida con un marco de alambre. **D.** Incrustación de tapón de caucho en aguja de jeringa de insulina. **E.** Inoculación de colonias bacterianas mediante el método de inyección en hojas. **F.** Cámaras húmedas para el desarrollo bacteriano.

Los postulados de Köch se completaron con el reaislamiento de los microorganismos. Los hongos se evaluaron 30 días después a partir de los tejidos sintomáticos en medio PDA a 27 ºC durante siete días, y las bacterias, después de 20 días analizando el tejido previamente inoculado en medio AN a 37 ºC durante 24 horas (**Cardona, *et al*.,** 2012).

Resultados

Sintomatología en las plantas. En campo se encontraron árboles de melina sintomáticos en tres de las cuatro localidades. En el municipio del Guamo se observaron individuos con presencia de decoloración de la médula en la parte basal del fuste y muerte parcial del tejido vascular; en la plantación de Armero Guayabal se encontraron árboles con escarificación de la corteza y cancros basales en el fuste; en el municipio del Espinal se registró la decoloración de la médula en los entrenudos de las ramas, en tanto que el descortezamiento basal de las muestras de Venadillo no se consideró un síntoma asociado con un microorganismo, lo cual se verificó en el laboratorio sembrando el tejido en medio de cultivo PDA.

Caracterización e identificación de los hongos y bacterias asociados a melina. En la tabla 1 se relaciona cómo siete de los 12 árboles evaluados presentaron crecimiento micelial a partir del tejido vascular sembrado en medio PDA. Las características fenotípicas (macroscópicas y microscópicas) de las cepas fúngicas aisladas se observan en la Figura 3.

Se encontró que el medio de cultivo V8, las temperaturas entre 28 y 35 ºC y un fotoperiodo de 12 horas con luz ultravioleta cercana fueron las condiciones ideales para la esporulación de la mayoría de las cepas estudiadas, con excepción de las cepas 1 y 4 que presentaron mejor desarrollo en los medios AA y AAAP, respectivamente, aunque en ellos se evidenció crecimiento micelial sin que se observara esporulación de los hongos, a pesar de probar varios medios de cultivo y diferentes condiciones de luz y temperatura (Tabla 1) .

Se seleccionaron tres cepas de bacterias y se las caracterizó morfológica, cultural y bioquímicamente (Tabla 2), con lo cual se encontró que los tres aislamientos presentaban forma de bacilo, pertenecían a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*, y que un aislamiento era de la familia Enterobacteriaceae.

Análisis filogenético de hongos y bacterias asociados con los fustes de melina. La amplificación de la región ITS para los hongos y la 16S para las bacterias permitió obtener fragmentos de aproximadamente 500 a 600 pb y de 970 a 990 pb, respectivamente. Las secuencias generadas para el análisis filogenético permitieron la identificación del 85 % de las cepas fúngicas, cinco a nivel de especie, una a nivel de género y una última hasta el nivel de clase. Las secuencias obtenidas se depositaron en el GenBank con los números de acceso MH029137-MH029143.

El árbol filogenético para hongos presentó siete clados formados con *Saccharomyces cerevisiae* como grupo externo (Figura 4A); los clados I, III, IV, V y VI presentaron 100 %

Tabla 1. Caracterización fenotípica y molecular de los hongos aislados del tejido vascular de *G. arborea* Roxb

	Caracterización fenotípica						**Identificación molecular con la región ITS**				
	[a]Morfología de la colonia (PDA/27ºC)	**[b]Coloración de Mussell (PDA/27ºC)**	**[c]Condiciones de crecimiento**			**Identificación**	**Porcentaje de identidad**	**Puntuación máxima**	**E valor**	**No. de acceso**	**Identificación**
Aislamiento	B-T-P		MC	T(°C)	Luz						
IFGmelina1	P/Al/Uac	10YR 8/3	AA/PDA	28	Fln	Ascomycota	94	1081	0.0	*KM357551.1*	*Lasiodiploidia theobromae*
IFGmelina2	U/Al/Uat	7,5YR 2,5/1	V8/CLA	28	O24h	Ascomycota	100	985	0.0	*KJ921603.1*	*Coniothyrium aleuritis*
IFGmelina3	P/Al/Uat	10YR 8/2	AEM/V8		O24h/ Fln	*Curvularia*	99	929	0.0	*KU715131.1*	*Curvularia geniculata*
IFGmelina4	E/Al/Uat	10YR 8/2	AAAP	28	Fln	Ascomycota	97	985	0.0	*KC771518.1*	Dothideomycetes
IFGmelina5	E/Af/U	10YR 8/3.	V8	35	Fln	*Chaetomium*	100	933	0.0	*KT385731.1*	*Chaetomium globosum*
IFGmelina6	P/Af/Uat	10YR 8/1	PDA/V8	35	Fln	Ascomycota	99	913	0.0	*KU204666.1*	*Phomopsis columnaris*
IFGmelina7	P/Af/Uat	10YR 8/1	PDA/V8	35	Fln	Ascomycota	99	939	0.0	*KP307001.1*	*Dhiaporthe sp*

[a]Morfología de la colonia donde B: borde, T: textura y P: pigmentación, clasificada en P: plumoso, U: uniforme, E: entero, Al: algodonosa, Af: afelpada, Uac: uniforme con anillo central, Uat: uniforme con anillos en toda la colonia, U: uniforme sin anillos

[b]Coloración según la tabla de Musell para suelos (**Agrios,** 2005).

[c]Condiciones óptimas para la esporulación en MC: medio de cultivo, T: temperatura y luz con los medios AA: agar avena, PDA: papa, dextrosa, agar, V8: agar enriquecido con ocho vegetales, AAAP: agua, agar, acículas de pino, CLA: agar hojas de clavel y la luz, Fln: fotoperiodo de 12 horas con luz negra (luz ultravioleta cercana), O24h: oscuridad 24 horas

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):343-352, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

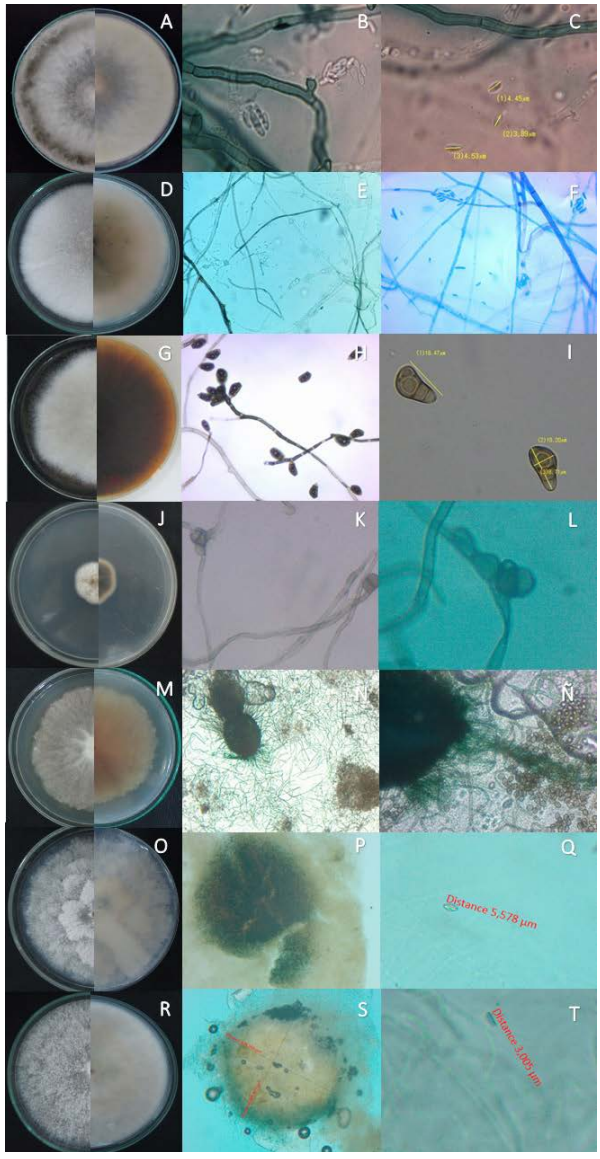


Figura 3. Características fenotípicas y cuerpos fructíferos de los aislamientos fúngicos en medio PDA a 27 ºC**. A.** *Lapsiodiplodia theobromae,* micelio de color blanco grisáceo por el frente y blanco con aro terminal de color verde al reverso. **B.** Hifas septadas, microconidias agrupadas, vista 60x. **C.** Medición de microconidias, vista 100x. **D.** *Coniothyrium aleuritis*, micelio color blanco por el frente y rosa claro por el reverso. **E.** Hifas septadas, vista 60x. **F.** Microconidias agrupadas, vista 100x **G.** *Curvularia geniculata*, micelio de color blanco en el frente y marrón oscuro al reverso. **H.** Hifa septada y conidióforo, vista 60x. **I.** Conidias en forma de bumerán con septas tritabicadas. **J.** *Dothideomycetes* sp, micelio de color blanco por el frente y marrón al reverso. **K.** Hifa septada con conidio, vista 60x. **L.** Conidia de color marrón bitabicada. **M.** *Chaetomium globosum*, micelio de coloración blanco rosáceo por el frente y rosa claro por el reverso. **N.** Peritecios grandes agrupados de dos en dos. Ñ. Ascosporas unicelulares agrupadas. **O.** *Phomopsis columnaris,* micelio de color blanco en el frente y blanco grisáceo al reverso. **P.** Conidióforo de color marrón, vista 60x **Q.** Microconidia, vista 100x. **R.** *Diaphorte* sp, micelio de color blanco en el frente y blanco grisáceo al reverso. **S.** Conidióforo de color marrón, vista 60x. **T.** Microconidia, vista 100x.

de similitud con *Diaporthe* sp.; *Chaetomium globosum*, *Lasiodiplodia theobromae*, *Curvularia geniculata* y *Coniothyrium aleuritis,* respectivamente. El clado II mostró 98 % de similitud con *Phomopsis columnaris* y el VII, un 89 % de similitud con la clase Dothideomycetes.

Entre las bacterias se escogió *Acidobacteria bacterium* como grupo externo; el árbol presentó tres clados (Figura 4B), con un 78 % de similitud con *Bacillus cereus,* 98 % con *Pseudomonas alcaligenes* y 99 % con *Pantoea dispersa* en los clados III, II y I, respectivamente. Las secuencias se depositaron en el GenBank con los números de acceso MG951480, MG951481 y MG984548.

Pruebas de patogenicidad. En la primera valoración de las 32 plántulas de cuatro meses de edad realizada a los 15 días, se observó que los aislamientos de *L. theobromae* y *C. geniculata* presentaban crecimiento micelial en tres y dos de las cuatro plántulas inoculadas, respectivamente; en la segunda valoración realizada a los 30 días, se observó que las mismas plantas presentaban decoloración de la médula en el tejido vascular, lo que permitió confirmar una incidencia de 75 y 50 %, respectivamente. Se ratificaron los postulados al hacer un nuevo aislamiento de los tejidos con decoloración de la médula en medio PDA durante siete días a 27 ºC y en oscuridad (Figura 5). Se obtuvieron colonias y cuerpos fructíferos típicos de *L. theobromae* y *C. geniculata.* Las bacterias evaluadas no produjeron lesiones en ninguno de los individuos inoculados.

Discusión

La sintomatología de los fustes enfermos de melina fue diferente en cada plantación evaluada. En general, en campo se observaron cancros basales, necrosis y decoloración de la médula, en algunos casos con muerte parcial del tejido, descripción que concuerda con lo reportado por **Arguedas** (2004). *L. theobromae* y *C. geniculata* son dos nuevos reportes de hongos patógenos que afectan los fustes de melina en el departamento del Tolima. Asimismo, en el filoplano del fuste se encontraron otros hongos asociados como *C. aleuritis, C. globosum, P. columnaris*, *Diaporthe* sp., y un aislamiento de la clase Dothideomycetes que no causaron enfermedad en plantas jóvenes de melina bajo las condiciones del ensayo.

De los siete géneros de hongos aislados solo *Lasiodiplodia* y *Phomopsis* ya habían sido reportados como fitopatóge-nos en *G. arborea*, siendo las especies *L. pseudotheobromae* y *P. gmelinae* causantes de pudrición y muerte en el fuste, y *P. micheliae,* en plántulas y en hojas (**Arguedas,** 2004; **Alves, *et al*.,** 2008).

Lasiodiplodia theobromae ocasiona enfermedades en una amplia variedad de especies forestales como la acacia (*Acacia mangium*) (**Halfeld-Vieira, *et al*.,** 2006), el eucalipto *(Eucalipto* sp). (**Roux, *et al.,*** 2001), los pinos (*Pinus oocarpa* y *Pinus azadirachta*) (**Mohali, *et al*.,** 2002), y en especies de interés agrícola como el melocotón (*Prunus* **pérsica**) (**Gao, *et al*.,** 2016), el mango (*Mangifera indica*) (**Sandoval-**

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

Sánchez, *et al.*, 2013), y la naranja (*Citrus sinensis*) (**Zhao, *et al.*,** 2015), entre otras. Por su parte, *C. geniculata* se ha reportado en semillas de melina (*G. arborea*), teca (*Tectona grandis*) y acacia *(A. mangium)* (Álvarez, ***et al.*,** 2012) y, en algunos casos, en el estípite de las palmas de aceite (*Elaeis guineensis*) (**Mestizo, *et al.*,** 2012). Otras especies de este mismo género como *C. lunata,* provocan lesiones en las hojas del ocobo (*Tabebuia rosae*), el guayacén amarillo (*Tabebuia chrysantha*), la ceiba (*Ceiba* sp.), la teca (*T. grandis*) y el cedro blanco (*Cupresus lindleyi*) (**Cibrián, *et al.*,** 2008).

Las especies *C. aleuritis, C. globosum, P. columnaris* y *Diaporthe* sp no causaron enfermedades en los árboles de melina; sin embargo, varias especies de estos géneros sí son patógenos agresivos de árboles forestales, como

Tabla 2. Caracterización fenotípica y molecular de las bacterias aisladas del tejido vascular de *G. arborea* Roxb

	Parámetro	IBGmelina1	IBGmelina2	IBGmelina3
Caracterización morfológica	**Forma**	Circular	Circular	Puntiforme
Caracterización bioquímica	MacConkey	+	-	+
	[a]King B	Noflu	Flu	Noflu
	Test de Gram	+	-	-
	KOH al 3 %	-	+	+
	[b]Hugh y Leifson	Ox	Ox	Fer
	Prueba de la papa	-	-	+
	TSI	K/A	K/K	A/A
	SIM	+	-	-
	Indol	-	-	-
	Catalasa	-	+	+
	YDC	Crema	Crema	Crema
	[c]Hidrólisis del almidón	NA	NA	-
	Identificación	*Bacillus* sp	*Pseudomonas* Fluorescente	Enterobacteraceae
Identificación molecular rDNA16S	% identidad	99%	100%	100%
	Puntuación máxima	1133	1456	1589
	E valor	0.0	0.0	0.0
	No. de acceso	KJ626301.1	NR_114472.1	NR_116755.1
	Identificación	*Bacillus cereus*	*Pseudomonas alcaligenes*	*Pantoea dispersa*

[a]King B: Flu: fluorescente; Noflu: no fluorescente
[b]Hugh y Leifson si la reacción Ox: oxida, Fer: fermenta
[c]Hidrólisis del almidón. NA: no Aplica, -: actividad negativa

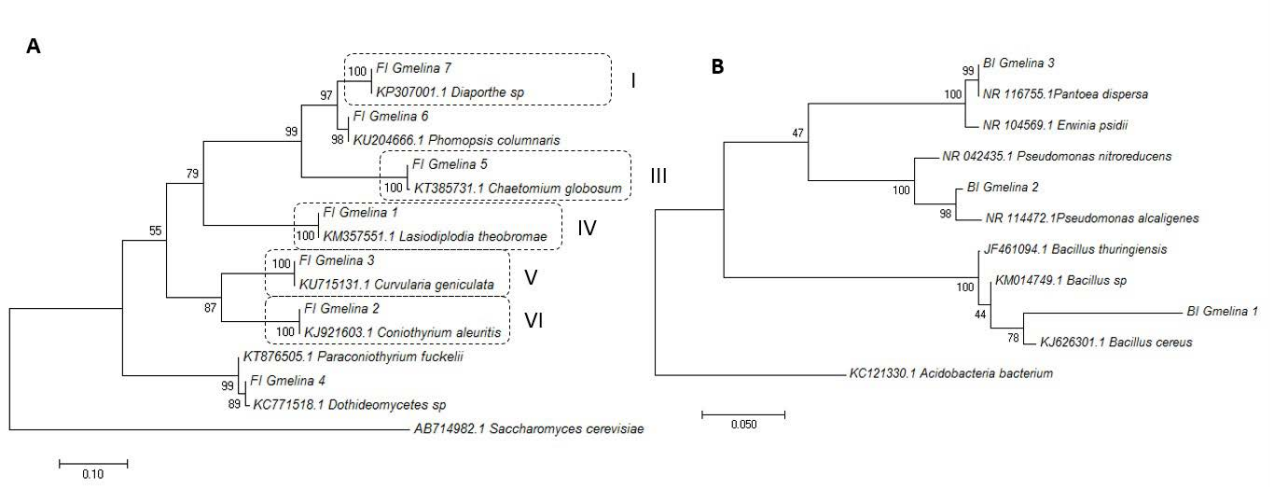


Figura 4. Análisis filogenético de hongos **(A)** y de bacterias **(B) con** base en el método de máxima verosimilitud, la prueba de filogenia *bootstrap* con 1.000 repeticiones, modelo Kimura 2

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):343-352, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.771

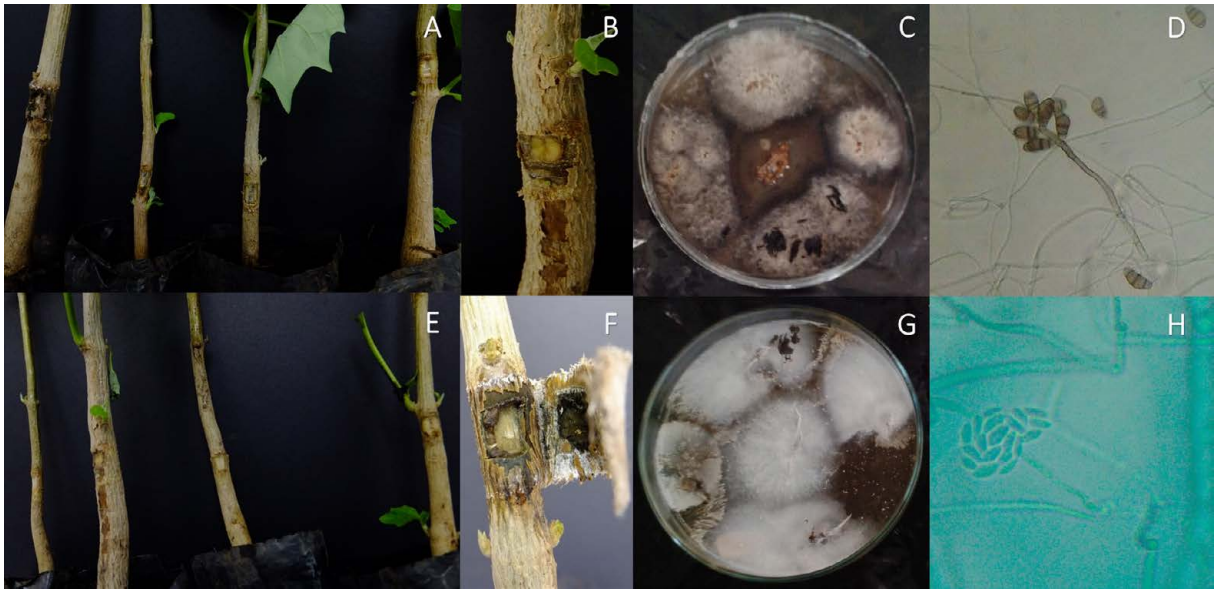


Figura 5. Pruebas de patogenicidad para *Curvularia geniculata* (A, B, C, D) y *Lasiodiplodia theobromae* (E, F, G, H) en plantas de melina. **A.** Plantas inoculadas con disco de micelio a los 30 días. **B.** Decoloración parcial de la médula. **C.** Colonias resultantes del aislamiento de tejido sintomático en pruebas de patogenia. **D.** Hifas septadas, conidias agrupadas, vista 60x. **E.** Plantas inoculadas con disco de micelio a los 30 días. **F.** Decoloración parcial de la médula. **G.** Colonias resultantes del aislamiento de tejido sintomático en pruebas de patogenia. **H.** Hifas septadas, microconidias agrupadas, vista 100x.

Coniothyrium zuluense, Diaporthe cubensis y *C. globosum,* y de eucaliptos (*Eucalypto* sp) (**Hodges, *et al*.,** 1976; **Gezahgne, *et al*.,** 2005; **Pérez-Vera, *et al*.,** 2005).

Entre este último grupo de hongos se destaca el papel de *C. globosum,* que, a pesar de haber sido reportado como patógeno en diversas especies vegetales (**Chavarriaga,** 2011), es un microorganismo con capacidad de controlar *Phytophthora nicotianae, Phytophthora infestans, Magnaporthe grisea* y *Puccinia recondita* (**Park, *et al*.,** 2005; **Shanthiyaa, *et al*.,** 2013; **Hung, *et al*.,** 2015; **Yang, *et al.*,** 2016).

Un resultado similar se encontró con las especies de bacterias identificadas, puesto que ninguna de ellas fue patogénica en plantas jóvenes de melina, y por el contrario, se han reportado como agentes de biocontrol. *B. cereus* tiene efecto contra *Phytophthora megasperma* (**Tejera-Hernández, *et al*.,** 2011), *Macrophomina phaseolina, Sclerotina minor, Fusarium oxysporum, F. solani* y *Phythium ultimum,*en tanto que los aislamientos de *P. alcaligenees* lo tienen sobre *Rhizoctonia solani* (**Amaíz, *et al*.,** 2015), y los de *P. dispersa* sobre *Xanthomonas albilineans* **(Zhang & Birch,** 1997). Otro valor agregado de estos tres géneros de bacterias es su capacidad de ser promotoras de crecimiento vegetal en plantas de tabaco, arroz y trigo (**Rives, *et al*.,** 2007; **Selvakumar, *et al*.,** 2008; **Dutta, *et al*.,** 2013). Dichos resultados abren la posibilidad de evaluar el potencial de estas especies de hongos y bacterias para controlar los patógenos de melina hallados en este estudio.

Por otro lado, los resultados de este trabajo coinciden con los de **García-Gonzáles** (2018) y **Cai, *et al.*** (2011) en cuanto a la importancia de combinar técnicas de identificación, ya que en la mayoría de los aislamientos solo fue posible identificar el filo con los estudios morfológicos, culturales y bioquímicos, y con las técnicas basadas en el ADN se obtuvieron resultados más precisos.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación permitieron identificar L. *theobromae y C. geniculata* como hongos patógenos de plántulas de melina. En los fustes enfermos se encontraron otros hongos y bacterias asociados que probablemente no causan enfermedades y, por el contrario, actuarían como controladores biológicos de los patógenos, por lo que se requerirían más estudios en esta área que permitan elucidar el papel de cada uno de estos microorganismos y su potencial en la creación de estrategias de biocontrol.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Oficina de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por su apoyo en el desarrollo de este estudio.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la investigación que deriva en el trabajo, así como de su escritura, revisión y aprobación final. Vivian Andrea Coy-Rodríguez realizó el aislamiento e identificación macroscópica de los microorganismos así como las pruebas de patogenicidad bajo la dirección y supervisión de Nathali López-Cardona; Lily Julieth Vargas-Osorio realizó la Identificación molecular de hongos y bacterias, bajo la dirección de Maryeimy Varon-Lopez.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology. United States of America: Department of Plant Pathology, University of Florida. p. 251-262.

Alama, I., Maldonado, E., Rodríguez-Galvez, E. (2006). *Lasiodiplodia theobromae* affect the cultivation of Palto (*Persea americana*) under the conditions of Piura, Perú. Universalia. **11:** 4-13.

Álvarez, E., Patermina, J., Espitia, M., Campo, R., Urango, N. (2012). Identificación de hongos asociados a semillas de *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f, y *Gmelina arborea* Roxb. Fitopatol Colomb. **36:** 1-5.

Alves, A., Crous, P., Correia, A., Phillips, A. (2008). Morphological and molecular data reveal cryptic speciation in *Lasiodiplodia theobromae*. Fungal Divers. **28:** 1-13.

Amaíz, L., Vargas, R., Medina, L., Izzeddin, N., Valbuena, O. (2015). Evaluación del efecto antagonista de un consorcio bacteriano sobre *Rhizoctonia solani* Kühn en cultivos de arroz. RELBAA. **6:** 19-30.

Anuagasi, C. L., Onuorah, J. A., Okigbo, R. N. (2017). Fungal pathogens affecting seedlings of *Gmelina arborea* Roxb and *Tectona grandis* Lf and effect of three plant extracts. IJAT. **13:** 307-330.

Arguedas, M. (2004). Problemas fitosanitarios en melina *(Gmelina arborea* (Roxb)) en Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. **1:** 1-9.

Atlas, R. M. (2005). Handbook of media for environmental microbiology. United States of America: CRC press. p. 672.

Balu, A., Rajarishi, R., Thangapandian, K., Senthilkumar, P., Murugesan, S. (2015). Management of important insect pests of *Gmelina arborea* under agroforestry system. Advances in Tree Seed Science and Silviculture. **36:** 361-378.

Barnett, H.L. & Hunter, B.B. (1998). Illustrated Genera of Imperfect Fungi. Paul, USA: APS Press. p. 218.

Barrios, A., López, A., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M., González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. en el departamento del Tolima,Colombia. Colombia Forestal. **14:** 3.

Cai, L., Udayanga, D., Manamgoda, D. S., Maharachchikumbura, S. S. N., Mckenzie, E. H. C., Dong Guo, L., Hyde, K. D. (2011). The need to carry out re-inventory of plant pathogenic fungi. Tropical Plant Pathol. **36:** 205-213.

Cardona, C. S., Marín Montoya, M., Díez, M. C. (2012). Identificación del agente causal de la pudrición basal del tallo de vainilla en cultivos bajo cobertizos en Colombia. Rev Mex Mic. **35:** 23-34.

Chavarriaga, D. (2011). Protección Fitosanitaria Forestal. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano Agropecuario. p. 226.

Cibrián, D., García, S., Macias, B. (2008). Identificación y manejo de plagas y enfermedades en viveros forestales. Jalisco, México: Forestal CN. p. 144.

Cortés, R. (2011). Manual de prácticas de fitopatología. Ciudad Juárez, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. p. 81.

Del Río, L. E., Castaño-Zapata, J. (1994). Estado actual de la investigación sobre pudrición de mazorcas de maíz provocada por Stenocarpella sp. Centroamérica. Ceiba. **34:** 211-228.

Dutta, S., Rani, T. S., Podile, A. R. (2013). Root exudate-induced alterations in *Bacillus cereus* cell wall contribute to root colonization and plant growth promotion. PloS one. **8:** 1-12.

Escalona, Y. & Contreras, N. (2011). Primer reporte de la mancha bacteriana en parchita (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa*) en Venezuela. Bioagro. **23:** 69-75.

Espitia, M., Murillo, O., Castillo, C. (2016). Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia). Temas Agrarios. **20:** 45-59.

French, E. & Hebert, T. (1980). Métodos de investigación fitopatológica. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. p. 142-186.

Gao, L., Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., Ye, J., Li, G. (2016). Gene expression changes during the gummosis development of peach shoots in response to *Lasiodiplodia theobromae* infection using RNA-Seq. Front Physiol. **7:** 170.

García-González, T., Sáenz-Hidalgo, H. K., Silva-Rojas, H. V., Morales-Nieto, C., Vancheva, T., Koebnik, R., Ávila-Quezada, G. D. (2018). Enterobacter cloacae, an emerging plant-pathogenic bacterium affecting chili pepper seedlings. Plant Pathol J, **34:** 1.

Gezahgne, A., Cortinas, M. N., Wingfield, M. J., Roux, J. (2005). Characterisation of the Coniothyrium stem canker pathogen on *Eucalyptus camaldulensis* in Ethiopia. Australas Plant Pathol. **34:** 85-90.

Glienke-Blanco, C., Aguilar-Vildoso, C., Viera, M. L., Barroso, P. A., Acevedo, J. (2002). Genetic variability in the endophytic fungus *Guignardia citricarpa* isoleted from citrus plants. Genet Mol Biol. **25:** 251-255.

Guillermo-Ramírez, J. (2017). Desarrollo en etapa de vivero de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm sometida a tres dosis de fertilización y dos sustratos. Cultivos Tropicales. **38:** 47-52.

Halfeld-Vieira, B., Mourão, M., Tonini, H., Nechet, K. (2006). Heartrot in homogeneous stands of *Acacia mangium*. Pesqui Agropecu Brasil. **41:** 709-711.

Hanlin, R.T. (1990). Illustrated genera of *Ascomycetes*. Minnesota, USA: APS Press. p. 263.

Hodges, C. S., Reis, M. S., Henfling, J. D. (1976). A cancro do Eucalipto causado por *Diaporthe cubensis*. Fitopatol Bras. **1:** 129-170.

Hung, P. M., Wattanachai, P., Kasem, S., Poeaim, S. (2015). Efficacy of *Chaetomium* species as biological control agents against *Phytophthora nicotianae* Root Rot in citrus. Mycobiology. **43:** 288-296.

Ismail, A. M., Cirvilleri, G., Polizzi, G., Crous, P. W., Groenewald, J. Z., Lombard, L. (2012). *Lasiodiplodia* species associated with dieback disease of mango (*Mangifera indica*) in Egypt. Australas. Pl. Pathol. **41:** 649-660.

Juárez-Palacios, J. C., Honorato-Salazar, A., Vázquez-Silva, L., Parraguirre-Lezama, C. (2013). Patogenicidad de *Chrysoporthe cubensis* en clones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. Madera y Bosques. **19:** 22-29.

Kiraly, Z., Klement, Z., Solymosy, F., Voros, J. (1970). Methods in plant pathology with special reference to breeding for disease resistance. Budapest, Hungría: Academica Kiado. p. 509.

Koch, R. (1876). The etiology of anthrax, based on the life history of *Bacillus anthracis*. Beiträge zur Biologie der Pflanzen. **2:** 277-308.

López-Cardona, N. & Castaño-Zapata, J. Etiología de la muerte descendente del tomate de árbol [*Solanum betaceum* (cav.) sendt.]. Revista de Agronomía. **21:** 7-18.

Mariño, Y. & Rodríguez, M. (2010). El punto de marchitez permanente (PMP) en melina (*Gmelina arborea* L. Roxb) para la costa Caribe colombiana ¿una característica para la selección de clones? Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. **11:** 117-118.

Melo, O. A. (2015). Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de *Gmelina arborea* Roxb., asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia (Tesis Doctoral), Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Mestizo, Y., Bandera, G., Aya, H., Greicy, S., Varon, F., Navia, M., Marinez, G. (2012). Caracterización de síntomas e identificación de microorganismos en palmas de aceite afectadas por la pudrición basal del estípite. Revista Palmas. **33:** 13-27.

Mohali, S., Encinas, O., Mora, N. (2002). Manchado azul en madera de *Pinus oocarpa* y *Azadirachta indica* en Venezuela. Fitopatología Venezolana. **15:** 30-32.

Murillo-Gamboa, O., Salas-Rodríguez, A., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C. (2016). Tasa de avance de la pudrición del tronco en melina *Gmelina arborea* Roxb. y posibilidades de manejo. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. **13:** 40-50.

Obregón, C. (2006). *Gmelina arborea*, versatilidad, renovación y productividad sostenible para el futuro. Revista el mueble y la madera. **50:** 14-20.

Park, J. H., Choi, G. J., Jang, K. S., Lim, H. K., Kim, H. T., Cho, K. Y., Kim, J. C. (2005). Antifungal activity against plant pathogenic fungi of chaetoviridins isolated from *Chaetomium globosum*. FEMS Microbiol Lett. **252:** 309-313.

Pérez-Vera, O. A., Yánez-Morales, M. D., Alvarado-Rosales, D., Cibrian-Tovar, D., García-Díaz, S. E. (2005). Fungi associated to *Eucalyptus*, *Eucalyptus grandis* hill: Maid. Agrociencia. **39:** 311-318.

Rives, N., Acebo, Y., Hernández, A. (2007). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo del arroz (Oryza sativa L.). Perspectivas de su uso en Cuba. Cultivos Tropicales. **28:** 29-38.

Roux, J., Coutinho, T., Mujuni, D., Wingfield, M. (2001). Diseases of plantation *Eucalyptus* in Uganda. S Afr of Sci. **97:** 16-19.

Salas-Rodríguez, A., Murillo-Gamboa, O., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C. (2016). Evidencia de tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. **13:** 30-39.

Sandoval-Sánchez, M., Nieto-Ángel, D., Sandoval-Islas, S. T.-O., Orozco-Santos, M., Silva-Rojas. (2013). Hongos asociados a pudrición del pedúnculo y muerte descendente del mango (*Mangifera indica* L.). Agrociencia. **47:** 61-73.

Selvakumar, G., Kundu, S., Joshi, P., Nazim, S., Gupta, A. D., Mishra, P. K., Gupta, H. S. (2008). Characterization of a cold-tolerant plant growth-promoting bacterium *Pantoea dispersa* 1A isolated from a sub-alpine soil in the North Western Indian Himalayas. World J of Microbiol and Biotechnol. **24:** 955-960.

Schaad, J. (2001). Laboratory Guide for Identification of Plant Pathogenic Bacteria. Paul, United States of America: The American Phytopathological Society. p. 373.

Shanthiyaa, V., Saravanakumar, D., Rajendran, L., Karthikeyan, G., Prabakar, K., Raguchander, T. (2013). Use of *Chaetomium globosum* for biocontrol of potato late blight disease. Crop Protection. **52:** 33-38.

Tejera-Hernández, B., Rojas-Badía, M. M., Heydrich-Pérez, M. (2011). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. Revista CENIC. **42:** 131-138.

Umana, E. J., Akwaji, P. I., Markson, A. A., Udo, S. E. (2015). *Gmelina arborea* Roxb: Associated mycoflora and diseases in Cross River State, Nigeria. Global J Sci Front Res. **15:** 1-11.

Valdés, J. (2014). Identificación de patógenos en *Prosopis glandulosa* en la Región del Sureste del Estado de Coahuila (Tesis de pregrado), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.

Vergara, A., Mercado, T., Jarma, A., Gatti, K. (2017). Water requirement of *Gmelina arborea* on nursery stage under controlled conditions. Floresta e Ambiente. **24:** 10.

Wingfield, M. J. & Robison, D. J. (2004). Diseases and insect pests of *Gmelina arborea*: Real threats and real opportunities. New forests. **28:** 227-243.

Yang, H. J., Cha, Y. J., Kim, H., Choi, S. S. (2016). Antifungal activity of nano and micro charcoal particle polymers against *Paecilomyces variotii*, *Trichoderma virens* and *Chaetomium globosum*. N Biotechnol. **33:** 55-60.

Zhang, L., Birch, R. G. (1997). Mechanisms of biocontrol by *Pantoea dispersa* of sugar cane leaf scald disease caused by *Xanthomonas albilineans*. Journal of Applied Microbiology. **82:** 448-54.

Zhao, W., Bai, J., Mccollum, G., Baldwin, E. (2015). High incidence of preharvest colonization of huanglongbing-symptomatic *Citrus sinensis* fruit by *Lasiodiplodia theobromae* (*Diplodia natalensis*) and exacerbation of postharvest fruit decay by that fungus. Appli and Environ microbiol. **81:** 364-372.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):353-363, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

Artículo original

Ciencias Naturales

Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical

Carlos A. Benjumea-Hoyos*, Mayra A. Suárez-Segura, Silvia Lucía Villabona-González

Grupo de investigación Limnología y Recursos Hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia

Resumen

Los sistemas de aguas dulces son sensibles a modificaciones antrópicas. Las actividades diarias allí en donde el agua es un recurso imprescindible para la industria y el ámbito doméstico aceleran el proceso natural de eutrofización en los ecosistemas acuáticos con el consecuente deterioro de su calidad. Con la finalidad de entender los cambios en el tiempo y el espacio de las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y del total de sólidos en suspensión (TSS) en el río Negro, se recolectó la información en los tramos alto, medio y bajo de la cuenca en las épocas de sequía, durante la transición de la época de lluvias a la sequía y en la época de lluvias desde el 2010 hasta el 2014. Se encontró que las quebradas La Pereira, La Cimarrona y La Marinilla, afluentes del río Negro, son focos de interés ambiental, dado que presentaron mayores concentraciones de nutrientes y de sólidos en suspensión que afectan de manera notoria las aguas del río, en especial en el tramo conocido como Puente Autopista-RN5, donde estas convergen. Además, se evidenció que los fenómenos de variabilidad climática, como el sistema de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en su fase invernal (La Niña), incrementan notablemente las concentraciones de sólidos en suspensión y que los periodos de sequía favorecen el aumento en las concentraciones de nutrientes. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Fósforo; Nitrógeno; Eutrofización; Material suspendido; Cuenca.

Temporary and spatial variation of nutrients and total suspended solids in the basin of a high mountain tropical river

Abstract

Freshwater ecosystems are highly sensitive to anthropic disturbances and daily activities in which water is an essential resource for industrial development and for domestic use have led to speed up early natural eutrophication of aquatic ecosystems resulting in water quality deterioration. In order to understand temporal and spatial changes of nutrients concentrations (nitrogen and phosphorus) and of the total suspended solids in the Río Negro, we collected information from high, medium and low basin stretches during the dry and rainy seasons, as well as during the transition from dry to rainy periods between 2010 and 2014. Our results show that Rio Negro tributary ravines La Pereira, La Cimarrona and La Marinilla are of high environmental priority as they presented the highest concentrations of nutrients and suspended solids and this is negatively affecting the Rio Negro water quality, especially in the stretch known as Puente-Autopista RN5 where these tributaries converge. In addition, we found that climatic variability phenomena such as the ENSO system, in this case, the rainy season (La Niña) seriously impact the river increasing suspended solids concentrations while the dry season favors an increase in nutrient concentrations. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Phosphorus; Nitrogen; Eutrophication; Suspended material; Basin.

Introducción

Los sistemas de agua dulce son sensibles a modificaciones antrópicas, pues a lo largo del tiempo se han usado para depositar los desechos de la acción humana, lo que frecuentemente conlleva la desaparición de algunas de las especies que conforman las comunidades de la hidrobiota o la reducción de su diversidad en general (**Lozano,** 2005). Aunque los cambios naturales en estos ecosistemas, tales como los eventos catastróficos, también pueden alterar las condiciones de equilibrio, las mayores alteraciones tienen como causa las actividades antrópicas. Las actividades diarias en los lugares donde el agua es el recurso imprescindible para el desarrollo de la industria y para las actividades domésticas, así como el constante crecimiento poblacional y los cambios en los usos del suelo, habitualmente producen variaciones en las concentraciones del material en

***Correspondencia:**
Carlos A. Benjumea-Hoyos, cbenjumea@uco.edu.co
Recibido: 9 de octubre de 2018
Aceptado: 17 de diciembre de 2018
Editor: Gabriel Roldán

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

suspensión y de los nutrientes, especialmente el nitrógeno y el fósforo. Ello acelera el proceso natural de colmatación y eutrofización de los ecosistemas acuáticos debido a las descargas de aguas residuales sin ningún tratamiento previo, hecho que es usual en las grandes ciudades (**Oyarzún, *et al*.,** 1997).

Es evidente que la calidad física y química del agua está relacionada con los eventos que ocurren en la cuenca y depende en gran medida del uso del suelo, del tratamiento de los efluentes de aguas servidas y del control de la erosión, entre otros. A nivel mundial hay un buen número de estudios que analizan el comportamiento de distintas variables físicas y químicas a escala de cuenca, en especial las variaciones en los parámetros asociados con los macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y los sólidos en suspensión (**Soria, *et al*.,** 1987; **Rivas, *et al*.,** 2005; **Rivas, *et al*.,** 2009; **Giraldo, *et al*.,** 2010; **Benjumea, *et al*.,** 2014; **Zhang, *et al*.,** 2017; **Mamun, *et al*.,** 2018). El conocimiento de las variaciones en las concentraciones de nutrientes y de sólidos en suspensión a lo largo del tiempo y en los diversos espacios de las fuentes hídricas es de gran relevancia para el desarrollo de las políticas públicas a cargo de las autoridades competentes para la adecuada gestión y control del recurso hídrico superficial en las diferentes cuencas.

Colombia es un país reconocido por la abundancia de sus recursos hídricos y por la gran diversidad biológica que albergan (**IDEAM,** 2014). En la región andina se originan los principales ríos del territorio nacional, los cuales surten las zonas productivas y abastecen directa o indirectamente con sus quebradas y pequeños ríos cerca del 80 % de las cabeceras municipales del país. El río Negro, cuya cuenca se ubica en la región andina, es la fuente de abastecimiento de agua para consumo del municipio de Rionegro y, además, desemboca en el sistema interconectado de embalse de El Peñol - Guatapé, cuyo propósito principal es la generación hidroeléctrica (**Ramírez,** 1986).

Así pues, este río es uno de los principales recolectores de agua del oriente antioqueño, por lo que ha sido objeto de numerosas intervenciones humanas desde el siglo pasado para la disposición de residuos sólidos, de vertimientos domésticos e industriales y la extracción de materiales de construcción; asimismo, su cauce ha sido rectificado en algunos tramos, lo que ha llevado a la pérdida de una gran parte de la cobertura vegetal boscosa en su ronda hídrica. La fuerte presión a la que ha sido sometida su cuenca por el apresurado crecimiento de la población y del sector productivo, que demandan considerables volúmenes de agua, ha limitado la disponibilidad y la calidad de las aguas superficiales para su aprovechamiento (**Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - Cornare,** 2017).

No obstante su importancia, el río Negro se ha estudiado solo a intervalos irregulares de tiempo y de sitios de muestreo, lo que genera ruido en la interpretación de la información recolectada, aunque los aportes de contaminantes de origen doméstico y agrícola continúan registrando altos niveles (**Montoya, *et al*.,** 2007). El presente estudio tuvo como finalidad evaluar las variaciones en el tiempo y el espacio de las concentraciones de nutrientes (formas de nitrógeno y fósforo) y del total de sólidos suspendidos (TSS) en los diferentes tramos de la cuenca alta, media y baja del río Negro durante el periodo comprendido entre 2010 y 2014.

Materiales y métodos

Área de estudio. La cuenca del río Negro está ubicada en el departamento de Antioquia, Colombia, tiene un área de 952 km^2, atraviesa los municipios de La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Guarne, La Ceja, Rionegro y Marinilla y recorre el valle de San Nicolás. Sus principales afluentes son las quebradas La Mosca, La Marinilla, La Cimarrona, La Pereira y La Chachafruto, que se convergen en el río Negro, el cual, finalmente, surte el sistema interconectado de embalses de El Peñol-Guatapé (Figura 1).

El altiplano del oriente antioqueño presenta altitudes entre los 2.100 y los 2.600 msnm y precipitaciones que oscilan entre los 1,800 y los 2.500 mm, con un régimen bimodal de períodos de lluvia entre abril y junio y septiembre y noviembre. Los meses de mayor precipitación son mayo y octubre y los más secos, enero y febrero (**Toro,** 1979).

Entre el 2010 y el 2014 se hicieron muestreos en la época de sequía (febrero-marzo), durante la transición de los periodos de lluvias a los de sequía (junio-julio) y en la época de lluvias (noviembre-diciembre) en siete tramos ubicados en el río Negro (RN1 a RN7) y en 14 ubicados en sus afluentes (quebradas Chachafruto-CH1, La Pereira-P1, P2, P3, La Cimarrona-C1, C2, C3, La Mosca-M1, M2, M3, La Marinilla-MR1, MR2 y MR3 y Compañía Abajo S1). Dichos tramos corresponden a sitios de monitorización continua establecidos por la Cornare, entidad encargada del control y la vigilancia ambiental de la zona (Tabla 1 y Figura 1).

En cada sitio de muestreo se recolectaron muestras de agua subsuperficiales siguiendo las metodologías de la **American Public Health Association - APHA** (2012); se analizaron las concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) con el método macro-Kjeldahl, de nitrógeno amoniacal (NH3-N) mediante destilación y titulación, de nitratos (NO3-N) con el método colorimétrico para cadmio y cobre, de nitritos (NO2-N) con el mismo método y diazotización, de fósforo total mediante la digestión de ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido ascórbico, del total de sólidos por gravimetría y el total de sólidos en suspensión (TSS), también por gravimetría. Las muestras se analizaron en el laboratorio del Centro de Servicios de Análisis de Aguas (CENSA) de la Cornare. Además, se tomaron datos *in situ* del pH y el oxígeno disuelto con una sonda Hach® HQ40d.

Para evaluar el nivel de significación de las diferencias de las formas de nutrientes y los sólidos entre los factores de año, periodo y sitio de muestreo se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis, debido a que los datos no cumplieron los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

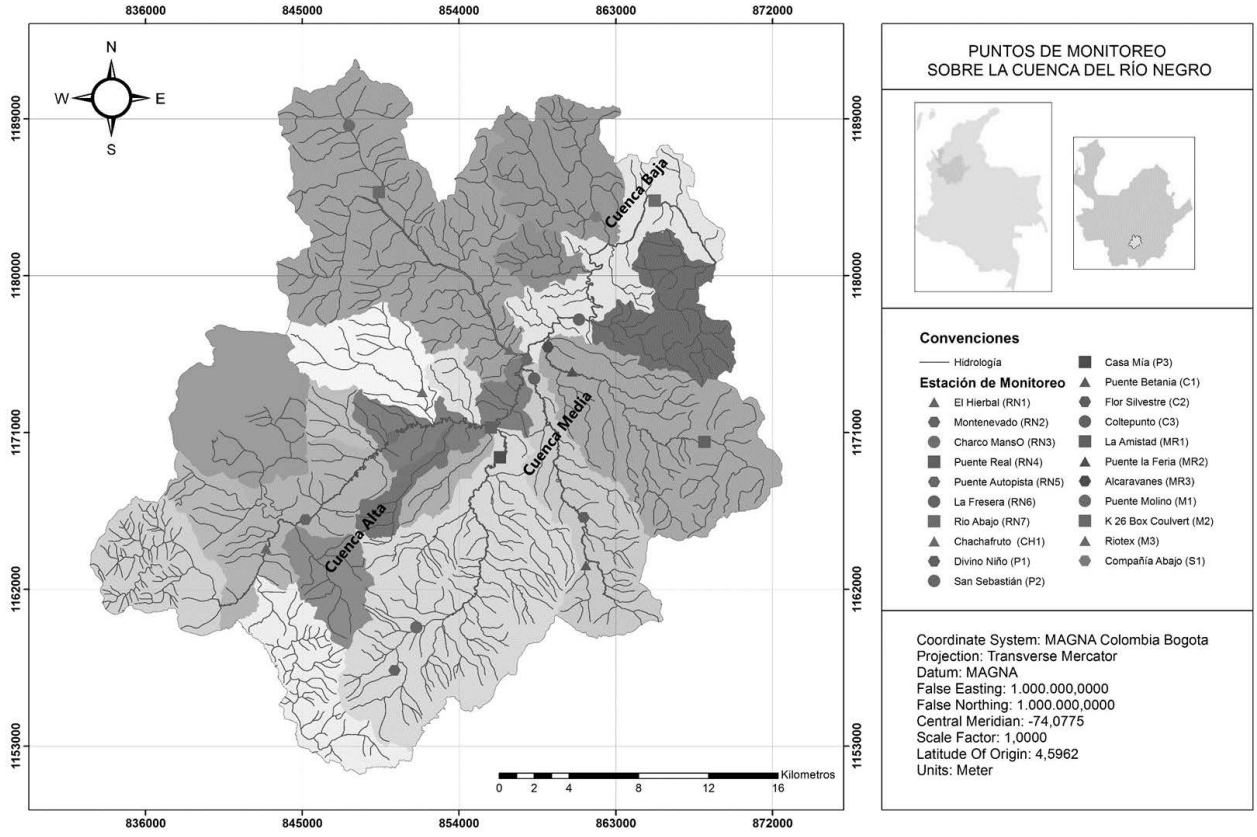


Figura 1. Área de estudio con la ubicación de los 21 sitios en la cuenca del río Negro. Fuente: elaboración propia

varianzas, incluso cuando fueron transformados mediante la raíz cuadrada y el logaritmo natural. En los casos en los que hubo diferencias significativas, se aplicó la prueba U de Mann-Whitney para la comparación de las medianas. La información se procesó con el programa estadístico Rwizard, versión 2.3 (**Guisande, *et al*.,** 2014).

Resultados

El pH varió poco y tendió a la neutralidad (mínimo = 6 unidades; máximo = 7,65 unidades), en tanto que el oxígeno tuvo una amplia variación, con valores entre 0,53 y 7,8 mg/l. Los tramos RN5 y RN6, ubicados en la cuenca media y baja del río Negro, en la cuenca media de La Pereira-P2 y en la cuenca baja de La Marinilla-MR3 presentaron niveles críticos (< 3,0 mg/l) de oxígeno disuelto en algunos de los años (P2 = 0,53 mg/l en el 2010; 2,7 mg/l en el 2011 y 1,7 mg/l en el 2012; RN5 = 0,96 mg/l y RN6 = 1,02 en el 2010; MR3 = 2,6 mg/l en el 2013, y 1,6 mg/l en el 2014).

Las concentraciones del total de sólidos en suspensión (TSS) en la cuenca tuvieron un amplio rango de variación (promedio = 52,53 mg/l, CV = 154,79 %) y oscilaron entre 2,19 y 454 mg/l en el 2010, 3 y 333 mg/l en el 2011, 3 y 172 mg/l en el 2012, 15 y 296,4 mg/l en el 2013 y 15 y 777 mg/l en el 2014. Según los resultados de las pruebas de Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney, los sólidos suspendidos presentaron diferencias significativas entre año y año ($p<0,05$). Específicamente el 2011 se diferenció de los demás años por presentar el valor máximo de la mediana de TSS. El 2014 se diferenció del 2012 porque en el primero de estos años se presentó una mediana mayor debido a la influencia de una gran nube de valores atípicos que incluyó las concentraciones máximas (503 mg/l en RN5 en la transición de sequía a lluvías y 777 mg/l en MR2 en la temporada de lluvias) en tanto que en el segundo año (2012) se presentó la menor mediana de todos los años (Figura 2).

Según estas pruebas, el TSS presentó un gradiente temporal con concentraciones significativamente menores durante la sequía (febrero-marzo), seguidas del periodo de transición (junio-julio) y con las máximas concentraciones en el periodo de lluvias (noviembre-diciembre) (Figura 3). Esta variable también fue significativamente diferente en los sitios, con concentraciones máximas en el RN5 (cuenca media), el CH1 (cuenca alta), y en general en los sitios ubicados en la cuenca baja (Figura 4).

La concentración de nitritos (NO_2-N) tuvo un valor medio de 0,01 mg/l (CV = 162,43 %). La concentración mínima de todos los años fue de 0 mg/l, en tanto que la máxima fue de 0,205 mg/l en el 2010, de 0,15 mg/l en el 2011, de 0,09 mg/l en el 2012, de 0,03 mg/l en el 2013 y de 0,05 mg/l en el 2014. Las medianas de las concentraciones registradas en el 2012 y el 2014 fueron significativamente mayores que las de los demás años y la de la temporada de

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

Tabla 1. Sitios de monitorización en la cuenca del río Negro (tomada y modificada de **Cornare,** 2014)

Cuenca	Sitio	Nombre	Ubicación	Coordenadas			Descripción
				X	Y	Z	
Alta	RN1	El Hierbal	Río Negro	842916	1164354	2147	En jurisdicción del municipio de El Retiro
	RN2	Montenevado		845189	1165991	2144	Kilómetro 5, jurisdicción del municipio de El Retiro
	RN3	Charco Manso		850190	1170728	2110	Kilómetro 14, sector de Llanogrande Jurisdicción del municipio de Rionegro
	CH1	FAC y Bodegas	Quebrada Chachafruto	851929	1173220	2144	En jurisdicción del municipio de Rionegro. Recibe las descargas de Zona Franca y el aeropuerto.
Media	RN4	Puente Real	Río Negro	855819	1171289	2122	En jurisdicción del municipio de Rionegro. Recibe las descargas de la Zona Franca, Hotel las Lomas y Barrio el Porvenir.
	P1	Divino Niño	Cuenca alta quebrada La Pereira	850299	1157350	2161	En jurisdicción del municipio de La Ceja
	P2	San Sebastián	Cuenca media quebrada La Pereira	851564	1159824	2151	En jurisdicción del municipio de La Ceja. Recibe las descargas de la PTAR de ese municipio
	P3	Casa Mía	Cuenca baja quebrada La Pereira	856234	1171174	2124	En jurisdicción del municipio de Rionegro. Recibe algunas descargas domésticas del municipio.
	C1	Puente Betania	Cuenca alta quebrada La Cimarrona	861290	1163373	2172	En jurisdicción del municipio del Carmen de Viboral
	C2	Flor Silvestre	Cuenca media quebrada La Cimarrona	861181	1166121	2159	En jurisdicción del municipio del Carmen de Viboral. Recibe algunas descargas domésticas y agrícolas
	C3	Coltepunto	Cuenca baja quebrada La Cimarrona	858331	1174095	2107	En jurisdicción del Municipio de Rionegro
	RN5	Puente Autopista	Río Negro	857897	117517	2116	En jurisdicción de los municipios de Rionegro y Marinilla. Recoge las descargas de las empresas circundantes.
	M1	Puente Molino	Cuenca alta quebrada La Mosca	847129	1188713	2159	En jurisdicción del municipio de Guarne
	M2	Km 26 *box coulvert*	Cuenca media quebrada La Mosca	849416	1184781	2160	En jurisdicción del municipio de Guarne. Recibe algunas descargas.
	M3	Riotex	Cuenca baja quebrada La Mosca	857323	1175448	2085	En inmediaciones de los municipios de Rionegro y Marinilla. Recibe descargas de las empresas circundantes.
Baja	MR1	La Amistad	Cuenca alta quebrada La Marinilla	868080	1170499	2151	En jurisdicción del municipio de Marinilla
	MR2	Puente La Feria	Cuenca media quebrada La Marinilla	860494	1174492	2109	En jurisdicción del municipio de Marinilla. Recibe descargas domésticas
	MR3	Alcaravanes	Cuenca baja quebrada La Marinilla	859105	1175904	2110	En jurisdicción del municipio de Marinilla. Recibe descargas piscícolas.
	RN6	La Fresera	Río Negro	860887	1177457	2075	En inmediaciones de los municipios de Rionegro y Marinilla
	S1	Compañía abajo	Quebrada El Salado	861837	1183402	2125	Recibe las aguas residuales del municipio de San Vicente.
	RN7	Río abajo	Río Negro	865249	118430	1974	Ubicado en el cierre de la corriente principal del río Negro, desemboca en el embalse de Guatapé.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

sequía fue mayor a las de los otros dos periodos (Figuras 2 y 3). Espacialmente, el RN5 (cuenca media), el RN7 (cuenca baja) y la cuenca baja de La Cimarrona-C3 fueron los tramos con mayor concentración de nitritos (Figura 4).

La concentración de fósforo total presentó un promedio de 0,23 mg/l (CV = 97,25 %) y rangos de variación muy heterogéneos en toda la cuenca. En el 2010 las concentraciones se encontraron en un rango de 0,11 a 1,25 mg/l, en el 2011 de 0,10 a 0,58 mg/l, en el 2012 de 0,06 a 2,36 mg/l, en el 2013 de 0,05 a 0,61 mg/l y en el 2014 de 0,09 a 1,31 mg/l. Esta variable varió de manera significativa entre un año y otro, con concentraciones mayores en el 2010 y el 2012 (Figura 2). Espacialmente también registró diferencias significativas al presentar concentraciones máximas en el RN5 (cuenca media) y en la cuenca media de la quebrada La Mosca-M2, donde se registró el valor máximo de todo el estudio (2,36 mg/l) durante la temporada de sequía del 2014 (Figura 4).

El nitrógeno total Kjeldahl (NTK) también presentó una gran variación, con valores entre 0,34 y 9,2 mg/l en el 2010; 0,29 y 7,5 mg/l en el 2011; 0,87 y 10 mg/l en el 2012; 1, 5,2 mg/l en el 2013, y 1 y 10,54 mg/l en el 2014 (promedio = 1,81 mg/l, CV = 83,62 %). Los años 2010 y 2014 y los tramos medios de las quebradas La Pereira-P2, La Cimarrona-C2 y La Mosca-M2 se diferenciaron significativamente por presentar las mayores concentraciones de este nutriente (Figuras 2 y 4).

Asimismo, las concentraciones de nitrógeno amoniacal (NH_3-N) tuvieron un amplio rango de variación en los años de estudio (promedio = 0,80 mg/l, CV = 120,79 %), oscilando de 0,09 a 6,2 mg/l en el 2010, de 0,2 a 2,6 mg/l en el 2011, de 0,5 a 8,6 mg/l en el 2012, de 0,4 a 2,9 mg/l en el 2013 y de 0,4 a 7,11 mg/l en el 2014. Los años 2010, 2012 y 2014 se diferenciaron significativamente de los demás porque en ellos se registraron las concentraciones máximas de amonio (Figura 2). Asimismo, el tramo RN5 ubicado en la cuenca media del río Negro, los tramos medios de las quebradas La Pereira-P2 y La Cimarrona-C2 y los tramos medio y bajo de La Mosca-M2 y M3 se diferenciaron de los demás por presentar las mayores concentraciones de esta forma de nitrógeno (Figura 4).

Los nitratos (NO_3-N) tuvieron la menor fluctuación de todas las variables analizadas, con un promedio de 0,12 mg/l, un CV = 72,96 % y concentraciones entre 0 a 0,3 mg/l en los años 2010, 2011 y 2012, de 0 a 0,2 mg/l en el 2013 y de 0 a 0,6 mg/l en el 2014, es decir, no presentaron

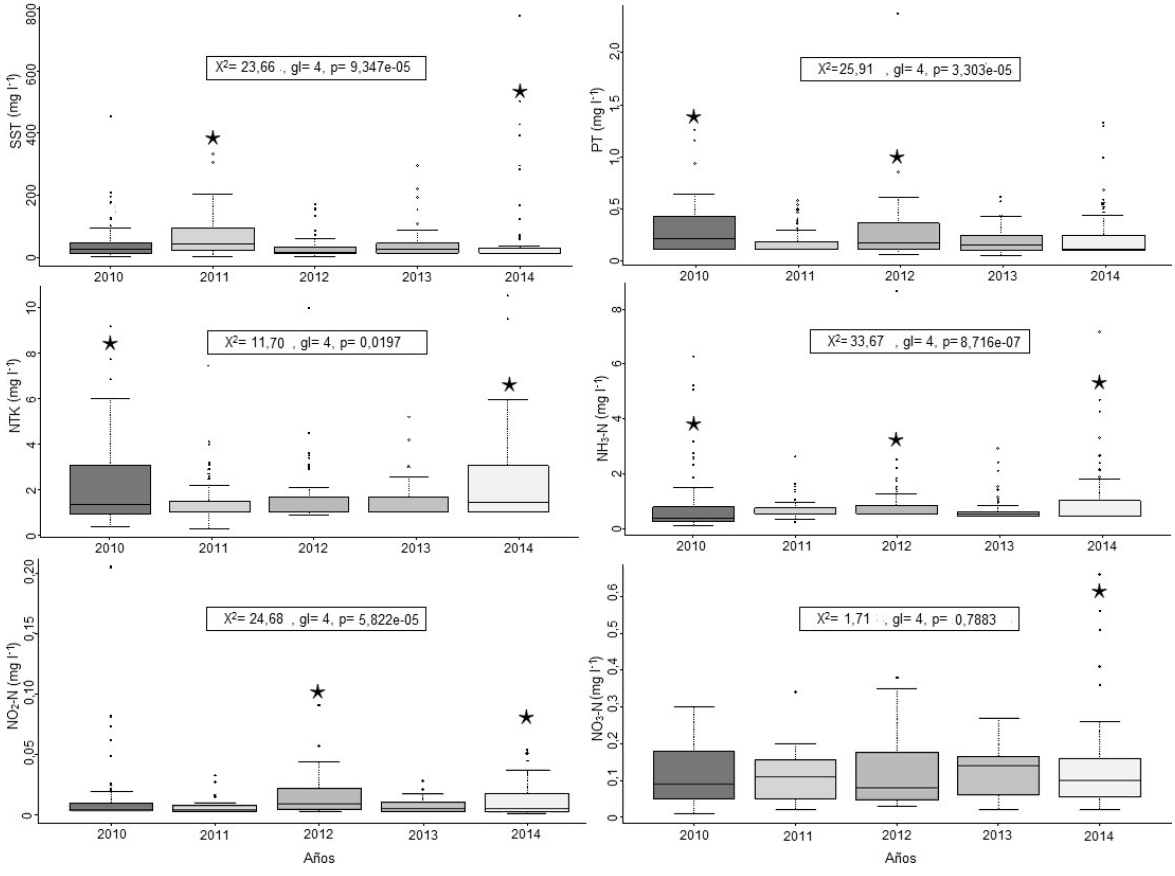


Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de nutrientes y del total de sólidos en suspensión en los años analizados. Valores de p de Kruskal-Wallis

⋆ Casos que presentaron diferencias significativas

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

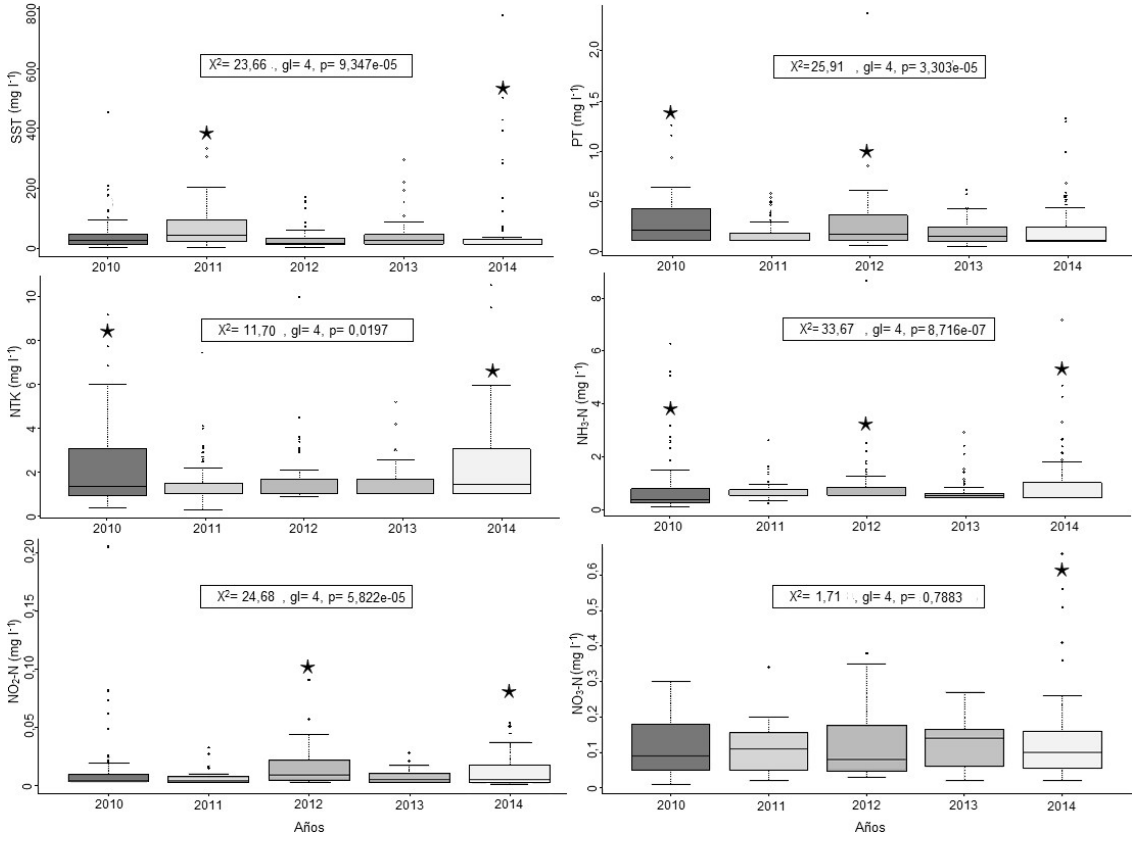


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de nutrientes y sólidos suspendidos totales en los periodos de muestreo. Valores de p de Kruskal-Wallis
⋆ Casos que presentaron diferencias significativas

diferencias significativas entre los años (p>0,05) (Figura 2). Sin embargo, los tramos ubicados en la cuenca media y baja del río Negro, RN5, RN6 y RN7, los tres tramos de la quebrada La Pereira, P1, P2 y P2, los de La Cimarrona, C1, C2 y C3 y los de La Marinilla, MR1, MR2 y MR3, presentaron concentraciones significativamente superiores a las de los demás tramos (Figura 4).

El fósforo total, el nitrógeno total (NTK), el amonio (NH_3-N) y los nitratos (NO_3-N) tuvieron el mismo patrón en las temporadas de muestreo, con concentraciones significativamente mayores durante la sequía (febrero-marzo) y la transición entre la temporada de lluvias y la sequía (junio-julio) (Figura 3).

Discusión

El pH y el oxígeno disuelto (OD) son variables importantes para las actividades metabólicas de los organismos acuáticos que descomponen la materia orgánica, por lo que su variación en los sistemas acuáticos refleja la incidencia de dichos procesos y la presencia de este tipo de material. La cuenca del río Negro se encuentra en la alta montaña, por lo que el pH tiende a la neutralidad, algo usual en estos sistemas. Los valores de pH hallados para toda la cuenca presentaron similitud con lo reportado por **Cadavid, *et al.*** (2010) para la misma zona de estudio. **Roldán & Ramírez** (2008) reportaron que en aguas naturales el pH tiende a estar en un rango de 6,0 a 9,0 unidades. Asimismo, en ríos de alta montaña **Abril, *et al.*** (2010) reportaron valores de pH en ese mismo rango, y en aquellos tramos en los que se reportó tendencia hacia la acidez (<6 unidades de pH) esta se asoció con la descomposición de materia orgánica. En tramos de sistemas lóticos de alta montaña en Santander, Colombia, se han obtenido valores neutros en la mayor parte de los sistemas analizados; sin embargo, algunos tramos presentaron valores ácidos (<6 unidades de pH), lo cual también se atribuyó al elevado contenido de materia orgánica procedente de la vegetación circundante (**Ramírez & Plata,** 2008).

La tendencia a registrar bajas concentraciones de oxígeno disuelto indica un gran consumo de este gas, posiblemente por microorganismos, ya que la oxidación de la materia orgánica es el principal factor de consumo (**Roldán & Ramírez**, 2008). En muchos casos dichos valores indican hipoxia en la cuenca y reflejan, asimismo, su perturbación por la presencia de otras sustancias que ocupan el espacio de las moléculas de oxígeno. Según lo reportado por **Benjumea & Álvarez** (2017), en la cuenca media del río Negro las bajas concentraciones de oxígeno se asocian principalmente

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

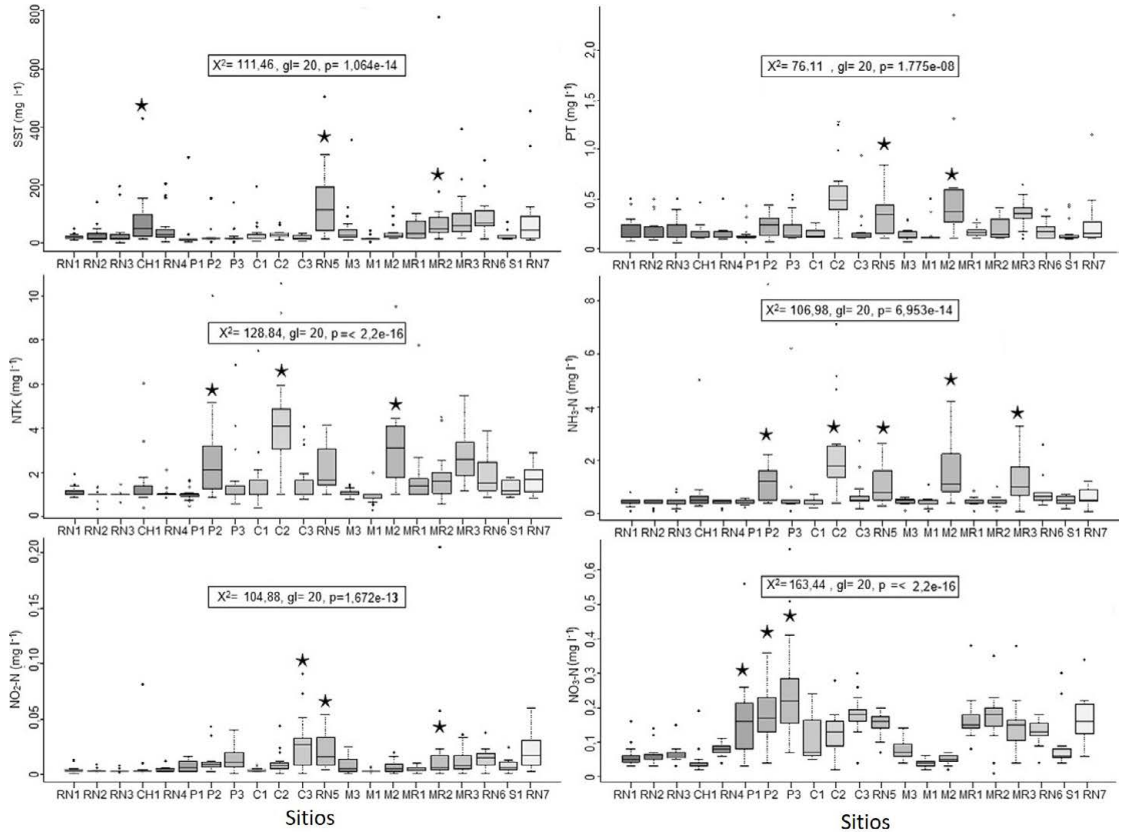


Figura 4. Diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de nutrientes y sólidos suspendidos totales en los sitios de muestreo del río Negro. Valores de p de Kruskal-Wallis
⋆ Casos que presentaron diferencias significativas

con los vertimientos de origen doméstico e industrial con un escaso tratamiento y, en menor medida, con la demanda bental por los sedimentos.

Entre los tramos con niveles críticos de oxígeno disuelto está la cuenca baja de la quebrada La Marinilla-MR3, cuerpo hídrico que ingresa en lo que se denomina cuenca media del río Negro. Este sitio (MR3) recibe las descargas de aguas residuales de los municipios de Marinilla y El Santuario. En este mismo sector (MR3) **Cadavid, *et al.*** (2010) reportaron un índice de calidad fisicoquímica ponderado como de calidad media, lo cual indica una afectación en el ecosistema acuático en este tramo de la cuenca que provoca el déficit de oxígeno, lo cual contribuye a la desaparición de organismos y especies presentes en ella. Además, **Benjumea** (2018) reportó un comportamiento similar de esta variable, registrando las concentraciones de oxígeno disuelto más bajas en la cuenca media del río Negro (Puente Autopista-RN5).

Montoya, *et al.* (2007) concluyeron que en el río Negro hay un elevado nivel de transporte de sólidos provenientes de la carga orgánica de las aguas residuales domesticas e industriales. Dichas concentraciones comienzan con valores bajos en la parte alta de la cuenca, pero a medida que desciende aumentan a valores medios. En el presente estudio, dicho gradiente espacial no fue muy claro en el 2011 y el 2014, cuando, en general, los sólidos en suspensión presentaron concentraciones consideradas como altas (**Sierra,** 2011; **Ospina-Zúñiga, *et al.*,** 2015). Estos incrementos, influenciados por la variabilidad climática y las fuertes precipitaciones, son producto de la erosión del suelo (**Tayupanta,** 1993), siendo muy susceptibles los suelos que carecen de su cobertura vegetal, sobre todo cuando en ellos se realizan prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas, como ocurre en la cuenca del río Negro. En consecuencia, las altas variaciones temporales del TSS están asociadas principalmente con el ciclo hidrológico y tienden a aumentar en la época lluviosa y a disminuir en la seca. Este aumento en la carga de sólidos cobra gran relevancia en lo concerniente a la calidad del recurso hídrico y el ordenamiento de las cuencas hidrográficas, ya que tiene una relación directa con la producción de sedimentos y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. En diversos estudios se ha demostrado que el deterioro ambiental de varias cuencas a nivel nacional se ha asocia con la carga de sedimentos (**Restrepo, *et al.*,** 2015; **Restrepo & Escobar,** 2016).

La quebrada La Marinilla, en donde se halló una concentración atípicamente alta de sólidos en suspensión en el 2014, es el tributario que aporta el mayor volumen de

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

agua al río Negro, con registros de caudal en el 2010 que sobrepasaron los 25 m^3/s en el sitio Alcaravanes (**López,** 2011). Dicha quebrada tiene una gran capacidad de arrastre de sedimentos por el caudal y por la poca presencia de vegetación en sus orillas, lo que facilita incluso más el incremento de sólidos suspendidos en la columna de agua. Además, el incremento de los sólidos en esta fuente de agua también se debe a la intervención del cauce natural a finales del 2012 para modificar el ancho del canal, ya que en épocas de invierno se presentaban graves inundaciones. A partir de ese año se han ido ejecutando proyectos en las llanuras de inundación que han generado grandes movimientos en masa, como los ocurridos en el 2014.

En cuanto a la presencia de fósforo y nitrógeno en el agua, estos macronutrientes son esenciales para el desarrollo de la actividad metabólica del sistema hídrico, por lo que las alteraciones en sus niveles de concentración hacia arriba o hacia abajo perturban al ecosistema acuático (**Feria, *et al*.,** 2014). Durante el presente estudio se presentaron concentraciones considerablemente altas de fósforo, especialmente en algunos puntos de la cuenca media. Es probable que el aporte de este macronutriente provenga de la escorrentía y del lavado de las pendientes circundantes de la cuenca, lo cual propicia la erosión del suelo en donde los fertilizantes fosfatados están presentes por la actividad agrícola. En la cuenca media del río Negro **Forero, *et al*.** (2014) reportaron valores de fósforo total inclusive mayores que los registrados en este estudio, específicamente en la zona que comprende los tramos medios de las quebradas La Pereira-P2, La Cimarrona-C2 y La Mosca-M2, asociándolos con las actividades industriales y agropecuarias.

Las concentraciones de fósforo total registradas para toda la cuenca del río Negro durante el periodo de interés se consideran altas según varias fuentes, entre ellas la **Environmental Protection Agency - EPA** (2002, 2006), que consideran que concentraciones mayores a 0,04 mg/l, como las halladas en todos los casos del presente estudio, conllevan la eutrofización de ríos y lagos. Las concentraciones aquí registradas probablemente se deben a los aportes alóctonos provenientes de las llanuras de inundación y de los vertimientos domésticos con escaso tratamiento, toda vez que las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales que hacen sus vertimientos en la cuenca no cuentan con procesos terciarios, que son los indicados para la remoción de macronutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

Estos aportes de nitrógeno y fósforo favorecen la eventual eutrofización en los sistemas leníticos, en este caso el embalse de El Peñol-Guatapé, y se relacionan directamente con lo reportado por **Uribe & Roldán** (1975), **Roldán, *et al*.** (1984) y **Aguirre, *et al*.** (2007), quienes ya para la fecha de sus investigaciones clasificaban el embalse como un sistema eutrófico incipiente, y planteaban la necesidad de hacer un tratamiento adecuado de las aguas vertidas en las cuencas de influencia al embalse para la mitigación del problema.

Las concentraciones de NTK son típicas de ambientes con un grado de intervención considerable y son similares a las halladas en algunos ríos tropicales estudiados en Venezuela (**Rivas, *et al*.,** 20009). Al ser este parámetro una combinación del nitrógeno orgánico en sus diversas formas con el amoniacal, su registro indica la presencia de vertimientos, posiblemente de tipo doméstico, los cuales son ricos en estos compuestos. Esto también afecta la concentración de oxígeno disuelto debido a los procesos de nitrificación que demandan los compuestos nitrogenados. **Giraldo, *et al*.** (2010) reportaron procesos similares en el río Medellín, sistema acuático urbano de montaña similar al río Negro.

Las concentraciones máximas de NH_3-N registradas en el 2012 y el 2014 se consideran altas, lo cual también se registró en el río Medellín, en donde hubo condiciones críticas debido a concentraciones que han alcanzado los 8 mg/l de NH_3-N en el tramo ubicado después de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Fernando (**Giraldo, *et al*.,** 2010). Los resultados en la cuenca del río Negro reflejan que las fuentes de contaminación por nitrógeno se asocian con los vertimientos de aguas residuales y los procesos agrícolas con fertilizantes nitrogenados que llegan por escorrentía al sistema. La **EPA** (2002; 2006) considera que las concentraciones que superan los 0,76 mg de NT/l, como las halladas en el 24 % de las muestras analizadas, pueden potenciar la eutrofización en ríos y en sistemas leníticos. La **Organización Mundial de la Salud** (2006), por su parte, ha establecido que las concentraciones naturales de NH_3-N en las aguas superficiales suelen ser menores a 0,2 mg/l, pero cuando hay contaminación directa o difusa causada, por ejemplo, por las excretas del ganado, las concentraciones aumentan a 3 mg/l. Esto se observó en el 2010 en la cuenca baja de las quebradas La Pereira-P3 y La Marinilla-MR3 y en la cuenca alta de la quebrada Chachafruto-CH1, así como en el 2012 en la cuenca media de la quebrada La Pereira-P2, y en el 2014 en la cuenca media de las quebradas La Cimarrona-C2 y La Mosca-M2, y en la cuenca baja de la quebrada La Marinilla-MR3. Por otra parte, la **Agencia Europea para el Medio Ambiente** - **EEA,** (2000, 2005) recomienda concentraciones máximas de 0,35 mg NH_3-N/l en los cuerpos de agua naturales, por lo que solamente el 13 % de las concentraciones halladas durante todo el periodo de estudio cumplirían con esta recomendación.

Las concentraciones del ion NO_2- son menores que las de NO_3- debido a su rápida asimilación por las bacterias responsables de la transformación a este último estado oxidativo del nitrógeno, esencial para la síntesis de proteínas, que es la forma en que las plantas y las algas lo incorporan a su sistema. **Alonso** (2005) reporta que valores máximos de 0,035 mg/l de NO_2- como los hallados en los muestreos de 2010, 2012 y 2014 en algunos tramos de la cuenca media y baja del río Negro (RN5, RN6 y RN7) y de las quebradas La Marinilla, Chachafruto, La Cimarrona y La Pereira, pueden ser tóxicos para los organismos. **Camargo, *et al*.** (2005) han

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.777

señalado que una concentración máxima de 2 mg/l de NO_3- tiende a perturbar las especies más sensibles del sistema. Sin embargo, en ninguno de los sitios se halló este valor en las concentraciones del ion NO_3-.

Los altos niveles de nitrógeno hallados en los afluentes La Pereira y La Cimarrona corroboran la presencia de asentamientos poblacionales en las llanuras de inundación, de prácticas de minería ilegal, de descargas no controladas y de la poca capacidad auto-depuradora de la cuenca en este tramo, a lo cual se añade, además, el déficit de oxígeno debido al consumo de los microorganismos para la oxidación de NH3-N a NO3-N.

Aunque dichos nutrientes son esenciales para los procesos enzimáticos de la producción primaria, concentraciones elevadas como las halladas conllevan la proliferación de las plantas acuáticas cuya presencia limita la disponibilidad del oxígeno, lo que proporciona ambientes anóxicos (**Canet, *et al*.,** 2006), altera las condiciones de la calidad del agua y afecta la presencia y la proliferación de muchas especies de hidrobiota.

El inadecuado uso del suelo y las distintas actividades antrópicas, como la ganadería extensiva y la marcada deforestación, que se presentan en las llanuras de inundación de las quebradas La Pereira, La Cimarrona y La Marinilla (**Cornare,** 2006), claramente afectan la calidad del agua del tramo medio de la cuenca del río Negro, en especial la del sitio RN5. Procesos similares se evidenciaron en la cuenca del río Yeongsan (Corea del sur), donde las malas prácticas ganaderas y los aportes de las plantas de tratamiento de aguas residuales constituían la mayor fuente de aumento de estos macronutrientes (**Mamun, *et al*.,** 2018).

En los demás tramos estudiados la calidad del agua fue aceptable según los resultados del estudio y concuerdan con lo reportado por **Cadavid, *et al*.** (2010) y **Montoya, *et al*.** (2011). Este comportamiento de variación espacial en el sentido del flujo de la corriente marca un gradiente característico en las concentraciones de nutrientes a medida que se avanza cuenca abajo del río Negro. Es claro, entonces, cómo un ecosistema cambia continuamente entre su cuenca alta y su desembocadura según los elementos que lo componen y sus interrelaciones (**Vannote, *et al*.,** 1980). A ello se añade el proceso de asimilación, retención y transformación de los nutrientes en su recorrido aguas abajo de la cuenca (**Webster & Patten,** 1979; **Elwood, *et al*.,** 1981), proceso que incluye los sistemas de aprovechamiento y utilización biológica, además del transporte de nutrientes aguas abajo.

En los afluentes del río Negro se han hecho estudios que registran la mala calidad del agua con base en los índices de calidad ambiental. En un estudio previo realizado en la misma cuenca por **Forero, *et al*.** (2014), los tramos medios de las quebradas La Pereira-P2 y La Cimarrona-C2 se clasificaron como de capacidad ambiental muy baja. Especialmente el tramo P2 apareció como el punto más crítico, no solo por los vertimientos puntuales provenientes de la zona urbana del municipio de La Ceja sin ningún tratamiento previo, sino también por la presencia de suelos destinados a la actividad ganadera (**Cornare,** 2006).

En el estudio de **Montoya, *et al*.** (2011) en cinco sitios del río Negro, el RN5 se registró como el de peores condiciones de calidad biológica, física y química, con el agravante de que en este sector el río recibe el aporte de las quebradas La Pereira, La Cimarrona y La Mosca, todas con una calidad biológica crítica (**Montoya, *et al*.,** 2007). **Cornare** (2017) ha señalado que la quebrada La Cimarrona pasa por toda el área urbana del municipio del Carmen de Viboral, el cual está en constante expansión poblacional, lo que incrementa la degradación de la calidad del agua. Además, sus altas pendientes propician el socavamiento del cauce, lo que incrementa los caudales (**Montoya & Montoya,** 2009) y facilita el transporte del nitrógeno debido al lavado de los suelos.

El registro de mayores concentraciones de fósforo total, nitrógeno total (NTK), amonio (NH3-N) y nitratos (NO3-N) en las temporadas de sequía y transición sugiere que la presencia de materia orgánica es bastante alta y que el menor volumen del caudal en estas épocas no permite la dilución de los nutrientes. Un resultado similar se presentó en el estudio de **Toja, *et al*.** (2003) en los ríos Agrío y Guadimar en España, donde hallaron concentraciones mayores de nitrógeno y fosfatos en épocas de estiaje, atribuyendo la poca dilución de los vertidos al escaso caudal del río. Resultados similares se encontraron en el estudio previo de **Montoya, *et al*.** (2011) en el río Negro, donde los máximos valores registrados de NO3-N y fósforo total se midieron en el periodo de sequía parcial del 2007.

Al comparar los años se observó un patrón contrario, pues los valores extremos de las concentraciones de fósforo total y NO3-N en el 2010 se asociaron con un cambio sustancial en las precipitaciones por efecto del fenómeno de La Niña (**García, *et al*.,** 2012; **Turbay, *et al*.,** 2014), el cual produjo un aumento abrupto en aquellos caudales más proclives a producir movimientos en masa que aportan sólidos al río y propician el aumento de las concentraciones de nutrientes debido a la presencia de fertilizantes nitrogenados y excretas del ganado, los cuales son ricos en NH3-N (**Ávila & Sansores,** 2003). En la cuenca del río Negro esto se intensifica debido a las altas pendientes y a los diversos usos del suelo, como el agropecuario (**Cornare,** 2006; 2017). En el río Fuyang, norte de China, se obtuvieron resultados parecidos, también asociados con las estaciones del clima, con mayores concentraciones de nitrógeno y fósforo en la temporada de lluvias que en la estación seca (**Zhang, *et al.,*** 2017).

En conclusión, puede afirmarse que los impactos causados por los diferentes usos del suelo y la escasez de cobertura vegetal de la ronda hídrica de las quebradas La Pereira, La Cimarrona y La Mosca, ubicadas en la cuenca media, las convierten en puntos críticos de vertimiento de nutrientes y, por lo tanto, en focos de interés ambiental en el río Negro, especialmente en el tramo Puente Autopista-

RN5, y en las temporadas de sequía y transición, cuando disminuye la capacidad depuradora del río por la disminución del caudal.

En la parte baja de la cuenca, en especial el tramo Río Abajo-RN7, de gran importancia por su desembocadura en el embalse de El Peñol-Guatapé, se registraron menores concentraciones de nutrientes comparadas con los tramos restantes pese a que allí el río Negro ya ha pasado por la zona urbana del municipio de Rionegro y ha recibido los aportes de todos los tributarios que conforman la cuenca, lo cual se explicaría a su capacidad de depuración de la carga orgánica y a la reaireación que encuentra en su recorrido. Además, el tramo Río Abajo-RN7 no está sometido a la presión de los asentamientos poblacionales que generan efectos negativos en la calidad del agua.

La variación de los sólidos en suspensión se ve influenciada por fenómenos climáticos como el sistema ENOS, particularmente por la fase invernal de La Niña, que produce un incremento drástico en su concentración, principalmente en los tramos donde el cauce ha sido rectificado, dando como resultado un incremento importante en la carga de sedimentos transportados aguas abajo.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron activamente en cada una de las fases del estudio y en la elaboración del manuscrito, así como en todo lo concerniente a la gestión, procesamiento, análisis y discusión de la información.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del semillero de investigación Limnología y Recursos Hídricos del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Oriente, y a Cornare por la colaboración y el suministro de información.

Referencias

Abril, A., Álvarez, C., Amado, A., Bonilla, C., Bueno, JC., García, J., Gutiérrez, M., Guzmán, A., Martínez, AM., Mayorga, A., Medrano, M., Moreno, N., Patiño, M., Pinilla-Buitrago, G., Pinto, I., Reinales, S., Rojas, A., Urrego, O. (2010). Estudio de ecosistemas terrestres y acuáticos ubicados en el Parque Nacional Natural Cueva de los Guácharos (Acevedo, Huila). Bogotá D.C., Colombia, p. 182.

Aguirre, N., Palacio, J., Ramírez, J. (2007). Características limnológicas del embalse el Peñol-Guatapé, Colombia. Revista de Ingenierías Universidad de Medellín. **6** (10): 53-66.

Alonso, A. (2005). Valoración de la degradación ambiental y efectos ecotoxicológicos sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares (Madrid), España.

American Public Health Association - APHA. (2012). Standard methods for the examination of water and waste water. 22st ed. American Public Health Association, Washington, DC. USA: APHA, AWWA, WEF. p. 1496.

Ávila, J.P. & Sansores, A.C. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería Revista Académica. **7** (2): 47-54.

Benjumea, C.A. (2018). Determinación de coeficientes de degradación de materia orgánica en el río Negro. Bionatura. **3**. Doi: 10.21931/RB/2018.03.01.10

Benjumea, C.A. & Álvarez G. (2017). Demanda de oxigeno por sedimentos en diferentes tramos del río Negro, Rionegro, Antioquia, Colombia. Producción + Limpia. **12** (2): 131-146.

Benjumea, C.A., Bedoya, C., Álvarez, D. (2014). Evolución en la carga de nutrientes de ríos de montaña que fluyen a un embalse, cuenca media del río Magdalena. Revista EIA. **11** (22): 71-85.

Cadavid Gallego, J.C., Echeverri Ruiz, J.D., Gómez Gutiérrez, A.E. (2010). Modelación índices de calidad de agua (ICA) en las cuencas de la región Cornare. Gestión y Ambiente. **13** (2): 7-24.

Camargo, J.A., Alonso, A., Salamanca, A. (2005). Nitrate toxicity to aquatic animals: A review with new data for freshwater invertebrates. Chemosphere. **58:** 1255-1267.

Canet, R., Ribó, M., Pomares, F., del Remedio Albiach, M. (2006). Caracterización y potenciales impactos ambientales de las deyecciones ganaderas. Conferencia sobre gestión integral de deyecciones ganaderas. Giro, gestión integral de residuos orgánicos (23-37).

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - Cornare. (2006). Plan de ordenación y manejo de la cuenca La Pereira, Municipio de La Ceja Del Tambo. El Santuario.

Cornare. (2017). Cuencas. Fecha de consulta: 28 de agosto de 2017. Disponible en: http://www.cornare.gov.co/corporacion/division-socio-ambiental/cuencas

Agencia Europea para el Medio Ambiente - EEA. (2000). Nutrients in European ecosystems. Environmental Assessment Report No 4. European Environment Agency, Copenhagen. p. 156.

Agencia Europea para el Medio Ambiente - EEA. (2005). Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. Environmental Assessment Report No 7. European Environment Agency, Copenhagen. p. 52.

Elwood, J.W., Newbold J.D., Trimble, A.F., Stark, R.W. (1981). The limiting role of phosphorus in a woodland stream ecosystem: effects on P enrichment on leaf decomposition and primary producers. Ecology. **62:** 146-158

Environmental Protection Agency - EPA. (2012). Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Rivers and Streams. Fecha de consulta: septiembre y octubre de 2017. Disponible en: http://www.epa.gov/waterscience/criteria/nutrient/guidance/index.html

Environmental Protection Agency EPA. (2006). National recommended water quality criteria. US Environmental Protection Agency. Washington, DC. p. 23.

Feria-Díaz, J.J., Bermúdez-Roa, S., Estrada-Tordecilla, A.M. (2014). Eficiencia de la semilla *Moringa oleifera* como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. Producción + Limpia. **9** (1): 9-22.

Forero, L.C., Longo, M., Ramírez, J.J., Chalar, G. (2014). Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICERN-MAE), Colombia. Revista de Biología Tropical. **62** (2): 231-245.

García, M.C., Botero, A.P., Quiroga, F.A.B., Robles, E.A. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería. **36:** 60-64.

Giraldo, L.C., Agudelo, R.A., Palacio, C.A. (2010). Spatial and temporal variation of nitrogen in the Medellin River. DYNA. **77** (163): 124-131.

Guisande, C., Heine, J., González-DaCosta, J., García-Roselló, E. (2014). RWizard Software. Vigo, España: Universidad de Vigo.

IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, Colombia.

López, J.D.C. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada La Marinilla (ANT). Boletín de Ciencias de la Tierra. **30:** 107-118.

Lozano, L.O. (2005). La bioindicación de la calidad del agua: importancia de los macroinvertebrados en la cuenca alta del Río Juan Amarillo, Cerros Orientales de Bogotá. Umbral Científico. **7:** 5-11.

Montoya, Y., Acosta, G., Zuluaga, Z. E., García, A. (2007). Evaluación de la biodiversidad de insectos acuáticos y de calidad fisicoquímica y biológica del río Negro (Antioquia-Colombia). Revista Universidad Católica de Oriente. **23:** 70-87.

Mamun, M., Lee, S. J., An, K. G. (2018). Temporal and spatial variation of nutrients, suspended solids, and chlorophyll in Yeongsan watershed. Journal of Asia-Pacific Biodiversity. **11** (2): 206-216.

Montoya, Y., Acosta, Y., Zuluaga, E. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río Negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices ICA, el BMWP/COL y el ASPT. Caldasia. **33** (1): 193-210.

Montoya, Y. & Montoya, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. **8** (15): 31-38.

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1. Fecha de consulta: septiembre y octubre de 2017. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_fulll_lowsres.pdf

Ospina-Zúñiga, O., García-Cobas, G., Gordillo-Rivera, J., Tovar-Hernández, K. (2015). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). Ingeniería Solidaria. **12** (19): 19-36.

Oyarzún, C. E., Campos, H., Huber, A. (1997). Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). Revista Chilena de Historia Natural. **70:** 507-519.

Ramírez, C., A. M & Plata-Díaz, Y. (2008). Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (Páramo de Santurbán, Norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. Acta Biológica Colombiana. **13:** 199-215.

Ramírez, J. J. (1986). Fitoplancton de red en el embalse de El Peñol, Colombia. Actualidades Biológicas. **15** (56): 2-13.

Restrepo, J. D. & Escobar, H. A. (2016). Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. Geomorphology. **302:** 76-91. Doi: 10.1016/j.geomorph.2016.12.013

Restrepo, J.D., Kettner, A.J., Syvitskib, J.P.M. (2015). Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. Anthropocene. **10:** 13-28. Doi: 10.1016/j.ancene.2015.09.001

Rivas, Z., Márquez, R., Troncone, F., Sánchez, J., Colina, M., Hernández, P. (2005). Contribución de principales ríos tributarios a la contaminación y eutrofización del Lago de Maracaibo. Ciencia. **13** (1): 68-77.

Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., Ledo, H., Colina, M., Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. Interciencia. **34** (5): 308-314.

Roldán, G., Correa, M., Machado, T., Ramírez, J. J., Velásquez, L., Zuluaga, F. (1984). Estudio limnológico de la represa de El Peñol. Actualidades Biológicas. **13** (50): 94-105.

Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical 2ª Edición. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. p. 440.

Sierra, C. (2011). Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. 1ª edición. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Medellín. p. 457.

Soria, J.M., Miracle M.R., Vicente E. (1987). Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia. Limnetica. **3** (2): 227-242.

Tayupanta, J. R. (1993). La erosión hídrica: proceso, factores y formas. INIAP Archivo Histórico. Quito. p. 18.

Toja, J., Alcalá, E., Martín, G., Solà, C., Plans, M., Burgos, M., Prat, N. (2003). Evaluación del efecto del vertido tóxico sobre la calidad del agua y los sedimentos de los ríos Agrio y Guadiamar. Sevilla, España: Ciencia y Restauración del río Guadiamar, Consejería de Medio Ambiente. p. 78-92.

Toro, G. (1979). Suelos del Departamento de Antioquia, (Tomo I). Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 354.

Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J. J., Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. **85:** 95-112.

Uribe, A., Roldán, G. (1975). Estudio comparativo de algunas características físico-químicas y biológicas del Embalse de El Peñol (Nare). Actualidades Biológicas. **4** (11): 2-12.

Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummings, K. W., Sedell, V., Cushing. C. E. (1980). The River Continuum Concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. **37:** 130-137.

Webster, J.R. & Patten, B.C. (1979). Effects of watershed perturbation on stream potassium and calcium dynamica. Ecological Monographs. **49:** 51-72.

Zhang, W., Jin, X., Liu, D., Lang, C., Shan, B. (2017). Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river—Fuyang River in northern China. Journal of Environmental Sciences. **55:** 41-48.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

Artículo de posesión

Ciencias de la tierra

El inicio de la emergencia en los Andes del norte: una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno

Germán Bayona

Corporación Geológica ARES, Bogotá, D.C., Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 21 de noviembre de 2018

Resumen

El norte de los Andes está conformado por varias cadenas montañosas y extensos drenajes que transportan sedimentos a los océanos circundantes. La configuración actual no representa la de los primeros estadios de formación de los Andes del norte. La integración de la información sedimentológica, estratigráfica, geocronológica y de la procedencia de unidades del Coniaciano al Paleoceno expuestas al oriente de la Cordillera Central permite interpretar el cambio en los sistemas de acumulación de ambientes marinos de plataforma a sistemas continentales fluviales y planicies costeras, y establecer la ubicación de los primeros sistemas montañosos y los drenajes que suministraron sedimentos terrígenos a la cuenca. En el Campaniano temprano comenzó la aparición de bloques al occidente sobre la plataforma marina, en tanto que en el Campaniano tardío, emergieron altos intraplaca hacia el oriente, los cuales aumentaron el suministro de sedimentos terrígenos detríticos al sistema marginal y marino de la cuenca. Los altos intraplaca orientales y el sistema marginal occidental crecieron hacia el norte durante el Maastrichtiano-Paleoceno como producto de los procesos de colisión y acrecentamiento de los bloques alóctonos. Estos levantamientos dieron inicio a varios sistemas de drenaje que cubrieron desde las planicies continentales hasta las marginales adyacentes; sin embargo, la poca capacidad de transporte de sedimentos y la alta tasa de subsidencia favorecieron la acumulación de los sedimentos terrígenos gruesos en canales, planicies y deltas intracontinentales, y solo los sedimentos terrígenos lodosos llegaron a la línea de costa. Esta evolución de los sistemas montañosos y drenajes difiere de lo propuesto por estudios previos que sugieren el crecimiento de altos intraplaca desde el Paleoceno. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Andes del norte; Levantamiento; Sedimentología; Campaniano; Maastrichtiano; Paleoceno.

The onset of the mountain uplift in the northern Andes: A perspective based on Coniacian to Paleocene tectono-sedimentary studies

Abstract

Several mountain belts in the northern Andes are the source of sediments transported to adjacent oceans by extensive fluvial systems, but this present configuration does not correspond to the initial stages of the Andes growth. The integration of sedimentological, stratigraphic, geochronological and data provenance from the Coniancian to Paleocene strata exposed to the east of the Central Cordillera allow interpreting how depositional systems changed from marine to continental settings, and establishing the location of the first mountain belts and drainage systems that supplied terrigenous sediments into the basin. The onset of the emergence of blocks above a pre-existing middle-Cretaceous marine platform began in the early Campanian time to the west and in the late Campanian to the east, increasing the supply of terrigenous detrital sediments to the marginal and marine depositional systems. In the Maastrichtian to Paleocene time, several eastern intrabasinal uplifts and the western marginal mountain belt grew to the north, associated with the collision of allochthonous blocks along the northwestern corner of South America. Together with the growth of mountain belts, new drainage systems began to form and run into basins with high subsidence rates. Fluvial systems covered continental and marginal plains, but the low capacity of sediment transportation in these basins favored the accumulation of coarse terrigenous fragments in channels, floodplains, and inland deltas, whereas only muddy sediments arrived at the shoreline. This uplift evolution of mountain belts and drainage systems differ from previous studies that suggest the onset of intraplate deformation since the Paleocene time. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Northern Andes; Uplift; Sedimentology; Campanian; Maastrichtian; Paleocene.

Correspondencia:
Germán Bayona, gbayona@cgares.org, **Recibido:** 12 de marzo de 2018, **Aceptado:** 7 de mayo de 2018, **Editor:** Carlos Jaramillo Muñoz

Introducción

¿Dónde se localizaron y cómo crecieron las primeras montañas y drenajes sub-aéreos adyacentes en el norte de los Andes (Figura 1), y en qué momento comenzó la deformación andina? El objetivo de este manuscrito es responder a esta pregunta a partir del análisis sedimentológico, estratigráfico y de procedencia en las unidades litoestratigráficas que documentan el cambio de sistemas de la acumulación marina a continental en el norte de los Andes (**Cooper, *et al.*,** 1995; **Villamil,** 1999). Diversos factores controlan el surgimiento de los drenajes en las montañas y las planicies sub-aéreas: pendiente del orógeno, erosión de la roca expuesta, área de drenaje en el sistema montañoso, conectividad de los drenajes, disponibilidad de fluido para erosionar y transportar sedimento, granulometría del sedimento transportado, estabilidad de los valles aluviales y crecimiento lateral y vertical de los sistemas de canales (**Montgomery & Dietrich,** 1992; **Schumm, *et al.,*** 2000). **Montgomery & Dietrich** (1992) reportan una relación aproximada entre el área de drenaje y la longitud de la cuenca en donde corre el drenaje resultante (L): $L \sim (3A)^{0,5}$.

La colisión entre placas tectónicas es uno de los mecanismos que deforma la corteza, dando inicio al levantamiento de cadenas montañosas en áreas donde antes se acumulaban sedimentos en cuencas marinas profundas. Estas montañas son la fuente de los primeros drenajes aéreos que luego produjeron el relleno de la cuenca oceánica con sedimentos detríticos terrígenos producto de la erosión de las nuevas cadenas montañosas, y formaron nuevas cuencas sedimentarias adyacentes a esas primeras montañas. El análisis del registro geológico de esas cuencas demuestra la emergencia de las montañas, que hoy están involucradas en la deformación reciente de las cordilleras o enterradas en el subsuelo, y permite dilucidar la composición de las montañas emergidas, la extensión geográfica de dichas montañas, la variación de los estilos de drenaje y la distancia del transporte de los sedimentos al sitio final de acumulación.

El estudio de la composición de los detritos terrígenos y de la orientación de los paleoflujos (es decir, las dunas de arena de fondo de canal), permite predecir en dónde estaban ubicadas esas nuevas cadenas montañosas que emergieron sobre una plataforma marina, en tanto que mediante el estudio sedimentológico de las rocas detríticas se determinan los procesos de erosión, transporte y acumulación de los sedimentos sobre la superficie terrestre. En este estudio se propuso el análisis sedimentológico y composicional de las rocas acumuladas entre el Coniaciano (90 Ma) hasta finales del Paleoceno (56 Ma). Se seleccionó el Coniaciano como inicio de la evolución geológica descrita con base en los siguientes argumentos: 1) el nivel eustático global de primer orden estaba en su fase de máxima altura (>200 m) por encima del nivel del mar actual (**Haq,** 2014); 2) fue un periodo de muy baja generación de material detrítico terrígeno procedente de la margen oriental; 3) incluye los registros globales de los eventos anóxicos oceánicos del

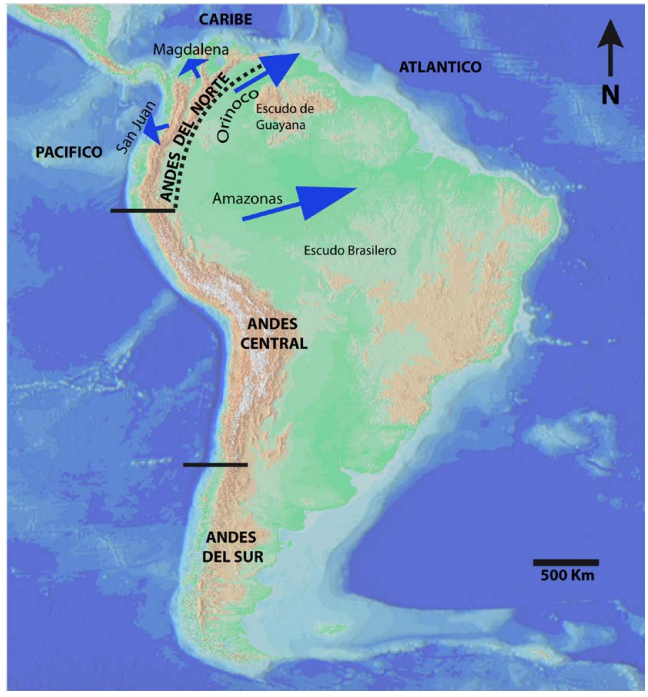


Figura 1. Expresión morfológica de la cadena montañosa de los Andes al occidente de la placa suramericana. En el sector norte de los Andes, la cordillera se abre en las tres cordilleras y hacia la margen sur del mar Caribe pasa a serranías aisladas (mapa base tomado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Andes.png, Carlos A. Arango). Las flechas indican los drenajes principales que suministran sedimentos terrígenos a las cuencas marinas circundantes.

Coniaciano y Campaniano temprano (**Hu, *et al.*,** 2012); 4) las rocas presentaban alto contenido fosilífero marino para su datación, y 5) la cuenca marina se desarrolló sobre una margen continental con muy baja actividad tectónica (**Cooper, *et al.,*** 1995; **Cediel, *et al.*,** 2003). En contraste, a finales del Paleoceno las cuencas sedimentarias existentes estaban totalmente colmatadas con sedimentos acumulados en ambientes continentales producto de una actividad tectónica de convergencia (**Cooper, et al.,** 1995; Villamil, 1999; **Bayona, *et al.,*** 2008, 2013; **Ayala, *et al.,*** 2012; **Reyes, *et al.,*** 2015).

La reconstrucción de estos primeros sistemas montañosos y sus drenajes tienen implicaciones en otras áreas de las ciencias naturales y en la economía de nuestro país. La generación de sistemas montañosos en áreas previamente cubiertas por océanos tiene efectos a nivel global debido a los cambios en la circulación de las corrientes marinas que desembocan en cambios climáticos globales. A escala más local, un nuevo sistema montañoso implica: 1) el inicio de procesos de erosión de la superficie, 2) la generación de sistemas de drenajes, 3) cambios de ecosistemas marinos a ecosistemas terrestres que se adaptan a diferentes topografías, 4) barreras para la migración de especies, y 5) cambios en las condiciones climáticas locales. En la exploración de hidrocarburos, la predicción de la extensión lateral de las

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

unidades de reservorio requiere de un conocimiento del cambio de los reservorios acumulados en los fondos marinos a reservorios acumulados en los sistemas de canales. El avance de los sistemas de acumulación marginal a continental genera las condiciones favorables para la acumulación de turba, el material base del carbón. Las areniscas cuarzosas acumuladas en los fondos marinos y hacia los marginales en la parte oriental, hoy en día expuestas en la superficie, son la materia prima para la fabricación de vidrio. En la Sabana de Bogotá estas areniscas marinas cretácicas, así como las lodolitas rojas continentales, constituyen los materiales principales en la industria de la construcción.

Marco geológico regional

Los Andes son una cadena montañosa que se extiende por más de 8.500 kms desde el extremo sur de Suramérica hasta la margen sur del Caribe colombiano y venezolano (Figura 1). En el sur de Colombia los Andes se dividen en tres cordilleras, y hacia el norte, cerca de la margen sur del Caribe colombiano y venezolano, comienzan a separarse en serranías de variada magnitud y orientación. Este complejo sistema montañoso es una barrera topográfica de escala continental y es la fuente de suministro de sedimentos detríticos a los drenajes que cubren la extensa placa suramericana hacia el oriente (por ejemplo, los ríos Amazonas y Orinoco), hacia el norte (el río Magdalena), o al occidente (el Río San Juan) (Figura 1). Esta configuración de extensos drenajes y cadenas montañosas es el reflejo de la colisión entre varias placas oceánicas en el oeste con la placa continental suramericana en los últimos 10 Ma (**Hoorn, *et al.,*** 1995; **Mora, *et al.,*** 2015; **Anderson, *et al.,*** 2016; **Horton, *et al.,*** 2018), y el inicio de la emergencia de los Andes a nivel regional comenzó a finales del Cretácico (ca. 66-70 Ma; ver revisión en **Horton, *et al.,*** 2018). A mediados del Cretácico (ca 85-90 Ma), el territorio que hoy ocupa el sector norte de los Andes y la cuenca de los Llanos orientales era ocupado por fondos oceánicos en donde se acumularon extensos depósitos producto de la precipitación química en los océanos (**Erlich, *et al.,*** 2003; **Pindell & Kennan,** 2009). Las áreas expuestas que servían de fuente y suministraban sedimentos detríticos a la cuenca marina cretácica estaban localizadas en el sector más oriental de la cuenca de los Llanos, que incluye rocas sedimentarias del Paleozoico y rocas ígneas y metamórficas de la edad Precámbrica (Escudo de Guayana en la Figura1).

Las características de los procesos tectónicos de convergencia en la esquina noroccidental de Suramérica son un tema de controversia debido a la colisión y los acrecentamientos de bloques de las cortezas continental y oceánica (**Spikings, *et al.,*** 2015; **Jaramillo, *et al.,*** 2017), al cambio de la orientación de la convergencia (**Cortés, *et al.,*** 2005) y el ángulo de subducción (**Bayona, *et al.,*** 2012) a lo largo de una margen continental curva, y al origen (autóctono o en el Pacífico) y la composición de los bloques oceánicos al occidente, que se supone que fueron acrecentados (**Pindell, *et al.,*** 2006).

El conocimiento de los sistemas de acumulación del Cretácico al Paleógeno al occidente de la cordillera Central, los procesos de acrecentamiento de bloques y los cambios en los procesos de subducción (velocidad, polaridad y angularidad) en la margen occidental son procesos que condicionaron la conformación de las cadenas montañosas occidentales en el norte de los Andes (**Villagómez & Spikings,** 2013; **Jaramillo, *et al.,*** 2017). La correlación de los depósitos sedimentarios cretácicos y paleocenos al occidente de la cordillera Central ameritan una mayor atención y discusión en el futuro, pero no son el objeto de este manuscrito.

Modelo conceptual

Los cambios en la acumulación de los fondos marinos de precipitación química a fondos marinos de acumulación terrígena, que pasan de fondos de acumulación en condiciones marginales a condiciones continentales, quedan registrados en columnas estratigráficas que ilustran la aparición de la sedimentación clástica de origen terrígeno y el aumento de la granulometría de los detritos hacia el tope del registro estratigráfico (sucesión granocreciente). Dos secciones estratigráficas de referencia (Figura 2) ilustran los cambios en los sistemas de acumulación con respecto a la distancia del lugar donde ocurre la emergencia de los sistemas montañosos. La columna de referencia del sector proximal presenta un sistema de carbonatos en la base (sedimentación marina por procesos químicos), que pasan a ser sistemas clásticos detríticos finos de plataforma, y en el tope, conglomerados y paleosuelos acumulados en sistemas de abanicos fluviales; estos últimos son el registro de la cercanía de los sistemas montañosos. La columna estratigráfica de referencia del sector distal presenta rocas de carbonatos marinos en la base, que pasan de ser sistemas clásticos detríticos lodosos a arenosos de plataforma marina somera, y en el tope incluyen estratos de areniscas y lodolitas acumulados en sistemas marginales a continentales. En las zonas más apartadas de los altos topográficos, la acumulación de los detritos terrígenos controla el proceso de migración de la línea de la costa y la ampliación de las condiciones de acumulación en sistemas marginales. La abundancia de vegetación en estas zonas queda registrada por la acumulación de turba, que es la materia base del carbón. Los depósitos marginales a continentales incluyen el mejor registro palinológico (fundamental para el control de la edad de acumulación), en tanto que en las sucesiones más proximales a los altos topográficos, este registro fósil se pierde por procesos de meteorización.

La termocronología ha sido una de las tecnologías más socorridas en el estudio de la construcción de los sistemas montañosos. En el contexto de este estudio, esta técnica no era aplicable para determinar la temporalidad del inicio de los procesos de denudación, en especial de los primeros kilómetros. La termocronología establece el proceso de enfriamiento de una roca entre las isotermas 550 ºC a 60-40 ºC (es decir, la exhumación) (**Villagómez & Spikings**,

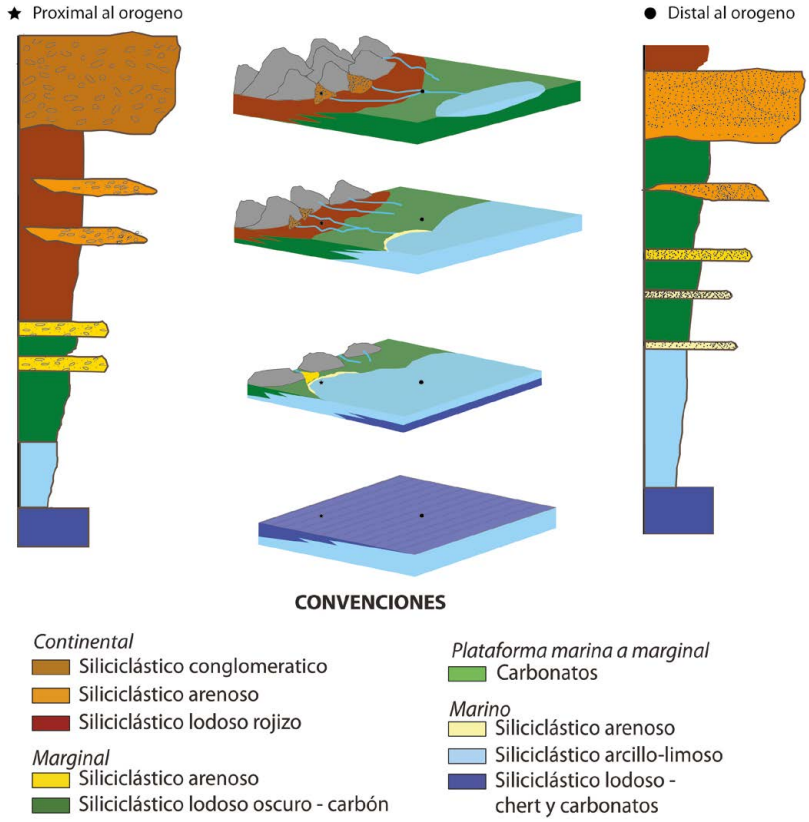


Figura 2. Modelo conceptual del registro sedimentario que permite reconocer la emergencia de un sistema montañoso en una localidad próxima al orógeno y en otra localidad ubicada en una zona distal al sistema montañoso. Las sucesiones sedimentarias en ambos casos son granocrecientes y la escala vertical puede alcanzar varias centenas de metros. Se trata de un bloque de diagrama sin escala, pero refleja el crecimiento de un sistema montañoso. Los canales que no llegan a la línea de costa por la baja capacidad de transporte de sedimentos generan deltas intracontinentales.

2013). Por consiguiente, la erosión de los primeros 2 km no se detecta con esta técnica, pero sí queda registrada por el aporte de sedimentos terrígenos detríticos a la cuenca sedimentaria adyacente. Sin embargo, la termocronología es la técnica apropiada para determinar las variaciones en las tasas de los procesos de enfriamiento de una roca (es decir, la exhumación) en los sistemas montañosos después de su aparición, como se ha documentado para la cordillera Central desde el Campaniano tardío (**Villagómez & Spikings,** 2013) y para la cordillera Oriental desde el Paleoceno (**Parra, *et al.,*** 2012) y el Eoceno-Oligoceno (**Mora, *et al.,*** 2013; 2015).

Metodología y fuente de información

Este manuscrito integra información geocronológica, estratigráfica, sedimentológica y de procedencia en 29 localidades ubicadas entre la cordillera Central y el Macizo de Santa Marta y las cuencas de los Llanos y de Maracaibo. Se construyeron tres líneas de correlación regional con dirección sur-norte en la posición geográfica actual (Figura 3A) usando la carta cronoestratigráfica internacional de **Cohen, *et al.*** (2013, actualizada en el 2017), la curva de eustasia de **Haq** (2014) y la base de restauración palinspástica para el Paleoceno de **Bayona, *et al.*** (2012) y **Cardona, *et al.*** (2014) (Figura 3B). Los estudios compilados en cada localidad (Figura 4) reportaron la definición de las unidades estratigráficas diferenciadas entre el Coniaciano y el Paleoceno, la interpretación de los ambientes sedimentarios de cada unidad y las edades según diferentes métodos de datación por macrofósiles (amonitas), microfósiles (foraminíferos, dinoflagelados, palinología) y dataciones con uranio y plomo (U/Pb) del material de origen volcánico (bentonitas y zircones volcánicos). Mediante las unidades estratigráficas con rango de dataciones muy amplio (por ejemplo, Coniaciano a Maastrichtiano y Paleoceno), se hizo la correlación determinando aquellas que incluían los dos eventos regionales de inundación máxima en el Cretácico tardío (Turoniano-Coniaciano y Campaniano) (**Haq,** 2014), o las relaciones de disconformidad en las unidades del Paleoceno.

Como resultado de esta compilación, se generaron las tres correlaciones crono-estratigráficas (visualización de la roca en un esquema espacial y temporal) mediante la interpretación de los ambientes de acumulación de los estratos aparecidos entre el Coniaciano y el Paleoceno. En estas tres correlaciones se detectaron los intervalos de tiempo con registro sedimentológico discontinuo, ya sea

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

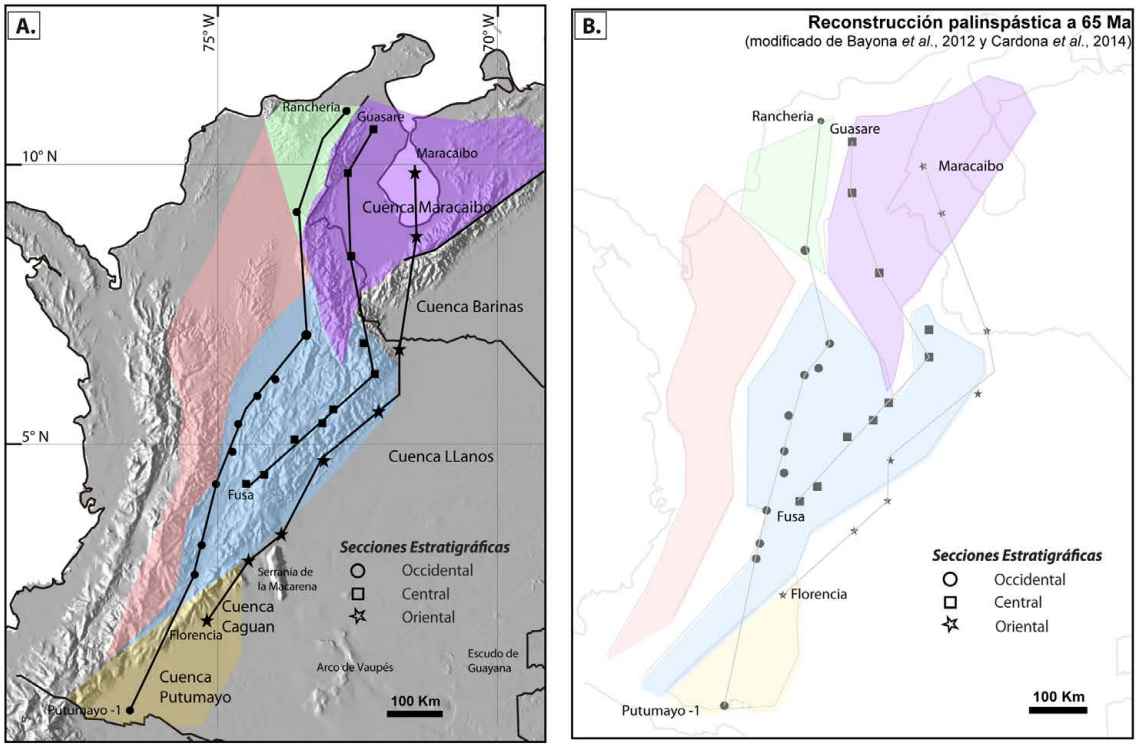


Figura 3. Ubicación de las 29 secciones estratigráficas y las tres líneas de correlación cronoestratigráfica en posición geográfica actual (**A**) y en posición palinspástica a 65 Ma (**B**).

por no acumulación o por la posterior erosión (Figura 4). En la localidad 25 (Medina), se evidencia la complejidad de las relaciones estratigráficas dentro de la misma localidad debido al truncamiento a diferentes niveles estratigráficos (discordancias) producido por los eventos de deformación que aquí se presentan. Estas correlaciones fueron la base para la elaboración de los mapas paleogeográficos que se discuten a continuación.

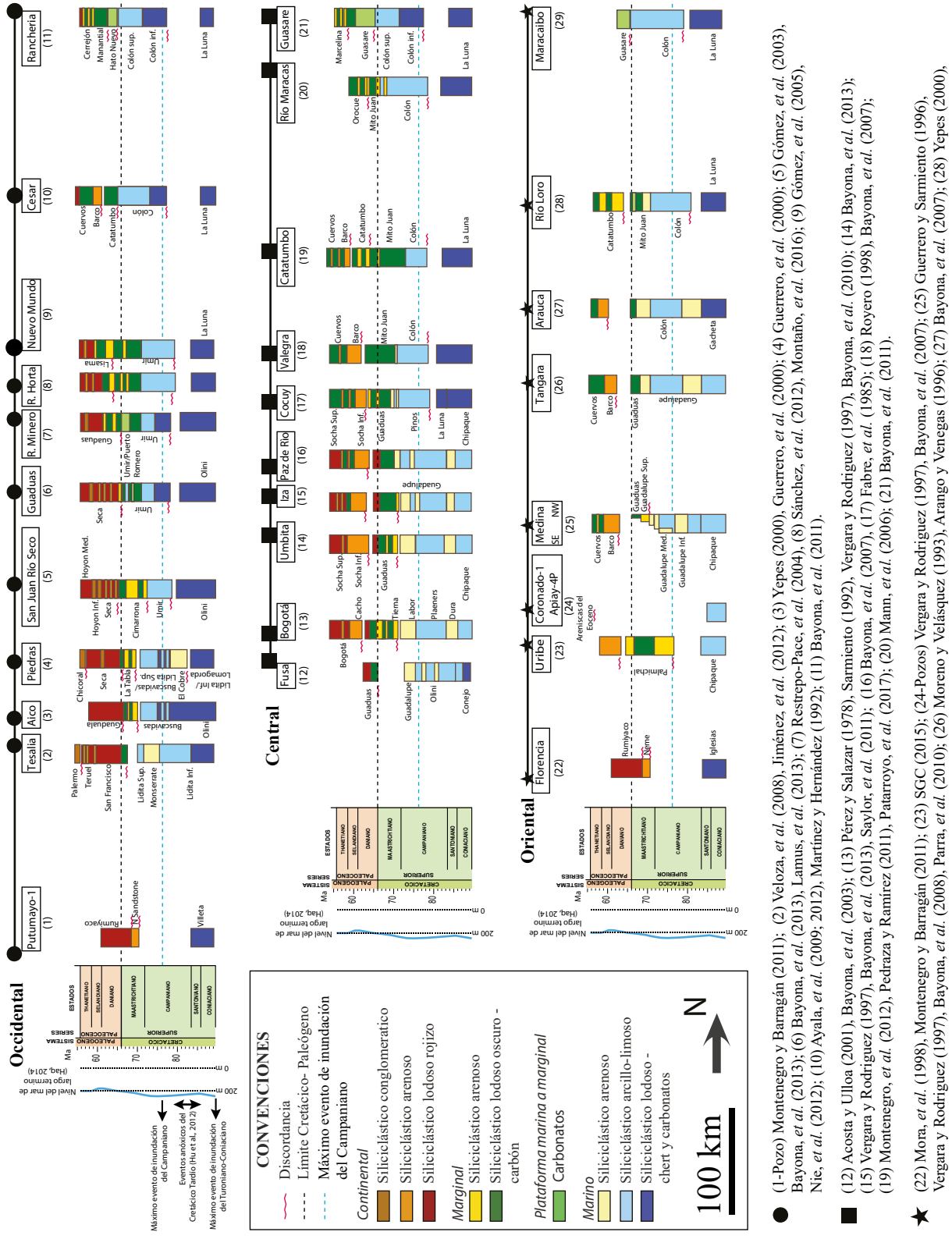
Configuración paleogeográfica del Conianiano al Santoniano

La línea de costa en la margen noroccidental de Suramérica se localiza en el sector más oriental de la cuenca (Figura 5A); la acumulación en fondos marinos cubre los depósitos Paleozoicos antes expuestos y alcanza los límites del Escudo de Guayana (**Etayo, *et al.,*** 1976; **Villamil,** 1999; **Sarmiento-Rojas,** 2011). Hacia el extremo occidental se desarrollaron arcos de islas volcánicos sobre bloques de corteza mixta (**Jaramillo, *et al.,*** 2017), los cuales se acrecentaron posteriormente en la margen continental. No hay evidencia de actividad magmática del Coniaciano-Santoniano en la margen continental, la cual cesó en el Cretácico temprano (**Bustamante, *et al.,*** 2016).

Esta configuración paleogeográfica representa la máxima extensión de una cuenca cretácica marina sin presencia de bloques de corteza continental emergidos al occidente (**Erlich, *et al.,*** 2003) (Figura 5A). En todas las secciones estratigráficas analizadas se documentó la acumulación en condiciones anóxicas de shales negros en la línea de correlación oriental. En la parte más distal de la plataforma se registraron liditas y cherts e, inclusive, intervalos condensados donde la tasa de acumulación fue muy baja o no se registraron (**Martínez & Hernández,** 1992; **Patarroyo, *et al.,*** 2017). Debido a la lejanía de la única fuente de sedimentos hacia el oriente en el Escudo de Guayana, con exposición de rocas ígneas en pendientes muy bajas y con profundo desarrollo de paleosuelos, se registra una disminución drástica en el suministro de sedimentos terrígenos detríticos a la cuenca. El único registro del suministro de material procedente de los arcos de islas occidentales desde el Cenomaniano lo constituyen las delgadas capas de ceniza volcánica (**Villamil & Arango,** 1998; **Ballesteros, *et al.,*** 2013).

Configuración paleogeográfica del Campaniano temprano

En la línea de correlación oriental y central, las sucesiones granocrecientes del Campaniano inferior (78-83 Ma) son producto de las fluctuaciones eustáticas, y registran episodios de regresión normal y de transgresiones de la línea de costa. En la línea de correlación occidental se observó el primer registro de acumulación de sedimentos terrígenos arenosos en fondos marinos someros, pero con clara procedencia de sistemas emergentes hacia el occidente (**Guerrero, *et al.,*** 2002; **Montes, *et al.,*** 2003) (Figura 5B). Estos bloques emergidos occidentales son el producto de los procesos de subducción de la placa del pacífico (**Jaramillo, *et al.,*** 2017).



● (1-Pozo) Montenegro y Barragán (2011); (2) Veloza, *et al.* (2008), Jiménez, *et al.* (2012); (3) Yepes (2000), Guerrero, *et al.* (2000); (4) Guerrero, *et al.* (2000); (5) Gómez, *et al.* (2003), Bayona, *et al.* (2013); (6) Bayona, *et al.* (2013), Lamus, *et al.* (2013); (7) Restrepo-Pace, *et al.* (2004), (8) Sánchez, *et al.* (2012), Montaño, *et al.* (2016); (9) Gómez, *et al.* (2005), Nie, *et al.* (2012); (10) Ayala, *et al.* (2009; 2012), Martínez y Hernández (1992); (11) Bayona, *et al.* (2011).

■ (12) Acosta y Ulloa (2001), Bayona, *et al.* (2003); (13) Pérez y Salazar (1978), Sarmiento (1992), Vergara y Rodriguez (1997), Bayona, *et al.* (2010); (14) Bayona, *et al.* (2013); (15) Vergara y Rodriguez (1997), Bayona, *et al.* (2013), Saylor, *et al.* (2011); (16) Bayona, *et al.* (2007), (17) Fabre, *et al.* (1985); (18) Royero (1998), Bayona, *et al.* (2007); (19) Montenegro, *et al.* (2012), Pedraza y Ramírez (2011), Patarroyo, *et al.* (2017); (20) Mann, *et al.* (2006); (21) Bayona, *et al.* (2011).

★ (22) Mora, *et al.* (1998), Montenegro y Barragán (2011); (23) SGC (2015); (24-Pozos) Vergara y Rodriguez (1997), Bayona, *et al.* (2007); (25) Guerrero y Sarmiento (1996), Vergara y Rodriguez (1997), Bayona, *et al.* (2008), Parra, *et al.* (2010); (26) Moreno y Velásquez (1993), Arango y Venegas (1996); (27) Bayona, *et al.* (2007); (28) Yepes (2000), Bayona, *et al.* (2006); (29) Mann, *et al.* (2006).

Figura 4. Correlación cronoestratigráfica a lo largo de las tres líneas de control ilustradas en la Figura 3. El nombre de las unidades litológicas excluye los términos de la nomenclatura litoestratigráfica (miembro, formación, grupo) para facilitar la lectura (ver referencias de cada localidad para el uso adecuado de la nomenclatura). Escala de tiempo tomada de **Cohen, *et al.*** (2013, actualizado a 2018). Dos líneas de tiempo a 66 Ma (límite Cretácico-Paleógeno) y 76 Ma (máximo evento de inundación del Campaniano) se usaron con líneas de referencia que facilitan la lectura de correlación.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

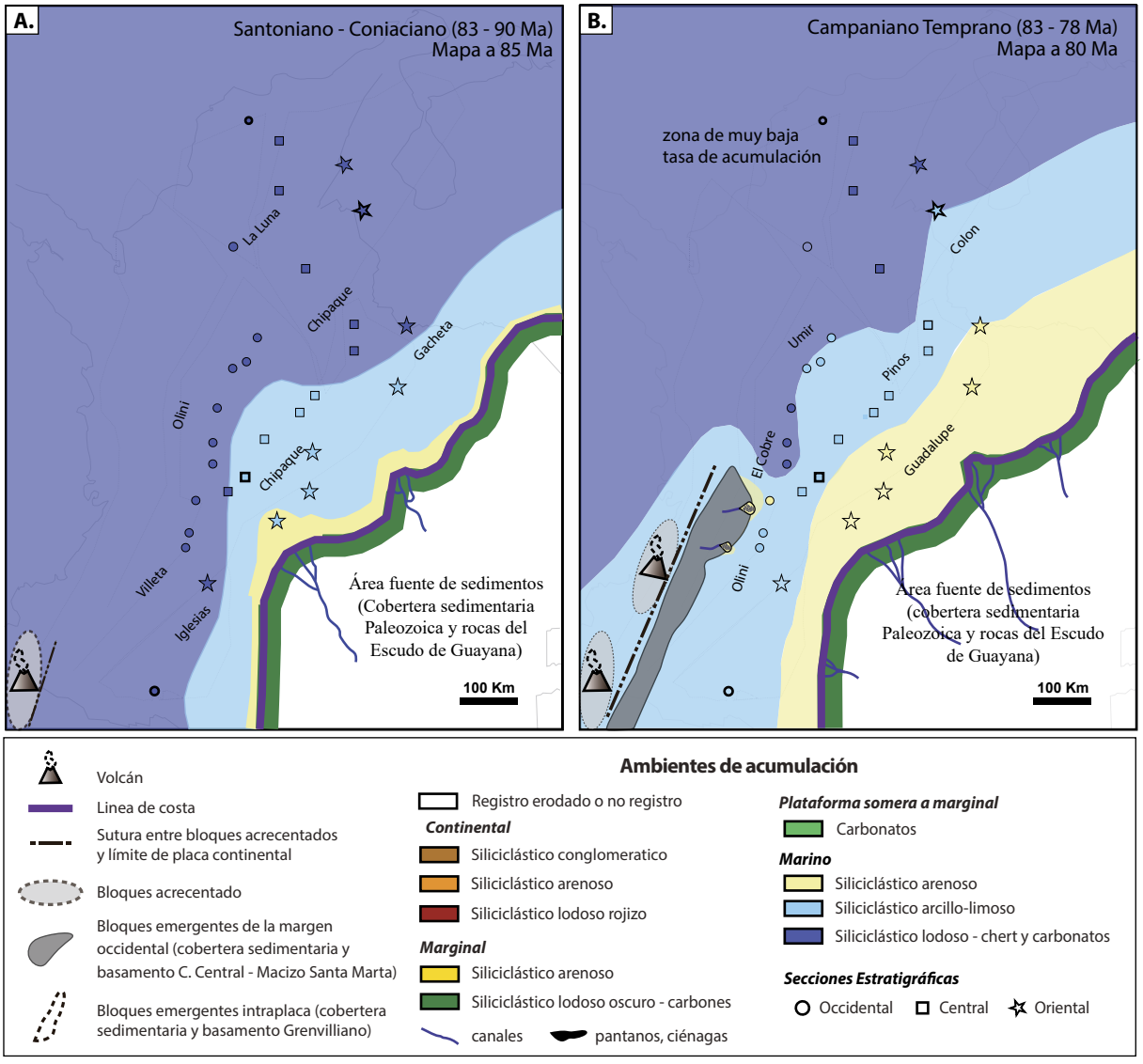


Figura 5. Mapas paleogeográficos para el (**A**) Santoniano-Coniaciano y (**B**) Campaniano temprano. Nótese el inicio de la emergencia del sistema montañoso marginal hacia el suroccidente relacionado con la colisión de bloques alóctonos.

El aumento del suministro de sedimentos terrígenos finos procedentes de dos fuentes localizadas al oriente y al occidente (Figura 5B) generó cambios en los procesos de acumulación, pasando de precipitación química a sedimentación detrítica fina (arcillas). Este contacto posiblemente corresponde a una discordancia recientemente denominada xenoconformidad (**Carroll,** 2017). En los extremos norte y occidental de la plataforma, donde la acumulación por precipitación química aún puede persistir, se tiene el registro de una sección condensada (**Martínez & Hernández,** 1992).

Configuración paleogeográfica del Campaniano tardío

El inicio de la disminución del nivel eustático global hacia cerca de los 75 Ma (**Haq,** 2014) marca el registro del último sistema progradante de una antigua margen pasiva, la cual se vió afectada por el desarrollo de bloques emergidos en los dos bordes del sur de la cuenca (Figura 6A). En el sector sur de la línea de correlación oriental, correspondiente al piedemonte Llanero sur, las sucesiones granocrecientes se reportan tanto en La Uribe (**Servicio Geológico Colombiano - SGC**, 2015) como en la sección de Medina (**Guerrero & Sarmiento,** 1996; **Vergara & Rodríguez,** 1997). Esto implica cambios en la configuración de la morfología de las áreas emergidas al sur de la Sierra de La Macarena, que generaron una topografía apta para el aumento del suministro de los sedimentos arenosos clásticos hacia el norte e, inclusive, el inicio de la erosión al sur de La Macarena en las cuencas de Caguán y Putumayo (Figuras 3 y 6A).

En la línea de correlación central, el incremento en el suministro de sedimentos detríticos gruesos procedentes de las nuevas zonas emergidas al sur de La Macarena, se

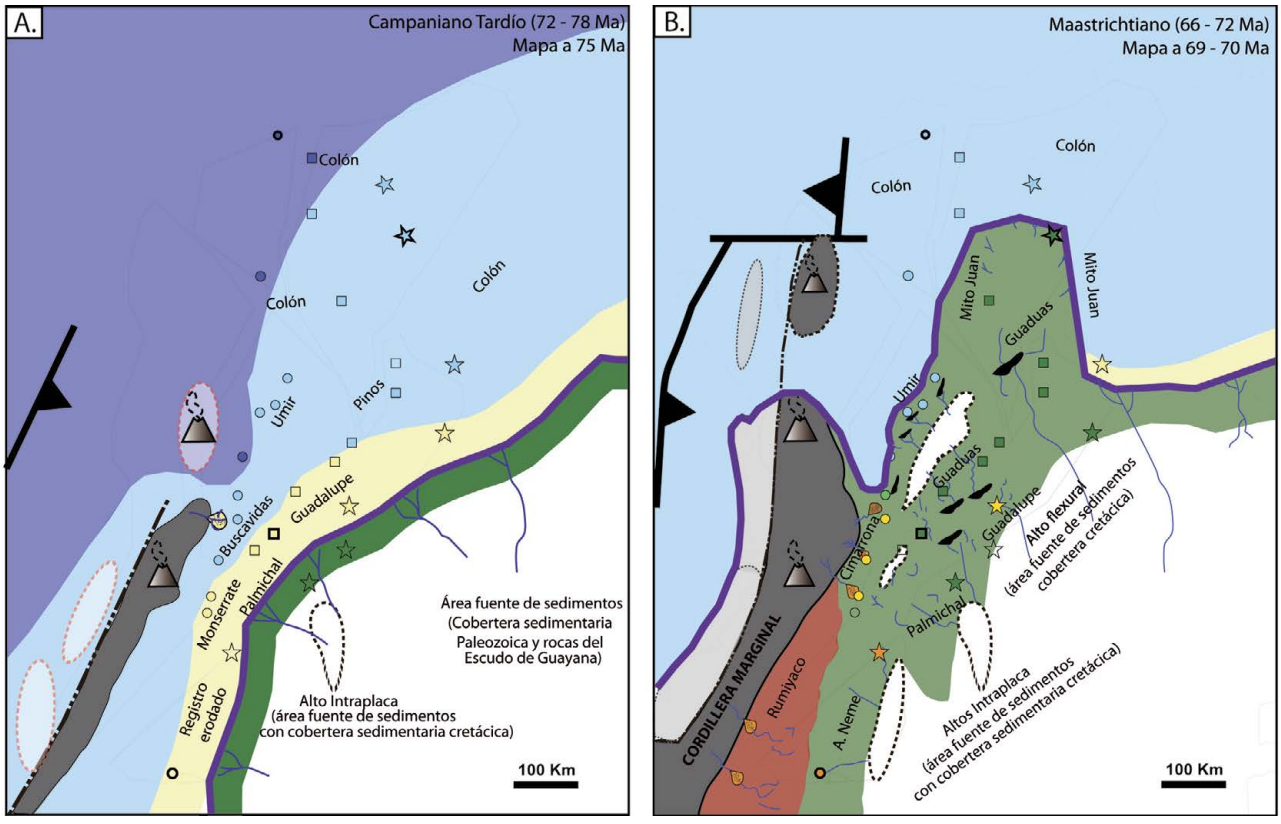


Figura 6. Mapas paleogeográficos para el (**A**) Campaniano tardío y (**B**) Maastrichtiano. Nótense los levantamientos intraplaca de sur a norte, similares al patrón de crecimiento de la cordillera marginal al occidente. El retiro acentuado hacia el norte de la línea de costa durante el Maastrichtiano es producto del incremento en el suministro de sedimentos terrígenos procedentes de varias fuentes. Ver la leyenda y el texto de la Figura 5 para la discusión

registra por la acumulación de la Formación Arenisca Tierna, unidad del tope del Grupo Guadalupe (**Díaz,** 1994; **Vergara & Rodríguez,** 1997; **Veloza, *et al.,*** 2008). Este proceso de regresión forzada generó un contacto disconforme con las areniscas infrayacentes del Grupo Guadalupe. Hacia el norte, el registro sedimentario es detrítico, pero de granulometría fina. La acumulación de carbonatos y cherts en los fondos marinos se restringe a las zonas más distales de la línea de costa.

Al suroccidente, el crecimiento de sistemas montañosos queda registrado por las sucesiones granocrecientes en la Formación Cimarrona, acumuladas en sistemas de abanicos deltaicos (**Gómez, *et al.*,** 2003). Sin embargo, estos sistemas terrígenos son locales (**Gómez, *et al.,*** 2003), lo que permite la acumulación de carbonatos a pocas decenas de kilómetros del delta y la acumulación de lodolitas de fondos marinos producto de leves transgresiones marinas (**Guerrero, *et al.,*** 2000; **Restrepo-Pace, *et al.,*** 2004), lo cual implica que el sistema de drenaje aún no capturaba suficientes sedimentos para dispersarlos hacia la cuenca.

Configuración paleogeográfica del Maastrichtiano

Durante el Maastrichtiano se reporta la emergencia regional de los Andes de Ecuador (**Horton, *et al.*,** 2018). En nuestra zona de estudio, la emergencia de bloques comienza a obtener un relieve más continuo en las dos márgenes hacia el sur, generando una mayor producción de sedimentos detríticos (Figura 6B). El registro de las areniscas cuarzosas del Neme y las "areniscas N" en las secciones de Florencia y Putumayo, respectivamente, son producto de la erosión de los altos desarrollados al oriente de la línea de correlación oriental, que inclusive se desarrollaron al norte de La Macarena, como lo indica la ausencia de registro del Campaniano y Masstrichtiano en los pozos Coronado-1 y Apiay 4P (Figura 4). Las areniscas y conglomerados en el tope del Grupo Guadalupe, en las secciones del piedemonte llanero, y de Bogotá hasta Paz del Río, registran el avance de la acumulación de los sedimentos terrígenos procedentes de estos altos surorientales. La caída global del nivel eustático favoreció la retirada regional del nivel del mar (**Haq,** 2014), pero el alto suministro de sedimentos terrígenos fue el que controló la nueva posición de la línea de costa hacia el norte de la cuenca (Figura 6B).

En el sur y en el centro de la línea de correlación occidental, los sedimentos arenosos-conglomeráticos de las unidades La Tabla y Cimarrona y las capas de las unidades con carbonatos hacia el norte quedaron totalmente sepultadas por lodolitas y areniscas acumuladas en sistemas de llanuras

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

costeras a continentales de la Formación Seca. Las litologías y asociaciones de palinofacies reportadas en esta última unidad (**Guerrero, *et al.,*** 2000; **Bayona, *et al.,*** 2013) indican una acumulación en ambientes continentales, lo que evidencia el desarrollo de relieves continuos emergidos al occidente denominados como cordillera marginal (Figura 6B).

A finales del Maastrichtiano, el material terrígeno colmató las cuencas sedimentarias continentales a marginales, como se evidencia en el dominio de sucesiones finas de paleosuelos en los sectores sur de las tres líneas de correlación, que hacia el norte pasan a sucesiones finas y arenosas acumuladas en ambientes marginales. La generación de suelos y la exposición de rocas sedimentarias de litología fina son la fuente primaria del material lodoso. Lo anterior permite sugerir el inicio del levantamiento de altos intraplaca, los cuales también quedaron cubiertos por una extensa cobertera vegetal.

Las extensas llanuras marginales y los pocos canales que las cortan permiten el registro de la turba, material base para la formación de los mantos de carbón presentes en las formaciones Guaduas y Umir. Al norte y occidente de la línea de costa, los únicos sedimentos detríticos que llegaron a los fondos marinos fueron partículas lodosas, lo que generó un registro uniforme de las lodolitas laminadas oscuras de la Formación Colón.

La ausencia de partículas arenosas en los fondos de acumulación marina indica un estado inmaduro de los drenajes continentales. La alta subsidencia debido a la tectónica activa de estas cuencas favoreció el desarrollo de deltas intracontinentales, en donde los canales se desvanecieron en largas planicies marginales y no hubo capacidad de transporte de los detritos gruesos a la línea costera. Los episodios de ingresiones marinas ocupan ampliamente estas llanuras marginales (**Sarmiento,** 1992; **Montaño, *et al.*,** 2016), y se 'retrabajaron' los sedimentos acumulados previamente sobre las planicies y los deltas intracontinentales.

Configuración paleogeográfica del Paleoceno temprano

Por la línea de correlación occidental hacia el suroccidente, las extensas llanuras continentales con canales aislados y desarrollo de paleosuelos (Rumiyaco, Guaduala, Seca) registran la erosión del sector sur de la cordillera marginal (Figura 7A). Hacia el norte, los sistemas de drenaje fluvial que se formaron fueron someros e intermitentes, y cortaron los sistemas marginales de llanuras costeras al tope de la Formación Umir. Estos sistemas de drenaje maduraron y quedaron registrados en la Formación Lisama como areniscas acumuladas en sistemas de canales fluviales amalgamados. En el sector más norte, los sistemas de acumulación

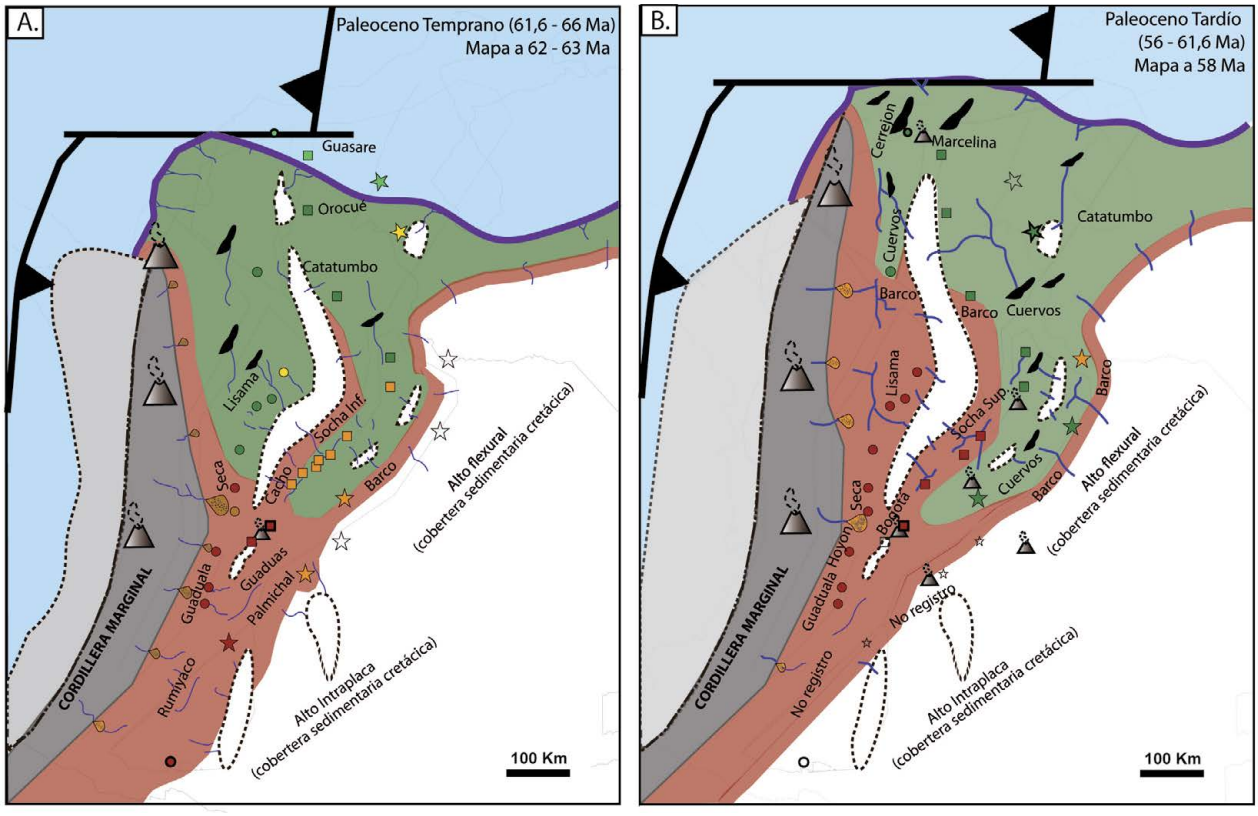


Figura 7. Mapas paleogeográficos para el (**A**) Paleoceno temprano y (**B**) Paleoceno tardío. Nótese el dominio en la acumulación en sistemas sedimentarios continentales a marginales, la presencia de varios bloques intraplaca emergidos y la migración de la actividad volcánica hacia el oriente. Ver la leyenda y el texto de la Figura 5 para la discusión

marginal (formaciones Manantial y Orocué) cubrieron los depósitos de plataforma de carbonatos existentes (formaciones Hato Nuevo y Guasare) (Figura 7A). Esta distribución de ambientes permite inferir la extensión hacia el norte de la cordillera marginal al occidente, la cual fue acompañada por el crecimiento de un arco magmático producto de la subducción de la placa del Caribe (**Bayona, *et al.,*** 2012; **Bustamante, *et al.,*** 2017). Sin embargo, los detritos llegaron a llanuras extensas y no generaron sistemas fluviales maduros que transportaran sedimentos detríticos gruesos hasta la línea de costa.

La subducción de la placa Caribe en la margen occidental en el Paleoceno mantuvo activos los altos intraplaca al suroriente y generó nuevos sistemas montañosos intraplaca hacia el norte. Estos nuevos altos aumentaron el suministro de sedimentos terrígenos arenosos cuarzosos debido a la erosión de las coberteras sedimentarias cuarzosas del Cretácico Superior (**Bayona, *et al.,*** 2013). Las extensas sabanas de areniscas de canales trenzados y amalgamados de las formaciones Cacho y Socha Inferior son el registro de los sistemas de canales fluviales que se formaron alrededor de estos altos intraplaca. Aunque el incremento de los sistemas montañosos intraplaca aumenta el poder de transporte en los sistemas de drenaje previos, la alta tasa de subsidencia en la cuenca no permitió la conectividad de los sistemas de drenajes (**Bayona, *et al.,*** 2013. Los altos intraplaca deformaron por flexión la corteza hacia el oriente, y generan, así, un alto de flexión (Figura 7A), el cual expuso en la superficie rocas cuarzosas del Cretácico Superior, convirtiéndose en la roca fuente de los detritos cuarzosos de la Formación Barco en la región del piedemonte llanero (**Bayona, *et al.,*** 2007).

Hacia el norte la cuenca rota por los altos intraplaca, que involucran el basamento metamórfico del Macizo de Santander y los bloques en los Andes de Mérida, suministraron sedimentos detríticos tanto a las cuencas del Valle medio del Magdalena (Formación Lisama) y Cesar (Formación Barco), como a las cuencas del Catatumbo y sur de Maracaibo (Formación Catatumbo). Sin embargo, los drenajes procedentes de estos altos tuvieron un poder limitado de transporte de sedimentos. La fracción arenosa quedó acumulada en las proximidades de los altos y fueron los sedimentos lodosos los que colmataron la cuenca y generaron el retiro de la línea de costa a su sector más norte. El suministro de detritos terrígenos al norte y occidente de la línea costera fue limitado, lo que permitió la acumulación de carbonatos al norte (formaciones Guasare y Hato Nuevo), siendo éste el último registro de carbonatos marinos al norte de Suramérica (**Bayona, *et al.,*** 2011).

Configuración paleogeográfica del Paleoceno tardío

La presencia de sistemas de abanicos aluviales registrados en el sector suroccidental de la cuenca indica la proximidad de altos topográficos con relieve significativo, y un sistema de drenajes que permitió el transporte de fragmentos del tamaño de la grava en su sistema de fluidos por varias decenas de kilómetros (**Gómez, *et al.,*** 2003; **Bayona, *et al.,*** 2013) (Figura 7B).

Hacia el oriente, los altos intraplaca tendieron a conectarse y la deformación se extendió más al oriente de los altos preexistentes en el Paleoceno temprano (**Bayona, *et al.,*** 2012) (Figura 7B). La actividad magmática se incrementó en la Cordillera marginal en el Paleoceno tardío (**Cardona, *et al.,*** 2011, 2014; **Bustamante, *et al.,*** 2017). Las capas gruesas de cenizas volcánicas al sur de Bogotá (**Bayona, *et al.,*** 2010) y al nororiente de Perijá (**Bayona, *et al.,*** 2011) son el indicio de la actividad magmática intraplaca. La presencia de circones volcánicos y de abundantes fragmentos de rocas volcánicas en areniscas del Paleoceno superior entre las localidades de Iza y Paz del Río (**Saylor, *et al.,*** 2011) puede interpretarse como evidencia de la actividad magmática intraplaca cuyos depósitos fueron erosionados. La deformación se extendió hasta la parte proximal de la cuenca de los Llanos (**Mora, *et al.,*** 2013), donde se ha documentado la presencia de capas de tobas al tope de las unidades del Paleoceno (**Bayona, *et al*.,** 2015).

A pesar de tener unos sistemas montañosos intraplaca maduros, el sistema de drenajes no tiene la capacidad para transportar los detritos arenosos en sistemas fluviales extensos. El Paleoceno tardío se caracterizó por el incremento en la tasa de subsidencia de las cuencas, un registro dominante de depósitos de llanuras continentales y marginales sobre los sistemas de canal, y el incremento en la inmadurez composicional de las areniscas (aumento de fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas) comparadas con las del Paleoceno inferior. En el sector sur de la cuenca, la preservación de estos depósitos finos continentales se registra de manera deficiente debido a la subsecuente erosión causada por la acumulación de depósitos más gruesos del Paleoceno más superior y el Eoceno inferior. Por el contrario, hacia el norte, en las zonas de mayor subsidencia, los sistemas de canales quedan embebidos en el registro de las llanuras adyacentes. Al igual que en el Paleoceno temprano, los canales terminaron en sistemas deltaicos intracontinentales.

El avance regional de la deformación y el magmatismo hacia el oriente fue acompañado de una mayor acumulación en todas las cuencas sinorogénicas. Estos tres procesos (deformación, magmatismo, subsidencia), observados en todas las cuencas, estarían asociados a los procesos de subducción de la placa Caribe. El flujo del manto viscoso generado por esta subducción debajo la corteza continental de la placa Suramericana generó una fuerza de arrastre, en especial cuando la subducción fue de bajo ángulo (**Mitrovica, *et al.,*** 1989; **Gurnis,** 1992). Este movimiento mantélico generó subsidencia a una escala de miles de kilómetros, afectando todas las cuencas sedimentarias (**Catuneanu,** 2018). En contraste, las cargas tectónicas y sedimentarias producen mayor deformación de la flexión de la corteza, provocando, a su vez, la migración al oriente de la línea de acumulación-erosión en la cuenca de antepaís de

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):364-378, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.632

los Llanos, lo cual permite la acumulación de los sistemas de drenajes que proceden desde el alto de flexión al oriente, correspondiente a la Formación Barco, y en la zona de mayor subsidencia de flexión, la acumulación coetánea de las lodolitas y carbones de la Formación Cuervos (**Bayona, *et al0.,*** 2007).

Hacia el norte de la cuenca, el levantamiento de la margen occidental del Macizo de Santa Marta, como parte norte de la cordillera marginal, y los altos intraplaca que incluyen los macizos de Santander y Floresta, fueron la fuente de los detritos del Paleoceno tardío con alto contenido de terrígenos de origen metamórfico (**Bayona, *et al.,*** 2008, 2011; **Ayala, *et al.,*** 2012; **Saylor, *et al*.,** 2011). La alta subsidencia en estas cuencas permite tanto el registro de los sistemas de canales y llanuras marginales adjuntas, y también la espesa acumulación de turba que será el material base para las capas de carbón existentes en las cuencas de Catatumbo, Cesar, Ranchería y Guasare.

En resumen, en el Paleoceno tardío la Cordillera marginal y el arco magmático al occidente, así como los altos intraplaca, siguieron creciendo hacia el norte y oriente, conjuntamente con el desarrollo de nuevas fuentes volcánicas asociadas a la subducción de la placa Caribe.

Discusión y conclusiones

La emergencia de los sistemas montañosos en el norte de los Andes data del Campaniano temprano, y el registro sedimentológico de estos altos está incluido en las unidades arenosas locales acumuladas en fondos marinos someros al suroccidente. El registro sedimentológico del Maastrichtiano y Paleoceno en la línea de correlación occidental documenta el relleno de la cuenca marina con sedimentos terrígenos detríticos que se acumularon en fondos marinos que pasaron a ambientes marginales y terminaron en ambientes continentales; las unidades marginales y continentales hacia el norte son más jóvenes. Por consiguiente, si el sentido de relleno de la cuenca es sur-norte, se asume que la construcción de la topografía dominante de la cordillera marginal y de los altos intraplaca tiene el mismo sentido sur-norte. Las altas tasas de exhumación reportadas en el sector central de la cordillera Central sustentan el crecimiento de la cordillera marginal en el Maastrichtiano (**Villagómez & Spikings,** 2013); este sector central colinda con las localidades 4 y 5, donde se registra el mayor contenido de sedimentos terrígenos (Figura 4).

Al norte de la margen continental existen otros procesos de colisión de bloques, como son los arcos de islas volcánicas formadas sobre la placa Caribe (**Weber, *et al.,*** 2010), que desarrollaron topografías aisladas y no conectadas con la cordillera marginal. Asimismo, en el extremo norte se generaron altos intraplaca aislados, como el levantamiento del extremo norte de la Serranía de Perijá (**Bayona, *et al.,*** 2011).

La dispersión de sedimentos terrígenos arenosos a conglomeráticos en la línea de correlación occidental fue muy local en sus primeras etapas de crecimiento (formaciones El Cobre, La Tabla, Cimarrona) (**Guerrero, *et al*.,** 2000; **Gómez, *et al*.,** 2003), evidenciando los primeros estados de emergencia de la Cordillera marginal durante el Campaniano y Maastrichtiano. En el mismo sector suroccidental de la cuenca, las unidades del Paleoceno incluyen unidades muy espesas de conglomerados acumulados en sistemas de abanicos aluviales (Palermo, Chicoral, Hoyón inferior), lo que indica: 1) un estado más maduro de emergencia de la Cordillera marginal con un aumento de la topografía; 2) un incremento de las áreas de captación de sedimentos, y 3) el incremento en la capacidad de transportar los sedimentos a la cuenca a lo largo de drenajes más desarrollados.

A diferencia del avance hacia el norte del crecimiento de la cordillera marginal, la deformación de la margen suroriental de la cuenca Cretácica es relativamente estática; el registro más norte corresponde a la discordancia en los pozos Coronado-1 y Apiay-4P (Figura 4). Esta deformación se inició en el Campaniano tardío con el suministro de la fracción arenosa gruesa a los sistemas de acumulación marino somera y marginal de ese sector. El extenso esparcimiento de areniscas cuarzosas gruesas a conglomeráticas, correspondiente a la unidad arenosa en el tope del Grupo Guadalupe (Arenisca Tierna-Monserrate), indica una gran eficiencia en el transporte de detritos del drenaje suroriental, y de estos sedimentos terrígenos hacia el norte y oriente por corrientes marinas someras. El cambio abrupto a litologías lodosas en el Paleoceno temprano en este sector indica la disminución en la capacidad de transporte, o que los altos intraplaca obstruyeron el suministro de estos detritos. Los estudios de termocronología en los bloques surorientales serían fundamentales para determinar los procesos de exhumación de la margen suroriental de la cuenca cretácica.

Los altos intraplaca que separan las cuencas sinorogénicas se desarrollaron a partir del Maastrichtiano, y se extendieron y conectaron durante el Paleoceno. En el momento de emerger, estos bloques montañosos intraplaca tuvieron poco relieve en comparación con la cordillera marginal al occidente y la deformación de la margen suroriental de la cuenca cretácica. En los estudios de termocronología realizados en la cordillera Oriental (**Mora, *et al.,*** 2013; 2015), en los Andes de Mérida (**Bermúdez, *et al.,*** 2010) y en el Macizo de Santander (**Van der Lelij,** 2013), no se registran procesos de exhumación en el Maastrichtiano-Paleoceno temprano, y solo en el trabajo de **Parra, *et al.*** (2012) se documentan procesos de exhumación en el flanco occidental de la cordillera Oriental en el Paleoceno tardío. La incompatibilidad en la temporalidad entre el registro sedimentario en las cuencas y la exhumación en los orógenos sustenta la hipótesis de una deformación de baja magnitud en estos altos intraplaca.

Dichos altos intraplaca, que separan cuencas sinorogénicas, suministraron sedimentos terrígenos arenosos e incrementaron la tasa de subsidencia en las cuencas adyacentes. Los sistemas de drenaje que surgían de estos altos intraplaca hacia las cuencas adyacentes no tenían la capacidad para el

transporte de sedimentos. El registro de sistemas de canales embebidos en los depósitos de llanuras continentales y marginales documenta cómo estos canales terminaron rápidamente en las planicies de estas llanuras generando deltas intracontinentales. Ello implica una deficiente conexión de los sistemas de drenaje al interior de cada cuenca, y la ausencia de los drenajes dominantes axiales que permiten el transporte de los sedimentos arenosos hacia la línea de costa, lo cual se evidencia por el dominio de las litologías de tamaño de lodo y limo en los fondos marinos someros, y el registro de carbonatos en el Paleoceno.

Las rocas expuestas en los altos intraplaca difieren en composición a lo largo de rumbo. En los bloques sur domina la exposición de la cobertera sedimentaria cretácica cuarzosa, al igual que los altos del Campaniano-Paleoceno de la margen suroriental de la cuenca cretácica. Por consiguiente, la composición de los estratos arenosos en el Maastrichtiano y el Paleoceno inferior son cuarzosos. El registro en el Paleoceno inferior de areniscas cuarzosas acumuladas en canales trenzados obedece al incremento de la fluidez de los sistemas de drenaje. La gran fluidez en los drenajes es producto del incremento de gradiente y la ausencia de material lodoso en las áreas de fuente. Al incrementar la proporción de lodo en el sistema fluido, este disminuye su potencial y los canales cambian a sistemas de canales meandriformes, como se documenta en las unidades del Paleoceno superior.

La cobertera sedimentaria en los altos intraplaca norte y en la cordillera marginal tiende a ser lodosa y delgada. La rápida erosión de esta cobertera deja expuestas rocas ígneas y metamórficas de estos bloques, suministrando sedimentos composicionalmente muy inmaduros (fragmentos de rocas volcánicas y metamórficas), que constituyen la fracción que se incrementa en las rocas del Paleoceno inferior en el sector occidental, y en las del Paleoceno superior en las otras dos líneas de correlación.

La revisión de estos procesos de emergencia de bloques en el norte de los Andes difiere de lo propuesto en estudios previos, en los cuales se sugiere un avance hacia el oriente de la deformación iniciado a finales del Cretácico en el occidente y que culminó en el oriente en el Oligoceno (**Reyes, *et al.,*** 2015; **Horton, *et al.,*** 2018), ya que sus análisis se basan principalmente en estudios de termocronología.

Agradecimientos

Este estudio es producto de la compilación sistemática de información y observaciones personales realizadas en varias de las secciones con colegas de la Corporación Geológica ARES en estos últimos 25 años (el listado completo de colaboradores aparece en las publicaciones de Bayona, *et al.*). Los comentarios de Agustín Cardona y del editor Carlos Jaramillo ayudaron a mejorar el contenido de este manuscrito. Agradecemos a Camilo Montes por el continuo intercambio sobre la paleogeografía del norte de Sur América y los comentarios a las figuras de este manuscrito. Catalina Ramírez y Ana Salazar colaboraron en la construcción de las figuras de este manuscrito.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Referencias

Acosta, G.J. & Ulloa, C. E. (2001). Geología de la plancha 246 Fusagasugá. Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear - Ingeominas. Memoria explicativa, escala 1.100.000.

Anderson, V.J., Horton, B.K., Saylor, J.E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D.O., Ketcham, R.A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco and Amazon river systems: Geosphere. **12:** 4. Doi: 10.1130/GES01294.1

Arango, F., Venegas, D. (1996). Análisis estratigráfico del Límite Cretácico Superior - Paleoceno en el bloque colgante de la falla de Guaicáramo, en alrededores de Támara, Casanare, VII Congreso Colombiano de Geología.

Ayala-Calvo, C., Bayona, G., Ojeda-Marulanda, C., Cardona, A., Valencia, V., Padrón, C., Yoris, F., Mesa-Salamanca, J., García, A. (2009). Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleógeno en la subcuenca de Cesar – Aportes a la evolución tectónica del área. Geología Colombiana. **34:** 3-33.

Ayala-Calvo, C., Bayona, G., Cardona, A., Ojeda, C., Montenegro, O., Montes, C., Valencia, V., Jaramillo, C. (2012). The Paleogene synorogenic succession in the northwestern Maracaibo block: Tracking intraplate uplifts and changes in sediment-delivery systems. Special Edition on Tectonic and climatic shaping of the northern Andes and southern Caribbean margin (Edited by G. Bayona., B. Horton., A. Reyes-Harker). Journal of South America Earth Sciences. **39:** 93-111.

Ballesteros, C.I., Galvis, H.A., Higuera, I.C., Marfisi, N.K., de la Parra, F., Céspedes, S., Cantisano, M.T., Forero, S.P., Barrera, P.A., Rodríguez, C.E., Zamora, W.H., Restrepo, D.P., Cerón, J., Castillo, R.D. (2013). Anotaciones acerca de la estratigrafía del intervalo Cenomaniano-Campaniano atravesado por el pozo La Luna-1, cuenca del Valle Medio del Magdalena. XVI Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, p. 30-31.

Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Llinás, R. (2003). The Fusagasugá succession: A record of the complex Latest Cretaceous-pre-Miocene deformation between the Magdalena Valley and Sabana de Bogotá areas. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Memorias del VIII Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas. **2:** 180-193.

Bayona, G., Jaramillo, C., Reyes-Harker, A. (2006). Resultados paleomagnéticos en unidades del Paleógeno de Colombia y oeste de Venezuela y posibles usos para caracterización de contactos. Geología Colombiana. **31:** 57-72.

Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes- Harker, A., Torres, V. (2007). Paleocene-middle Miocene flexural-margin migration of the no marine Llanos foreland basin of Colombia. CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro. **3** (3): 141-160.

Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizábal, J., Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-

Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin. **120:** 1171-1197.

Bayona, G., Montenegro, O., Cardona, A., Jaramillo, C., Lamus, F., Morón, S., Quiroz, L., Ruiz, M. C., Valencia, V., Parra, M., Stockli, D. (2010). Estratigrafía, procedencia, subsidencia y exhumación de las unidades paleógenas en el Sinclinal de Usme, sur de la zona axial de la Cordillera Oriental, Geología Colombiana. **35:** 5-35.

Bayona, G., Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Ojeda, G., Valencia, V. (2011). Intraplate subsidence and basin filling adjacent to an oceanic arc-continental collision; a case from the southern Caribbean-South America plate margin. Basin Research. **23:** 403-422. Doi:10.1111/j.1365-2117.2010.00495.x

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Valencia, V., Ayala, C., Montenegro, O., Ibáñez, M. (2012). Early Paleogene magmatism in the northern Andes: Insights on the effects of Oceanic Plateau-continent convergence. Earth and Planetary Science Letters. **331-332:** 97-111. Doi: 10.1016/j.epsl.2012.03.015

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jiménez, G., Mesa, A., Valencia, V. (2013). Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean – South American collision in early Palaeogene time. In: Nemčok, M., Mora, A.R., and Cosgrove, J.W. (Eds), Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society of London, Special Publication 377, p. 285-314. Doi: 10.1144/SP377.5

Bayona, G., Cardona, A., Téllez, G., Garzón, A., Pinzón, D., Méndez, J., Ramírez, C., Rueda, M. (2015). Magmatismo Paleoceno-Eoceno Temprano(?) en la Cuenca proximal de los Llanos, XV Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Colombia, p. 560-563.

Bermúdez, M., Kohn, B.P., van der Beek, P.A., Bernet, M., O´Sullivan, P.B., Shagam, R. (2010). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuela Andes: Implications for Cenozoic Caribbean geodynamics. Tectonics. **29:** TC5009. Doi:10.1029/2009TC002635, 2010

Bustamante, C., Archanjo, C., Cardona, A., Valencia, V., Vervoort, J. (2016). Late Jurassic to Early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long–term arc maturity. Geological Society of America Bulletin. **128** (11-12): 1762–1779. Doi: 10.1130/B31307.1

Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C.J., Bayona, G., Lara, M., Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. Lithos. **277:** 199-209. Doi: 10.1016/j. lithos.2016.11.025

Cardona, A., Valencia V. A., Bayona, G., Duque, J., Ducea, M., Gerhels, G., Jaramillo C., Montes, C., Ojeda, G., Ruiz, J. (2011). Early subduction orogeny in the Northern Andes: Turonian to Eocene magmatic and provenance record in the Santa Marta Massif and Rancheria Basin, Northern Colombia. Terranova. **23:** 26-34.

Cardona, A., Weber, M., Valencia, V., Bustamante, C., Montes, C., Cordani, U., Muñoz, C.M. (2014). Geochronology and geochemistry of the Parashi granitoid, NE Colombia: Tectonic implication of short-lived Early Eocene plutonism along the SE Caribbean margin. Journal of South American Earth Sciences. **50:** 75-92.

Catuneanu, O. (2018). First-order foreland cycles: Interplay of flexural tectonics, dynamic loading, and sedimentation. Journal of Geodynamics. Doi: 10.1016/j.jog.2018.03.001

Carroll, A. R. (2017). Xenoconformities and the stratigraphic record of paleoenvironmental change. Geology **45:** 639-642. Doi:10.1130/G38952.1

Cediel, F., Shaw, R.P., Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini, R.T. Buffler, J. Blickwede, (editors). The Circum–Gulf of México and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. AAPG Memoir. **79:** 815-848.

Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.X. (2013, updated in 2018). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes. **36:** 199-204.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. **79:** 1421-1443.

Cortés, M., Angelier, J., Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. Tectonics. **24:** TC1008. Doi: 10.1029/2003TC001551

Díaz, L. (1994). Distribución de las facies siliciclásticas correspondientes a la Formación Arenisca Tierna y equivalentes en el Valle Superior del Magdalena. En: Etayo-Serna, F. (ed). Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena, Universidad Nacional de Colombia, p. IV1-15.

Erlich, R.N., Villamil, T., Keens-Dumas, J. (2003). Controls on the deposition of Upper Cretaceous organic carbon–rich rocks from Costa Rica to Suriname, in Bartolini, C., Buffler, R., and Blickwede, J., eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics, American Association of Petroleum Geologists Memoir. **79:** 1-45.

Etayo, F., Renzoni, G., Barrero, D. (1976). Contornos sucesivos del mar Cretácico en Colombia. Primer Congreso Colombiano de Geología, Memoria., Bogotá, p. 217-252.

Fabre, A., Osorio, M., Vargas, R., Etayo, F. (1985). Geología de la plancha 137 - Cocuy. Escala 1:100.000. Digitalizado y estandarizado en el año 2009. Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS), Bogotá, Colombia.

Goméz, E., Jordan, T.E., Allmendinger., Hegarty, K., Kelley, S., Heizler, M. (2003). Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. GSA Bulletin. **115:** 131-147.

Goméz, E., Jordan, T.E., Allmendinger., Hegarty, K., Kelley, S., Heizler, M. (2005). Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. GSA Bulletin. **117:** 547-56. Doi: 10.1130/B25454.1

Guerrero, J., Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. Geología Colombiana. **20:** 3-66.

Guerrero, J., Sarmiento, G., Navarrete, R. (2000). The stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras. Geología Colombiana. **25:** 45-110.

Gurnis, M. (1992). Rapid continental subsidence following the initiation and evolution of subduction. Science. **255:** 1556-1558.

Haq, B.U. (2014), Cretaceous eustasy reconsidered: Global and Planetary Change. **113:** 44-58. Doi:10.1016/j.gloplacha. 2013.12.007

Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G.A., Lorente, M.A. (1995). Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America: Geology. **23:** 237-240.

Horton, B.K. (2018). Sedimentary record of Andean mountain building. Earth-Science reviews. **178:** 279-309.

Hu, X., Wagreich, M., Yilmaz, I.O. (2012). Marine Rapid Environmental/Climatic Change in the Cretaceous Greenhouse World. Cretaceous Research. **38:** 1-6.

Jaramillo, J.S., Cardona, A., León, S., Valencia, V., Vinasco, C. (2017). Geochemistry and geochronology from Cretaceous magmatic and sedimentary rocks at 6_350 N, western flank of the Central cordillera (Colombian Andes): Magmatic record of arc growth and collision. Journal of South American Earth Sciences. **76:** 460-481.

Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A., Sierra, D. (2012). Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia. Special Edition on Tectonic and climatic shaping of the northern Andes and southern Caribbean margin (Edited by G. Bayona., B. Horton., A. Reyes-Harker). Journal of South America Earth Sciences. **39:** 184-201.

Lamus, F., Bayona, G., Cardona, A., Mora, A. (2013). Procedencia de las unidades Cenozoicas del Sinclinal de Guaduas: implicación en la evolución tectónica del sur del Valle del Magdalena y orógenos adyacentes. Boletín de Geología de la UIS. **35:** 17-42.

Mann, P., Escalona, A, Castillo, M. V. (2006). Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. AAPG Bulletin. **90:** 445-477. Doi: 10.1306/10110505031

Martínez, J.I, Hernández, R. (1992). Evolution and drowning of the Late Cretaceous Venezuela carbonate platform. Journal of South American Earth Science. **5** (2): 197-210.

Mitrovica, J. X., Beaumont, C., Jarvis, G.T. (1989). Tilting of continental interiors by the dynamical effects of subduction. Tectonics. **8:** 1079-1094.

Montaño, P., Nova, G., Bayona, G., Mahecha, H., Ayala, C., Jaramillo, C., de la Parra, F. (2016). Análisis de secuencias en sucesiones sedimentarias de grano fino: un ejemplo de la Formación Umir y base de la Formación Lisama, en el sector de Simacota (Santander, Colombia). Boletín de Geología de la Universidad Industrial de Santander. **38:** 51-72.

Montes, C., P.A. Restrepo-Pace., R.D. Hatcher Jr. (2003). Three-dimensional structure and kinematics of the Piedras Girardot fold belt: Surface expression of transpressional deformation in the northern Andes, in C. Bartolini, R.T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir. **79:** 849-873.

Montgomery, R.D. & Dietrich, W.E. (1992). Channel initiation and the problem of landscape scale. Science. **255:** 826-830.

Mora, A., Venegas, D., Vergara, L. (1998). Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario Inferior en el Sector Norte de la Cuenca del Putumayo, Departamento del Caquetá, Colombia. Geología Colombiana. **23:** 31-77.

Mora, A., Reyes-Harker, A., Rodríguez, G., Tesón, E., Ramírez-Arias, J.C., Parra, M., Caballero, V., Mora, J.P., Quintero, I., Valencia, V., Ibáñez, M., Horton, B., Stokli, D. (2013). Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. In: Nemčok, M., Mora, A.R., and Cosgrove, J.W. (Eds), Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. Journal of the Geological Society of London, Special Publication. **377:** 411-442.

Mora, A., Casallas, W., Ketcham, R.A., Gómez, D., Parra, M., Namson, J., Stockli, D., Almedral, A., Robles, W., Ghorbal, B. (2015). Kinematic restoration of contractional basement structures using thermokinematic models: A key tool for petroleum system modeling. AAPG Bulletin. **99** (8): 1575-1598.

Moreno, J., Velásquez, M. (1993). Estratigrafía y tectónica en los alrededores de Nunchía, departamento de Casanare, Colombia. Tesis de grado #325, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Montenegro, G., Barragán, M. (2011). Caguán and Putumayo Basin. In: F. Cediel, (editor), Petroleum Geology of Colombia. **4:** 127.

Montenegro, O., Bayona, G., Cardona, A., Restrepo-Moreno, S., Ojeda, C., Ayala, C. (2012). Procedencia de las unidades paleógenas de la cuenca del Catatumbo y su comparación con las cuencas adyacentes: relación con la convergencia de la placa Caribe. Geología Colombiana. **37** (2): 123-151.

Nie, J., Horton, B.K., Saylor, J.E., Mora, A., Mange, M., Garzione, C.N., Basu, A., Moreno, C.J., Caballero, V., Parra, M. (2012). Earth- Science Reviews. **110:** 111- 126. Doi: 10.1016/j.earscirev.2011.11.002

Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Torres, V., Zeilinger, G, Strecker, M. R. (2010). Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. Basin Research. Doi: 10.1111/j.1365-2117.2009. 00459.x

Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L. E., Horton, B. K. (2012). Detecting earliest shortening and deformation advance in thrust belt hinterlands: Example from the Colombian Andes. Geology. **40:** 175-178.

Patarroyo, G.D., Torres, G.A., Rincón, D.A., Cárdenas, C.P., Márquez, R.E. (2017). Bioestratigrafía e inferencias paleoambientales de las asociaciones de foraminíferos en las formaciones cretácicas La Luna-Colón (Cuenca del Catatumbo, Colombia). Boletín de Geología, **39** (3): 25-40.

Pedraza, P., Ramírez, Y. (2011). Petroleum Geology of Colombia Catatumbo Basin. F. Cediel (editor), F. Colmenares (coeditor). Fondo Editorial universidad EAFIT. V. 5.

Pérez, G., Salazar, A. (1978). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Geología Colombiana. **10:** 7-85.

Pindell, J., Kennan, L., Stanek, K.P., Maresch, W.V., Draper, G. (2006). Foundations of Gulf of México and Caribbean evolution: Eight controversies resolved. Geological Acta. **4** (1-2): 303-341.

Pindell, J.L., Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of México, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: An update. Geological Society, London, special publication. **328:** 1-55.

Restrepo-Pace, P. A., Colmenares, F., Higuera, C., Mayorga. M. (2004). A fold and-thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia— Style, kinematics, and timing constraints derived from seismic data and detailed surface mapping, in K. R. McClay, ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir. **82:** 598-613.

Reyes- Harker, A., Ruiz- Valdivieso, C.F., Mora, A., Ramírez-Arias, J.C., Rodríguez, G., Parra, F., Caballero, V., Parra, M., Moreno, N., Horton, B.K., Saylor, J.E., Silva, A., Valencia, V., Stoddi, D., Blanco, V. (2014). Cenozoic paleogeography of the Andean foreland and retroarc hinterland of Colombia. AAPG Bulletin. **9** (8): 1407- 1453. Doi: 10.1306/06181411110

Royero, J.M. (1998). Geología de la plancha 111 – Toledo: Memoria Explicativa. Ingeominas. Informe 2308a.

Sánchez, J., Horton, B.K., Tesón, E., Mora, A., Ketcham, R.A, Stockli, D.F. (2012). Kinematic evolution of Andean fold-thrust structures along the boundary between the Eastern cordillera and Middle Magdalena Valley basin, Colombia. Tectonics. **31:** TC3008. Doi: 10.1029/2011TC003089

Sarmiento, G. (1992). Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. Ingeominas, Bogotá, Boletín Geológico. **32** (1): 3-44.

Sarmiento L. F., ANH. Petroleum Geology of Colombia, Llanos basin. F. Cediel, (editor), G.Y Ojeda, (co-editor). Fondo editorial Universidad EAFIT. v. 9.

Saylor, J.E., Horton, B.K., Nie, J., Corredor, J., Mora, A. (2011). Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern cordillera, Colombia. Basin Research. **23:** 377-402. Doi: 10.1111/j.1365-2117.2010.00493.x

Schumm, S.A., Dumont, J.F., Holbrook, J.M. (2000). Active tectonics and alluvial rivers. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 276 p.

Spikings, R., Cochrane, R., Villagómez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290- 75 Ma). Gondwana Research. **27:** 95-139. Doi: 10.1016/j.gr.2014.06.004

Servicio Geológico Colombiano. (2015). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional identificados por el Servicio Geológico Colombiano grupo 2: zonas Sur A y sur B. Memoria explicativa, geología de la plancha 304 La Uribe. Contrato N° 512.

Van Der Lelij, R. (2013). Reconstructing north–western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: A geochronological, thermochronological and geochemical study. Doctorade thesis, University of Genève, 248 p. Genève. Doi: 10.13097/archive–ouverte/unige:31653

Veloza, G. E., Mora, A., Freitas, M., Mantilla, M. (2008). Dislocación de facies en el tope de la secuencia Cretácica de la subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena y sus implicaciones en el modelo estratigráfico secuencial colombiano. Boletín de Geología. **30** (1): 29-44.

Vergara, L., Rodríguez, G. (1997). The Upper Cretaceous and Lower Paleocene of the Eastern Bogotá Plateau and Llanos Thrustbelt, Colombia: Alternative appraisal to the nomenclature and sequence stratigraphy. Geología Colombiana. **22:** 51-79.

Villagómez, D., Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia- Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. Lithos. **160-161:** 228-249.

Villamil, T., Arango, C. (1998). Integrated stratigraphy of latest Cenomanian and early Turonian facies of Colombia. Paleogeographic evolution and non-glacial eustasy, Northern South America, SEPM Spec. Publ. **58:** 129-159.

Villamil, T. (1999). Campanian- Miocene tectonostratigraphy depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, **153** (1-4): 239-275.

Weber, M., Cardona, A., Valencia, V., García-Casco, A., Tobón, M., Zapata, S. (2010). U/Pb detrital zircon provenance from Late Cretaceous metamorphic units of the Guajira Peninsula, Colombia: Tectonic implications on the collision be- tween the Caribbean arc and the South American margin. Journal of South American Earth Sciences. **29:** 805-816.

Yepes, O. (2001). Dinoflagellates from the upper Campanian-Maastrichtian of Colombia and western Venezuela: Biostratigraphic and sequence stratigraphic implications. Submitted to the Office of Graduate studies of Texas A&M University, December 2001.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

Artículo de posesión

Ciencias de la tierra

Cuatro modelos de redes de drenaje

Oscar José Mesa

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 6 de diciembre de 2018

Resumen

Se revisan cuatro modelos cuantitativos de redes de drenaje. La característica principal de la redes es la autosemejanza. Pero las redes no son determinísticas y es necesario tener en cuenta la variabilidad. El primer modelo es simple, incorpora la variabilidad y es falsificable. Sin embargo, no reproduce las observaciones porque la consideración de la autosemejanza no es explícita. El segundo modelo corrige esta falencia, pero es determinista y no es falsificable. El tercer modelo mantiene la autosemejanza, incorpora la variabilidad, pero no se ha puesto a prueba. El cuarto modelo define un marco teórico más riguroso, aunque su verificación empírica aún está pendiente. Se concluye con un corto análisis de las implicaciones de los modelos para la geometría hidráulica y la semejanza hidrológica. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Geomorfología; Redes de drenaje; Hidrología; Auto-semejanza.

Four Models of Channel Networks

Abstract

We review four quantitative models of drainage networks. The main characteristic of channel networks is self-similarity. But networks are not deterministic, there is natural variability that needs to be taken into account. The first model is simple, it takes into account variability and can be tested. Nevertheless, it does not reproduce observations adequately because self-similarity is not explicitly considered in the model construction. The second model does consider self-similarity in the construction but it does not take into account variability and it cannot be tested. The third model considers both self-similarity and variability. The fourth model defines a firmer theoretical basis but it also needs testing against observations. We conclude stressing the need for a thorough test of the model against observations and analysing implications for hydraulic geometry and hydrologyc similarity. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Geomorphology; drainage networks; hydrology; self-similarity.

Introducción

En el prefacio de su libro, **Leopold** (1994) anota que no existe una teoría sobre la acción y el comportamiento de los ríos y que tal falta ha contribuido a su degradación. Se atreve a proponer una hipótesis para fundar esa teoría, y no parte de cero, hay aportes anteriores importantes, algunos de los cuales él mismo ha contribuido a construir durante una vida entera de trabajo práctico y teórico. El concepto principal de su propuesta es la aleatoriedad, pues las leyes físicas que controlan la formación y la evolución de los ríos no los determinan unívocamente. En la medida en que hay variabilidad y múltiples orígenes, por ejemplo el clima, hay lugar a diferentes respuestas de los ríos. Aunque elemental, y probablemente fácil de aceptar por lo general, este principio tiene profundas consecuencias que no necesariamente se incorporan en la teoría y la práctica. A partir de este primer principio el autor procede a proponer otros dos derivados. El primero se refiere a que las estructuras y las formas de los ríos, así como los ajustes ante eventuales cambios, responden a lo más probable, principio que sigue la línea de los fundamentos de la mecánica estadística. El segundo principio derivado, que también se nutre con ideas de la termodinámica, se refiere a la tendencia a minimizar el trabajo total y la uniformidad en la disipación de la energía. Claramente, el principio básico de la aleatoriedad es necesario. El primer principio derivado, en el que se observa lo más probable, es lógico. El segundo, en cambio, no se requiere de forma directa en este trabajo.

Correspondencia:
Oscar José Mesa, ojmesa@unal.edu.co
Recibido: 6 de abril de 2018
Aceptado: 3 de septiembre de 2018
Editor: Germán Poveda

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

Las redes de drenaje son auto formadas y auto mantenidas. Las regularidades que se observan son, por lo tanto, el resultado de procesos de realimentación complejos. La función de las redes es el transporte de agua y de sedimentos. En este sentido, el ambiente externo, la hidrología, el clima y la litología controlan su desarrollo y mantenimiento. En la medida en que estos controles permanezcan estables, hay lugar al equilibrio en las redes de drenaje. La red es una entidad orgánica, un sistema, así que lo que sucede en una de sus partes afecta las otras, estabilidad que se refleja en las numerosas regularidades observadas empíricamente. Es claro que la estabilidad es estadística y se observa a una escala de tiempo geomorfológica, del orden de entre varios años y varias décadas.

La red, sus características topológicas, planares, altitudinales y su geometría hidráulica, son el resultado de los eventos formadores. En general, los flujos de agua y de sedimento más frecuentes no son los que forman la red, sino los eventos de frecuencia intermedia, lo suficientemente grandes como para tener capacidad geomorfológica y lo suficientemente frecuentes para que su efecto acumulado deje la huella. Los eventos muy frecuentes son de menor magnitud y no tienen capacidad de trabajo, en tanto que los eventos extraordinarios son muy infrecuentes. En general, la frecuencia efectiva de los eventos formadores disminuye aguas arriba, es decir que en las cabeceras el principal trabajo geomorfológico lo hacen los eventos mayores y más infrecuentes. La pregunta importante desde esta perspectiva se refiere a la interpretación de las marcas del origen en la geomorfología: ¿cómo leer en las propiedades geomorfológicas las claves para la hidrología? (**Leopold, *et al.,*** 1964).

En escalas menores de tiempo, la forma de la tierra, así como las características de la red y su geometría hidráulica, determinan el movimiento del agua y los sedimentos. El estudio de las crecientes, especialmente, debe incorporar la geomorfología. Se carece de datos sobre la gran mayoría de cuencas, tanto en los países menos desarrollados como en los avanzados. Entre los hidrólogos ha habido un esfuerzo en este sentido, cuya historia se remonta 100 años (**Dawdy, *et al.,*** 2012), e incluye los estudios de regionalización, el concepto de predicción en cuencas sin medición (*Prediction in Ungauged Basins*, PUB) (**Dawdy,** 2007; **Sivapalan, *et al.,*** 2003), y el concepto de semejanza y homogeneidad hidrológicas. En los últimos 30 años, se ha desarrollado una teoría no lineal con base geofísica (**Gupta & Waymire,** 1998; **Gupta, *et al.,*** 2007; **Gupta,** 2016). Dado un campo de precipitación, la teoría requiere la predicción a partir de hidrógrafas de escorrentía en cada nudo de la red, para lo cual es necesario un modelo que transforme la lluvia en escorrentía (**Furey, *et al.,*** 2013), e incorpore la dinámica espacio-temporal del flujo en la red de drenaje (**Mantilla,** 2007). Para modelar está dinámica debe recurrirse a la topología, la geometría planar de la red y a su geometría hidráulica.

El concepto de semejanza juega un papel fundamental. ¿Qué simetrías se mantienen ante los cambios de escala? ¿Es posible usar las observaciones de una o varias cuencas para extrapolarlas a otras de una misma región homogénea, con el correspondiente factor de escalamiento? ¿Cuál es el factor de escalamiento?

Semejanza

Aunque el tema de la semejanza en física es muy amplio, se intenta aquí un muy breve resumen (**Gupta & Mesa,** 2014; **Barenblatt,** 1996, 2003). La idea fundamental es que las leyes de la naturaleza son independientes del sistema de unidades que se escoja para las mediciones. Como consecuencia, estas leyes son invariantes ante los cambios de escala. Matemáticamente, esto se expresa mediante funciones homogéneas, lo que implica leyes potenciales. De allí se desprende el teorema Pi de Buckingham, que permite simplificar la matemática, por ejemplo, reduciendo el número de argumentos necesarios de las funciones que expresan una ley física, o cambiando una ecuación de derivadas parciales por una ecuación diferencial ordinaria. La mayoría de los ejemplos exitosos de aplicación del análisis dimensional comparten una propiedad importante, que no siempre se enfatiza, pero que es muy necesaria. Hay una manera clara de separar entre variables importantes y aquellas que no son significativas, bien por muy grandes o muy pequeñas.

Por ejemplo, es posible derivar la tercera ley de Kepler usando solo el análisis dimensional (**Gibbings,** 2011). La variable de interés es T, el período orbital del planeta que depende de su masa m, la masa del Sol M, las dimensiones de la órbita representadas por los semiejes de las elipses a y b, y la constante universal de gravedad G, lo cual da origen a tres productos, uno que involucra el período y otros dos independientes, que pueden ser a/b o, en términos de la excentricidad, $e^2 = 1 - (b/a)^2$, y el otro, la relación entre las masas, m/M. Es decir,

$$\frac{GMT^2}{a^3} = f(m/M, e).$$

Aunque esta aplicación del teorema Pi es un avance importante, es posible ir mucho más allá si se considera que los dos números adimensionales, argumentos de la función a la derecha, son pequeños y, por lo tanto, no deben tener un papel significativo. Esta consideración, importante desde el punto de vista físico, se traduce en términos matemáticos en que la función f tiende a un límite no trivial cuando sus dos argumentos tienden a cero. En este contexto, no trivial significa que el límite es un número diferente a cero o a infinito. Con base en otros argumentos, se sabe que en este caso el límite es $4\pi^2$. En general, se dice que un problema es "autosemejante de primer orden" si existe el límite de la función f y este límite no es trivial cuando alguno de los productos adimensionales va a cero (o a infinito, si se toma el recíproco) (**Barenblatt,** 2003).

Sin embargo, hay muchos casos en los cuales un producto adimensional no se puede despreciar a pesar de ser o muy grande o muy pequeño. Matemáticamente, esto significa

que el límite de f no existe o es trivial (cero o infinito). En estos casos, se pierde la capacidad de simplificación de la autosemejanza de primer orden. No se pueden despreciar las variables correspondientes que, aunque pequeñas, siguen teniendo un papel. No obstante, existe una generalización del concepto de autosemejanza que se puede aplicar a aquellos casos para los cuales existe el límite trivial. Dicha generalización consiste en suponer que el límite (a cero o a infinito) es potencial. Esto se conoce como "autosemejanza asintótica de segunda clase". **Barenblatt** (1996) desarrolla el concepto con mayor profundidad. Para determinar los exponentes, los cuales son anómalos, es decir no son los que indica el análisis dimensional, se requiere de otras herramientas, como los 'grupos de renormalización' en mecánica estadística, por ejemplo. En general no es posible su determinación mediante el análisis dimensional.

Un ejemplo simple es la determinación de la longitud de una curva fractal, en contraste con la de una curva suave (**Barenblatt,** 2003). Sea L_η la longitud de la poligonal de segmentos de longitud ξ que aproxima una curva continua y va entre dos puntos separados por la distancia η. L_η depende de los dos parámetros dimensionales η y ξ. La aplicación del análisis dimensional da que $L_\eta = \eta f(\eta/\xi)$. Para una curva suave, por ejemplo un semicírculo, a medida que $\xi \to 0$ el argumento $\eta/\xi \to \infty$, la función f va a un límite no trivial, en este caso $\pi/2$, en tanto que para una curva fractal, el límite de f cuando $\eta/\xi \to \infty$ es infinito. De hecho, a partir de la geometría fractal se sabe que

$$f(\eta/\xi) \simeq (\eta/\xi)^{(D-1)}.$$

El exponente anómalo $D > 1$, es decir, la dimensión fractal, no se puede determinar a partir del análisis dimensional. **Barenblatt** (1996) presentó un método para proceder en estos casos, y numerosos ejemplos de turbulencia, relaciones alométricas en biología y aguas subterráneas, entre otros.

Las propiedades empíricas observadas en las redes de drenaje y la geometría hidráulica sugieren que ocurren el escalamiento y la autosemejanza, no de primer orden, sino de segunda clase.

Las leyes de Horton

Horton (1945) descubrió las leyes que llevan su nombre en el análisis cuantitativo de redes de drenaje extraídas de mapas. La motivación original era la definición del tamaño de un río a partir de la jerarquía de sus tributarios. El método más usado para definir la jerarquía en un patrón de ramificación es el método de ordenamiento de Horton–Strahler, también conocido como el método de Strahler (**Strahler,** 1952; 1957), el cual modifica ligeramente el ordenamiento original de **Horton**. El ordenamiento de Strahler asigna el orden $\omega = 1$ a todos los nacimientos, es decir, las corrientes que no se bifurcan cuando se recorren hacia aguas arriba. Estas corrientes corresponden al mayor nivel de resolución para la red y, por lo tanto, definen la escala espacial. Al avanzar aguas abajo, cuando dos corrientes de igual orden ω se juntan, forman una corriente de orden $\omega + 1$. Cuando dos corrientes de orden diferente se encuentran, el canal aguas abajo preserva el orden del mayor de los dos. Esto se aplica a lo largo de toda la red, y ordena todos los segmentos (tramo de río entre dos confluencias consecutivas, o entre un nacimiento y la siguiente confluencia, o entre la última confluencia y la salida de la cuenca). El orden a la salida se denota como Ω. Según esta definición, cualquier red tiene únicamente una corriente (sucesión consecutiva de segmentos del mismo orden) de orden Ω, que también se le asigna a la cuenca. En un mapa este ordenamiento de Strahler es equivalente uno a uno al procedimiento de poda (como si fuera un árbol, de hecho las redes son árboles de acuerdo a la teoría matemática de grafos). Es decir, si todos los segmentos de orden 1 se podan y se reordena la red, los segmentos originales de orden 2 son ahora de orden 1, los de orden 3 pasan a ser ahora de orden 2, y así sucesivamente. El orden de la cuenca decrece hacia una unidad y el procedimiento de ordenación pone de presente la estructura de ramificación y autosemejanza. Toda subcuenca es una cuenca.

Este ordenamiento sirvió para encontrar las leyes de composición de Horton, también conocidas simplemente como leyes de Horton. La más conocida es la ley del número de corrientes N_ω de orden ω en una cuenca de orden Ω. Tradicionalmente, le ley se escribe como

$$\frac{N_\omega}{N_{\omega+1}} \approx R_B, \qquad 1 \le \omega \le \Omega. \tag{1}$$

El número R_B se denomina la relación de bifurcación. Las observaciones en redes reales indican que hay un rango estrecho de posibles valores de R_B, típicamente entre 3 y 5. Estas leyes no son formales, no se han demostrado con base a primeros principios, son de carácter estadístico, es decir hay lugar a la variabilidad. Sin embargo, se reportan ampliamente para redes de drenaje en diversidad de ambientes. Se han observado relaciones semejantes para la longitud, la pendiente, el área y otras variables de la geometría hidráulica. Como se verá, se puede demostrar la existencia de las leyes de Horton en varios de los modelos propuestos, como el modelo de Shreve o el modelo de ramificación geométrico.

El modelo de Shreve

Shreve (1966, 1967, 1969, 1974) desarrolló el llamado modelo aleatorio de las redes de drenaje, lo que aportó el primer intento de explicación teórica de las observaciones condensadas en la ecuación (1). El modelo tiene tres propiedades muy importantes. Como se verá, se fundamenta en muy pocas premisas que, además, son simples. Esta primera característica es clave en un modelo, que no es otra cosa que un instrumento para comprender la realidad. No tiene mucho sentido que el modelo sea tan complejo como la realidad. La segunda propiedad del modelo es que involucra la variabilidad, lo que coincide con el principio fundamental de **Leopold** del que se habló en la introducción. Consecuencia directa de esta propiedad es que se observa lo más probable. La tercera propiedad es que el modelo se puede verificar,

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

o falsificar. Esta característica es esencial en la ciencia. Los modelos ajustables no permiten avanzar en la comprensión. En general, es fácil obtener un resultado determinado de varias maneras, algunas por razones equivocadas. La única manera de avanzar en el conocimiento es poniendo a prueba lo que hasta el momento se toma como verdad. El modelo aleatorio de Shreve cumple con esta propiedad y las otras dos señaladas antes. Como se verá, la evidencia con la que se cuenta apunta en contra del modelo, es decir el modelo no pasa la prueba. A continuación se ilustran estas ideas con predicciones contrastadas con observaciones. Otras fuentes que pueden consultarse en este sentido son los estudios de **Mesa** (1986), **Mesa & Gupta** (1987), **Mantilla, *et al.*** (2000) y **Troutman & Karlinger** (1998).

Hipótesis del modelo aleatorio

En el modelo aleatorio tiene un papel importante el concepto de magnitud de un segmento, que cuenta el número de fuentes aguas arriba. La primera hipótesis del modelo es que todas las redes topológicamente diferentes (RTD) de igual magnitud m, son igualmente probables. La segunda es que las longitudes y las áreas de los segmentos de una red provienen de variables aleatorias independientes. Con estas pocas hipótesis es posible construir la teoría. El número de las RTD de magnitud m crece muy rápido con m, lo que da origen a una convergencia estadística en el mismo sentido de la ley de los grandes números y del teorema del límite central.

Número de las RTD de una magnitud dada

Sea a_m el número de las RTD de magnitud m. Toda red de magnitud $m > 1$ puede concebirse como compuesta por dos subredes: de magnitud k la de la izquierda y, por lo tanto, $m - k$, la de la derecha. El número de posibles RTD a la izquierda es a_k y a la derecha es a_{m-k}. Con base en el principio multiplicativo, hay $a_k a_{m-k}$ maneras de que esto ocurra. Ahora k puede tomar cualquier valor entre 1 y $m - 1$. En resumen se tiene que

$$a_1 = 1, \quad a_m = \sum_{k=1}^{m-1} a_k a_{m-k}, \quad para\ m \geq 2.$$

Al aplicar la fórmula recursivamente se tiene que

$\{a_m\} = \{1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, ...\}$.

La función generatriz $A(x) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^m$ permite obtener una fórmula explícita, pues si se aplica a la anterior ecuación de recurrencia se tiene $A(x) = x + A^2(x)$. Las funciones generatrices son una poderosa herramienta para resolver múltiples problemas que, de otra manera, serían intratables, pero su potencial raramente se explota. En realidad, son un caso particular de la familia de transformadas, entre las que se encuentran la transformada de Laplace, la función característica y la función generatriz de momentos. Se pueden encontrar mayores detalles en **Feller** (1968). Recurriendo al algebra elemental se obtiene $A(x) = (1-\sqrt{1-4x})/2$, que se expande en series usando el teorema binomial y, por lo tanto, es una fórmula explícita para los coeficientes

$$a_m = \frac{1}{2m-1}\binom{2m-1}{m} \sim \frac{2^{2m-2}}{m\sqrt{\pi m}}$$

La última aproximación[1] usa la fórmula de Stirling (1730): $n! \sim n^n e^{-n}\sqrt{2\pi n}$, que da excelentes aproximaciones incluso para valores moderados de n, por ejemplo, $1! \cong 0{,}9221$; $2! \cong 1{,}919$; $5! = 120 \cong 118{,}019$; $10! = 3\,628\,800 \cong 3\,598\,600$ (**Feller,** 1968).

Se invita al lector a tomar papel y lápiz y hacer un esquema de las diferentes redes para una magnitud siquiera de 6. También es instructivo seguir el detalle de cada uno de los pasos de esta y las siguientes demostraciones.

Bifurcación: ley de los grandes números

Sea $N_\omega(m)$ el número de corrientes de orden ω en una red tomada al azar entre la población de las RTD de magnitud m. Según la hipótesis del modelo, $N_\omega(m)$ es una variable aleatoria cuya distribución de probabilidades se puede calcular y, por lo tanto, también su media y su varianza.

Sea $b_{m,k}$ el número de las RTD con magnitud m y con k corrientes de orden 2. Por lo tanto, al aplicar la hipótesis y la fórmula elemental de probabilidad como la fracción entre el número de casos favorables sobre el número de casos posibles,

$$\Pr\{N_2(m) = k\} = \frac{b_{m,k}}{a_m}.$$

Se va a demostrar que cuando $m \to \infty$, $E[N_2(m)]$ crece como $m/4$, mientras que $\mathrm{Var}[N_2(m)]$ crece como $m/16$, por lo tanto, $\mathrm{Var}[N_2(m)/m] \to 0$ y se tiene la convergencia en una probabilidad de $N_2(m)/m$ y una constante de

$$R_b^{-1} = \lim_{n\to\infty}\frac{N_2(m)}{N_1(m)} = \lim_{n\to\infty}\frac{N_2(m)}{m} = 4^{-1}.$$

Este resultado, aplicado repetidamente usando el argumento de la poda, explica la ley de bifurcación de Horton (ecuación (1)). Sin embargo, con la limitación de que asintóticamente $R_b = 4$.

Para proceder a la demostración se escribe una ecuación en recurrencia para $b_{m,k}$ usando los mismos argumentos que en la sección anterior: descomposición en subredes y funciones generatrices,

$$b_{1,0} = b_{2,1} = 1, \quad b_{1,k} = b_{2,k} = 0, \quad \text{para otros } k,$$

$$b_{m,k} = \sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=0}^{k} b_{i,j}\, b_{m-i,k-j}, \quad \text{para } m \geq 3 \text{ y para cualquier } k.$$

Sea $B_m(y) = \sum b_{m,k} y^k$, luego $B_m(1) = a_m$, $B_1(y) = 1$, $B_2(y) = y$, y para $m \geq 3$

$$B_m(y) = \sum_{i=1}^{m-1} B_i(y)\, B_{m-i}(y).$$

La tarea es calcular $E[N_2(m)]$ y $\mathrm{Var}[N_2(m)]$,

$$E[N_2(m)] = \frac{\sum_k k b_{m,k}}{a_m} = \frac{c_m}{a_m}, \text{ con } \quad c_m = \sum_k k b_{m,k} = B_m'(1),$$

[1] Explicación de la nomenclatura: si u y v dependen de la variable x que tiende a un límite, digamos a, se dice que $u = O(v)$, y se lee que u es del mismo orden que v, si en el límite u/v permanece acotado. Se dice que u es de un orden menor que v y se escribe $u = o(v)$, si $u/v \to 0$. Por último, se dice que u es asintótica a v cuando $x \to a$ y se escribe $u \sim v$, si $u/v \to 1$. Nótese que en este caso el error relativo entre u y v, $(u - v)/v$ tiende a cero.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

que se obtiene de tomar la derivada en la ecuación para B_m (y), luego

$$c_1 = 0, \quad c_2 = 1, \quad c_m = 2\sum_{i=1}^{m-1} c_i a_{m-i}, \quad \text{para } m \geq 3.$$

Por lo tanto, $C(x) = \sum c_m x^m$, la función generatriz de la secuencia c_m satisface

$$C(x) = x^2 + 2C(x)A(x) = \frac{x^2}{\sqrt{1-4x}} = \sum_{m=2}^{\infty} 2\binom{2m-5}{m-2} x^m.$$

de donde se puede calcular

$$E[N_2(m)] = \frac{2\binom{2m-5}{m-2}}{\frac{1}{2m-1}\binom{2m-1}{m}} = \frac{m(m-1)}{2(2m-3)}.$$

Ahora, usando la segunda derivada de B se procede al cálculo de Var[N_2 (m)],

$$E[N_2(m)(N_2(m)-1)] = \sum_k \frac{k(k-1)b_{m,k}}{a_m} = \frac{d_m}{a_m},$$

donde $d_m = B_m''(1) = 2\sum_i [d_i a_{m-i} + c_i c_{m-i}]$, para $m > 2$ y $d_1 = d_2 = 0$. Luego la función generatriz cumple

$$D(x) = \sum_m d_m x^m = 2D(x)A(x) + 2C^2(x) = \frac{2C^2(x)}{1-2A(x)}$$
$$= \frac{2x^4}{(1-4x)^{3/2}} = \sum_{m=4}^{\infty} 2(2m-7)\binom{2m-8}{m-4} x^m.$$

Recordando la fórmula de la varianza, se tiene que

$$\text{Var}[N_2(m)] = \frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{4(2m-3)(2m-5)} + \frac{m(m-1)}{2(2m-3)} - \left[\frac{m(m-1)}{2(2m-3)}\right]^2$$
$$= \frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{2(2m-3)^2(2m-5)}.$$

Esto completa la demostración.

La importancia del cálculo de la varianza y del límite (ley de grandes números) que se desprende reside en la posibilidad de contrastar la variabilidad natural con las predicciones del modelo mediante pruebas estadísticas, como se ilustrará más adelante.

Ley del número de segmentos de Horton

Con base en el mismo tipo de argumentos, **Mesa** (1986) encuentra una ley de grandes números para S_ω (m), el número de segmentos de orden ω en una red de magnitud m que explica la ley de Horton para el número de segmentos, con relación R_c. Para $\omega = 2$ y $m \to \infty$

$$\mathsf{E}[S_2(m)] \sim \frac{m}{2} \quad \text{y} \quad \text{Var}[S_2(m)] = O(m).$$

Por lo tanto, como $S_1 = m$, se tiene la siguiente convergencia en probabilidad cuando $m \to \infty$

$$\mathrm{R_c} = \lim_{\mathrm{n}\to\infty} \frac{\mathrm{S_2(m)}}{\mathrm{S_1(m)}} = 1/2.$$

Ley de longitudes de Horton

De acuerdo a las hipótesis las longitudes de los segmentos son variables aleatorias independientes idénticamente distribuidas ℓ_i con media λ. Luego, del anterior resultado se deduce que la relación entre L_2 (m), la longitud de una corriente de orden 2 y L_1 (m), la longitud de una corriente de orden 1, tiende a la siguiente relación de longitudes cuando $m \to \infty$

$$R_L = \lim_{n\to\infty} \frac{\mathsf{E}[L_2(m)]}{\mathsf{E}[L_1(m)]} = 2,$$

entonces, claramente E[L_1 (m)] = λ. Para calcular el valor esperado de L_2 (m) se pueden sumar las longitudes de todos los segmentos de orden 2 y dividir por el número de corrientes,

$$E[L_2(m)] = E\left[\frac{1}{N_2(m)}\sum_{i=1}^{S_2(m)} \ell_i\right] = E\left[\frac{S_2(m)/m}{N_2(m)/m}\frac{1}{S_2(m)}\sum_{i=1}^{S_2(m)} \ell_i\right] = 2\lambda.$$

Si la media de las longitudes de los segmentos externos y los internos no es la misma, R_L deberá afectarse por la relación entre estas. Además, usando el argumento del podado, la extensión a los órdenes subsiguientes no es directa, en vista de que en las corrientes de orden $\omega \geq 3$ habrá otros segmentos no contabilizados en este cálculo como resultado de los tributarios laterales de orden menor a $\omega - 1$. Como en el caso de la relación de bifurcación, asintóticamente el modelo está limitado topológicamente a $R_L = 2$.

Ley de áreas de Horton

Con base en un argumento semejante al anterior y en la hipótesis sobre la independencia de las áreas de los segmentos, así como la ley de grandes números de la teoría de probabilidades para un número aleatorio de sumandos, se obtiene directamente la ley de Horton para las áreas, puesto que una red o subred de magnitud arbitraria k tiene exactamente $2k - 1$ segmentos.

Relación entre el área y la longitud

Bajo la hipótesis adicional de que la longitud de los segmentos es exponencial, **Mesa** (1986) (ver también **Mesa & Gupta,** 1987) encontró lo siguientes resultados para D_m, el diámetro de una red de magnitud m cuando $m \to \infty$,

$$\mathrm{E}[D_m] \sim \lambda\sqrt{4\pi m} \text{ y } \mathrm{Var}[D_m] \sim 4\pi(\pi - 3)\,\lambda^2 m/3.$$

No hay pues ley de grandes números para esta variable, sino convergencia en la distribución cuando D_m se escala con $m^{0.5}$, es decir, es diferente de los casos anteriores, en los cuales la varianza tiende a cero (**Mesa,** 1986; **Gupta, *et al.*,** 1990). En la literatura se ha reportado la famosa Ley de Hack (1957) y pueden consultarse también otros estudios posteriores de **Mueller** (1973), **Eagleson** (1970) y **Shreve** (1974), en los cuales se indica que el exponente del área para calcular la longitud del canal principal es del orden de 0,5533 para cuencas con un rango de siete órdenes de magnitud en todo el mundo. Se ha reportado que cuando se separan los datos por rango de áreas, el exponente es aproximadamente de 0,6 para cuencas menores de 20.000 km^2, de aproximadamente 0,5 para cuencas de hasta 250.000 km^2, y para cuencas mayores decae a 0,466. Los resultados del modelo permiten calcular el valor del exponente para cualquier valor de m; específicamente para 10, 100 y 500,

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

los exponentes son 0,608; 0,530 y 0,513, respectivamente. Todo indica que las discrepancias son significativas (ver Figura 1).

Relación entre magnitud y orden

Sea M_ω la magnitud de una red de orden ω; dado que intuitivamente se sabe que cuando la magnitud aumenta, también aumenta el orden, es posible calcular los momentos asintóticos de la distribución de M_ω cuando $m \to \infty$,

$$E[M_\omega] \sim 2^{2\omega-1}/3+1/3 \quad y \quad Var[M_\omega] \sim 0.4E^2[M_\omega].$$

No hay, pues, ley de grandes números para esta variable, sino la indicación de una convergencia en la distribución cuando se escala adecuadamente.

En un estudio de muchas cuencas de los Estados Unidos, **Peckham** (1995b) encontró desviaciones muy grandes entre las observaciones y las predicciones. Las observaciones para una de las cuencas consideradas fueron: $\{M_\omega\}$ = {1,3,14,63,318,1643,5859,31764}; En tanto que las predicciones fueron: {1, 3, 11, 43, 171, 683, 2731, 10923}.

Evidencia empírica

Parece haber un patrón en las desviaciones entre las observaciones y las predicciones. En primer lugar, cuando se evalúa la varianza en el modelo, las desviaciones son muy significativas, varias desviaciones estándares por encima del valor esperado. En segundo lugar, las desviaciones parecen estar siempre en el mismo sentido. Las cuencas naturales tienden a ser mucho más esbeltas que las predicciones del modelo. Por ejemplo, para un orden dado, la magnitud observada es muy superior a la predicción, lo que quiere decir que el modelo subestima la tendencia a que haya más tributarios laterales de orden menor. Este punto quedará más claro al estudiar el modelo de Tokunaga

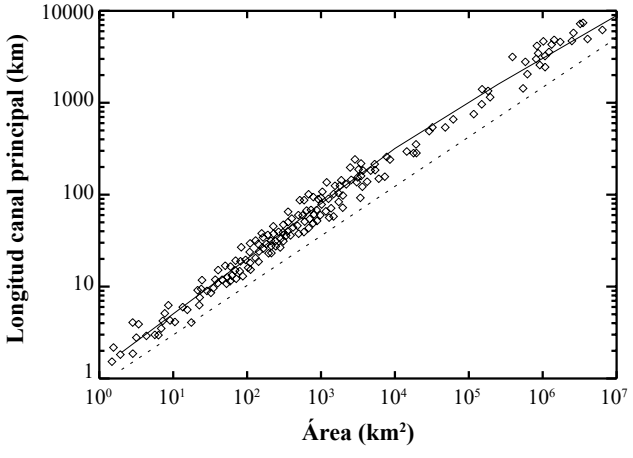


Figura 1. Diagrama de dispersión entre la longitud y el área para 461 cuencas en todo el mundo, incluidas las mayores (elaboración propia a partir de datos de **Hack** (1957), **Langbein, *et al.*** (1947) y **Leopold, *et al.*** (1964)). La línea continua tiene tramos de pendientes de 0,6, 0,5 y 0,466, respectivamente. La línea punteada tiene una pendiente de 0,5533 y está desplazada verticalmente para mejorar la visibilidad.

Modelo de Tokunaga

La propiedad fundamental de las redes de drenaje que captura el modelo determinístico de Tokunaga es la recursividad o autosemejanza; las redes resultantes se denominan árboles topológicamente autosemejantes (ATS). Las fuentes principales para esta sección son los estudios de **Tokunaga** (1978, 1966), **LaBarbera & Rosso** (1989), **de Vries, *et al.*** (1994), **Peckham** (1995a, b), **Peckham & Gupta** (1999), **Rodríguez-Iturbe & Rinaldo** (2001), y **Mantilla, *et al.*** (2000).

Eiji Tokunaga introdujo el modelo que lleva su nombre (**Tokunaga**, 1966, 1978) basándose en el ordenamiento de Strahler y usando una construcción autosemejante. A diferencia del modelo de **Shreve** (1967), este es determinístico, y no incorpora la variabilidad estadística observada. La topología es recursiva, como se explica a continuación, y la longitud de todos los segmentos se asume constante, igual a λ.

Peckham (1995a) mostró que, a pesar de que geométricamente es muy simple y su única estructura es la recursividad topológica, el modelo de Tokunaga tiene capacidad de describir varias de las propiedades observadas en las redes de drenaje naturales. Por ejemplo, la relación de la bifurcación en las redes naturales está en el rango de $3 < R_B < 5$, lo que el modelo de Tokunaga puede representar, en tanto que el modelo aleatorio predice $R_B = 4$.

Construcción

El concepto clave para la construcción de los árboles es el generador de tributarios laterales $T_{\omega,\omega-k}$, que es el número de corrientes de orden $\omega - k$ que lateralmente se unen a las corrientes de orden ω. Como las redes naturales exhiben variabilidad, $T_{\omega,\omega-k}$ se puede interpretar como el número medio. Es decir, se considera la clase de redes determinísticas en la cual toda corriente de orden ω tiene dos tributarios aguas arriba y $T_{\omega,\omega-k}$ tributarios laterales de orden $\omega - k$ donde ω varía entre dos y el orden de la cuenca Ω, y k varía entre 1 y $\omega - 1$.

Los árboles topológicamente autosemejantes (ATS) son un subconjunto de esta clase para los cuales los generadores cumplen con $T_{\omega,\omega-k} = T_k$, $k = 2, 3, \cdots$. Es decir, los generadores solo dependen de la diferencia de órdenes, no del orden mismo. Si los generadores se organizan en forma matricial, resulta una matriz de Toeplitz para los árboles auto-semejantes, pero Tokunaga impuso más restricciones en los generadores, considerando que $T_k/T_{k-1} = c$, $k = 2, 3, \cdots$, y $T_1 = a$, donde c y a son parámetros constantes asociados a la topología de una red particular. Esto lleva a la siguiente expresión para los generadores,

$$T_k = ac^{k-1}, \cdots k = 1, 2, \cdots, \qquad (2)$$

lo cual representa los ATS promedio (**Dodds & Rothman,** 1999). Estos parámetros se pueden estimar a partir de las observaciones en una red natural. La figura 2 muestra ejemplos de orden 4. La tabla 1 presenta los valores promedio con los parámetros $a = 1$ y $c = 2$.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

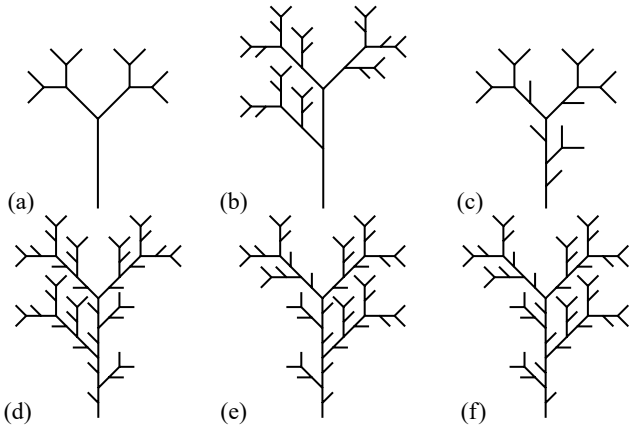


Figura 2. Árboles autosemejantes de orden 4. **(a)** $T_k = 0$ para todo k; **(b)** $T_1 = 1$, $T_k = 0$ para $k > 1$; **(c)** $T_1 = 0$, $T_k = 2^{k-2}$ para $k > 1$; **(d-f)** $T_k = 2^{k-1}$ para todo k. Los grados de libertad se ilustran de izquierda a derecha (tomado de **Peckham,** 1995b).

Tabla 1. Valores para el modelo autosemejante con los parámetros $a = 1$ y $c = 2$, los cuales corresponden a $R_B = 4$, $R_M = 4$, y $R_C = 2$, lo que equivale al modelo promedio de Shreve (tomado de **Peckham,** 1995b). C_ω y T_ω se definen en las secciones sobre "Construcción" y "Ley del número de segmentos", respectivamente.

	N_ω	M_ω	C_ω	T_ω
1	10923,0	1,0	1,0	1,0
2	2731,0	3,0	2,0	2,0
3	683,0	11,0	4,0	4,0
4	171,0	43,0	8,0	8,0
5	43,0	171,0	16,0	16,0
6	11,0	683,0	32,0	32,0
7	3,0	2731,0	64,0	64,0
8	1,0	10923,0	128,0	128,0

Sea N_ω el número de corrientes de orden ω. De la definición de los ATS se desprende la siguiente ecuación de recurrencia para N_ω, es decir, el número total de corrientes de orden ω en la red:

$$N_\Omega = 1, \text{ y } N_\omega = 2N_{\omega+1} + \sum_{j=1}^{\Omega-\omega} T_j N_{\omega+j}, \text{ para } \omega = \Omega - 1, \Omega - 2, \cdots, 1.$$

La ecuación está expresada para proceder recursivamente con el cálculo desde el orden mayor Ω hasta el orden menor 1. El primer término de la derecha expresa el hecho de que por cada corriente de orden $\omega + 1$ se requieren dos corrientes de orden ω que la preceden aguas arriba, más las demás tributarias laterales de orden ω que caen en canales de orden mayor a ω, las cuales están contabilizadas en el segundo término.

Peckham (1995b) analizó varias cuencas. La tabla 2 presenta los valores promedio observados para la cuenca del río Kentucky y la tabla 3, las predicciones del modelo de Tokunaga. La ecuación (3) muestra la matriz de tributarios laterales ($(T_{\omega,\omega-k})$), $\omega = 2, 3, \cdots, \Omega$, $k = 1, 2, \cdots, \Omega - 1$ para esta cuenca:

$$T = \begin{bmatrix} 1,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3,2 & 1,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7,6 & 2,8 & 1,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15,6 & 6,2 & 2,9 & 1,0 & 0 & 0 & 0 \\ 54,8 & 20,3 & 10,8 & 3,2 & 1,8 & 0 & 0 \\ 87,0 & 27,0 & 16,0 & 5,3 & 2,0 & 1,0 & 0 \\ 408,0 & 115,0 & 40,0 & 20,0 & 12,0 & 3,0 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ley de bifurcación de Horton

MacConnell & Gupta (2008) demostraron la ley de Horton para los ATS usando funciones generatrices para la secuencia N_ω y los generadores de Tokunaga. Es decir, demostraron que $N_\omega/N_{\omega+1}$ converge en R_B en el límite cuando $\Omega - \omega \to \infty$. El límite aplica para corrientes de orden pequeño, $\omega = 1, 2, \cdots$, a medida que el orden $\Omega \to \infty$. La interpretación de este límite de **MacConnell & Gupta** (2008) es la siguiente: "Note que si el orden de la red Ω puede incrementarse, es

Tabla 2. Mediciones para la red de drenaje del río Kentucky (tomado de **Peckham,** 1995b)

	N_ω	M_ω	C_ω	A_ω	L_ω
1	25428	1	1,00	0,30	0,43
2	5433	3	2,00	1,30	1,07
3	1241	13	5,00	6,50	2,45
4	264	58	11,90	29,90	5,45
5	63	247	25,00	130,80	12,12
6	12	1319	86,30	697,50	44,65
7	3	5156	129,00	2691,10	62,69
8	1	25428	561,00	13499,30	274,95
	R_B	R_M	R_C	R_A	R_L
	4,60	4,50	2,40	4,70	2,50

Tabla 3. Valores correspondientes al río Kentucky en el modelo autosemejante con los parámetros $a = 1,2$ y $c = 2,4$ (tomado de **Peckham,** 1995b)

	N_ω	M_ω	C_ω	T_ω
1	24572,7	1,0	1,0	1,2
2	5408,7	3,2	2,2	2,9
3	1190,8	13,1	5,1	6,9
4	262,5	58,1	12,0	16,6
5	58,1	262,5	28,6	39,8
6	13,1	1190,8	68,4	95,6
7	3,2	5408,7	163,9	229,3
8	1,0	24572,7	393,3	550,4
	R_B	R_M	R_C	
	4,5	4,5	2,4	

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

de esperar que haya más corrientes. Sin embargo, cuando todas las corrientes de los órdenes menores ω y $\omega+1$ en una cuenca de orden muy grande Ω se cuentan, es de esperar que se ha contado una porción significativa de los tributarios laterales, y que por tanto la relación de bifurcación observada se acerca a la relación teórica. Este argumento clarifica el uso del límite, $\Omega - \omega \to \infty$".

El primer paso es la sustitución $\phi_k = N_{\Omega-k}$ con la que se reescribe la ecuación de recurrencia como

$$\phi_0 = 1,\ \phi_1 = 2+a, \quad \text{y} \quad \phi_k = (2+a)\phi_{k-1} + \frac{a}{c}\sum_{j=2}^{k} c^j \phi_{k-j}, \quad \text{para} \quad k \geq 2.$$

Si $\Phi(z) = \sum \Phi_k z^k$, es fácil ver que

$$\Phi(z) = 1 + (2+a)z\Phi(z) + \frac{acz^2}{1-cz}\Phi(z),$$

lo que se resuelve en

$$\Phi(x) = \frac{1 - cz}{(r_1 - z)(r_2 - z)},$$

con $r_{1,2} = [(2+a+c) \pm \sqrt{(2+a+c)^2 - 8c}]/(4c)$, y las raíces del denominador $1 - (2 + a + c)\, z + 2cz^2$. Para la expansión en series se procede mediante el método tradicional de fracciones parciales con coeficientes indeterminados para obtener $a_k = (\alpha r_1^{-(k+1)} + \beta r_2^{-(k+1)})/(2c)$. Por lo tanto, el resultado de interés para la relación de bifurcación es

$$R_b = \lim_{k\to\infty} \frac{a_{k+1}}{a_k} = \frac{1}{r_2} = 2cr_1 = \frac{(2+a+c) + \sqrt{(2+a+c)^2 - 8c}}{2}.$$

En otras palabras,

$$\lim_{\Omega-\omega\to\infty} \frac{N_\omega}{N_{\omega+1}} = R_b = \frac{(2+a+c) + \sqrt{(2+a+c)^2 - 8c}}{2}.$$

Nótese que los árboles del modelo aleatorio son también autosemejantes en la media con $a = 1$ y $c = 2$. En este caso, la predicción del modelo de Tokunaga $R_B = 4$ concuerda con las del modelo aleatorio (**Shreve,** 1967) (Tabla 1).

Ley de magnitudes

A partir del anterior resultado, **MacConnell & Gupta** (2008) también dedujeron una ley de Horton para la magnitud M_ω de una corriente de orden ω, y para $\omega = 1,2,\cdots$. Nótese que todos los árboles de orden ω en cualquier ATS tienen la misma M_ω. La siguiente ecuación evidencia claramente la construcción:

$$M_1 = 1, \text{ y } M_\omega = 2M_{\omega-1} + \sum_{k=1}^{\omega-1} T_k M_{\omega-k}, \text{ para } \omega > 1.$$

Nótese el parecido de esta expresión con la correspondiente para N_ω y el cambio subsiguiente en los subíndices. La identidad $M_j = N_{\Omega-j+1}$ se demuestra fácilmente por inducción: claramente $M_1 = N_\Omega = 1$, ahora se asume para $j - 1$ y se demuestra para j usando la expresión de recurrencia para M_j. No es sorprendente, entonces, que exista una ley de magnitudes de Horton con una relación R_M igual a la relación de bifurcación,

$$\lim_{\Omega-\omega\to\infty} \frac{M_{\Omega-\omega+1}}{M_{\Omega-\omega}} = R_M = R_b,$$

donde $R_M = R_B$ es la relación de magnitudes de Horton. Las observaciones soportan esta ley (**Peckham,** 1995b).

Ley del número de segmentos

Sea C_ω el número de segmentos en una corriente de orden ω en un ATS. Como en el caso anterior, todas las corrientes del mismo orden tienen igual número de segmentos, que es 1 más la suma del número de sus tributarios laterales, es decir, $C_\omega = 1 + \Sigma_{k=1}^{\omega-1} T_k$. Existe una ley de Horton para el número de segmentos, con la correspondiente relación de segmentos $R_c = \lim_{k\to\infty} C_{k+1}/C_k$. Para los generadores de Tokunaga es fácil mostrar que $R_C = c$.

Leyes geométricas de Horton

Las anteriores leyes topológicas se generalizan en leyes geométricas si se asume la segunda hipótesis de Shreve. Es decir, se tendrían una ley de longitudes (proporcional al número de segmentos) y una ley de áreas (proporcional a la magnitud).

Fractalidad

Es apenas natural que un árbol autosemejante sea fractal (ver, por ejemplo, en **Feder,** 1988, detalles sobre los fractales). Para investigar esta propiedad se requiere asumir una estructura geométrica. La más simple es la que asume que todos los segmentos tienen igual longitud.

Una manera cómoda de estudiar este tema es proceder a una construcción iterativa semejante a la empleada para otros fractales, construcción que es equivalente a la definición. Se inicia con la corriente de orden mayor Ω, que se asume de longitud unitaria. En cada etapa sucesiva k se incorporan las corrientes de orden $\Omega - k$, para $k = 1,2, \cdots, \Omega - 1$. En la etapa k se tiene un pre-árbol binario con n_k pre-segmentos. Lo equivalente a la magnitud en esta etapa es el número de segmentos externos en el pre-árbol, que es $N_{\Omega-k}$. Luego,

$$n_k = 2N_{\Omega-k} - 1 \sim 2R_b^k.$$

Como factor de escala ε_k para las longitudes en esta etapa se toma el inverso del número de pre-segmentos en la corriente principal (que tiene longitud unitaria):

$$\varepsilon_k = (C_{k+1})^{-1} \sim R_c^{-k}.$$

Luego, la dimensión fractal se calcula por la fórmula usual como

$$D_T = \lim_{k\to\infty} \frac{-\log n_k}{\log \varepsilon_k} = \frac{\log R_b}{\log R_c}.$$

Como $R_B = R_A$ y la longitud de los segmentos son constantes, la relación de longitudes de Horton es $R_C = R_L$, y se sigue que $R_L = R_A^{1/D_T}$. Para las redes naturales se ha observado que $1,7 < D_T < 1,8$. La clase de árboles ATS predice valores de D_T menores o iguales a 2.

Ley de Hack

Debe recordarse que se ha reportado que $L = aA^\beta$, con β mayor que 0,5. La autosemejanza de un ATS tiene algo que decir sobre este exponente. Supóngase, como en el caso anterior, que el área de una subcuenca es proporcional a su magnitud y que la longitud de una sucesión de corrientes es proporcional al número total de segmentos en la sucesión. Sean $\overline{L_1}$ y $\overline{A_1}$ la longitud y el área promedio de los segmentos de orden 1, luego $A_\Omega = \overline{A_1} M_\Omega / M_1 = \overline{A_1} R_b^\Omega$. Para los ATS, el

canal principal está formado por una cadena de corrientes de órdenes sucesivos desde 1 hasta Ω, luego $L_\Omega = \sum L_\omega = \sum \overline{L_1} R_c^{\omega-1} = \overline{L_1}(R_c^\Omega - 1)/(1-R_c)$. Por lo tanto, el exponente β se puede calcular a partir de

$$\beta = \lim_{\Omega\to\infty} \frac{\log L_\Omega}{\log A_\Omega} = \frac{\log R_c}{\log R_b} = \frac{1}{D_T}.$$

Nótese que según el modelo de Tokunaga, el exponente de Hack es $\beta = 1/D_T \geq 1/2$, en concordancia con las observaciones.

Cola de la distribución de magnitud

Un resultado importante observado en redes de drenaje naturales (**de Vries,** 1994) tiene que ver con la distribución de la magnitud M de un segmento tomado al azar entre todos los segmentos que conforman una red de orden Ω suficientemente grande:

$$\Pr\{M > m\} \sim m^{-\alpha_T}, \quad \text{cuando} \quad m \to \infty,$$

donde

$$\alpha_T = 1 - \frac{\log R_c}{\log R_b} = 1 - \frac{1}{D_T}.$$

Es decir que $\alpha_T + \beta = 1$. La demostración de este resultado se apoya en la relación existente entre la magnitud y el orden en los árboles topológicamente semejantes. Sea W el orden de un segmento tomado al azar entre todos los segmentos de un ATS de orden Ω. La siguiente expresión de la probabilidad de que esta variable aleatoria tome un valor particular es simplemente el cociente entre el número de segmentos de tal orden y el número total de segmentos:

$$\Pr\{W = \omega\} = \frac{N_\omega C_\omega}{\sum_{k=1}^{\Omega} N_k C_k}.$$

Asumiendo que Ω es grande y haciendo uso de la ley de Horton, $N_\omega \sim R_B^{\Omega-\omega+1}$, y $C_\omega \sim c R_c^{\omega-1}$, se puede aproximar la anterior probabilidad como

$$\Pr\{W = \omega\} = p^{\omega-1}(1-p)(1-p^{\Omega})^{-1},$$

donde $p = R_c/R_B \leq 1$, que tiende a una distribución geométrica cuando $\Omega \to \infty$ por lo tanto,

$$\Pr\{W \geq \omega\} \sim (R_c/R_B)^{\omega-1}.$$

Ahora, para un ATS, todos los pre-árboles completos de orden ω tienen la misma magnitud $m_\omega \sim R_B^\omega$ que para un Ω grande y todos los segmentos de tal pre-árbol tienen una magnitud menor o igual a m_ω, o sea que la magnitud del segmento de la raíz del pre-árbol es exactamente igual y el resto es menor. Por lo tanto, la magnitud de un segmento solo puede ser mayor que m_ω si su orden es mayor que ω. Asimismo, el orden de un segmento solo puede ser mayor que ω si su magnitud es mayor que m_ω. Es decir, los siguientes eventos son equivalentes:

$$W \geq \omega(m) \quad \text{si y sólo si} \quad M \geq m_\omega.$$

Por lo tanto, como $\omega(m) = \log m/\log R_B$, se tiene

$$Pr\{M \geq m\} \sim (R_c/R_B)^{\frac{\log m}{\log R_B}-1} = (m/R_B)^{-\alpha_T},$$

con $\alpha_T = 1 - \log R_c/\log R_b$ Claramente, $\alpha_T \leq 1/2$, lo que concuerda con las observaciones hechas (**Peckham,** 1995b).

Modelo de Gupta-Veitzer

Aunque el modelo aleatorio tiene en cuenta la variabilidad, tradicionalmente el análisis de las redes de drenaje en geomorfología se hace en términos de promedios. El modelo de Tokunaga describe mejor las observaciones que el modelo aleatorio, pero es determinístico. **Peckham & Gupta** (1999) presentaron una reformulación de las leyes de Horton en términos de distribuciones de probabilidad que denominaron "leyes de Horton generalizadas". Por ejemplo, las distribuciones de probabilidad de las áreas de drenaje sometidas a nuevas escalas por sus medias $A_\omega/\overline{A}_\omega$, colapsan en una única distribución común a todas (ver la Figura 3) para la cuenca de Whitewater en Kansas).

Hay dos componentes en este argumento. Para empezar, la ley de Horton para la media de las áreas de drenaje $\overline{A}_\omega$ de orden ω, que se puede escribir como,

$$\overline{A}_\omega = R_A^{\omega-1}\overline{A}_1, \qquad \omega = 1,2,..,$$

con R_A, y la relación de Horton para las áreas. Esto se generaliza a

$$A_{\omega+1}/\overline{A}_{\omega+1} \triangleq A_\omega/\overline{A}_\omega,$$

donde $\triangleq$ significa igualdad en la distribución de las probabilidades. Como existe una ley de Horton para las medias, se sigue que

$$A_\omega \triangleq R_A^{\omega-k} A_k, \qquad \omega = k+1, k+2, \ldots, \qquad k = 1,2,\ldots$$

Nótese que esto implica que para los momentos de orden h,

$$\mathrm{E}[A_\omega^h] = R_A^{\omega-k}\mathrm{E}[A_k^h],$$

Así como para el percentil

$$\Pr[A_\omega > a_{\omega,\phi}] = \Pr[R_A^{\omega-k}A_k > a_\omega] = \Pr[A_k > a_\omega/R_A^{\omega-k}],$$

por lo tanto $a_{k,\phi}$, el percentil de orden ϕ para A_k, escala de manera que

$$a_{k,\phi} = a_{k,\phi}/R_A^{\omega-k}.$$

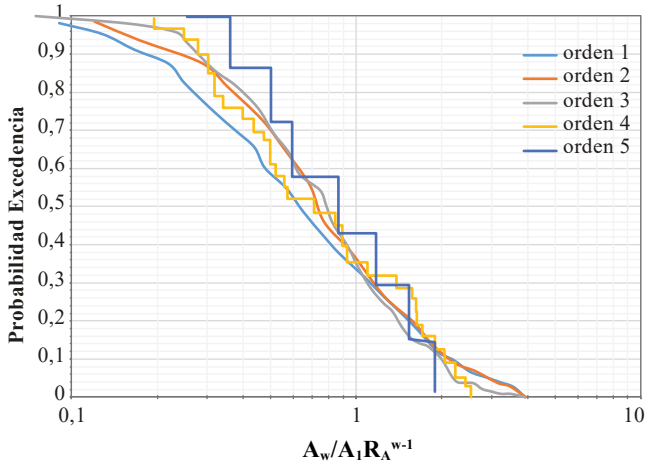


Figura 3. Escalamiento de la distribución de probabilidades del área con el orden (ley de Horton generalizada) para la red del río Whitewater en Kansas, Estados Unidos (modificada de **Mantilla & Gupta,** 2005).

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

El modelo de **Veitzer & Gupta** (2000) apunta a incorporar los elementos de autosemejanza y recurrencia del modelo de Tokunaga en un marco aleatorio para formular una teoría de las leyes de Horton generalizadas. Otras fuentes para esta sección son **Mantilla & Gupta** (2005), **Mantilla, *et al.*** (2010), y **Mantilla, *et al.*** (2012).

Construcción

Lo primero es reemplazar el proceso recursivo de generación de los ATS. En cada etapa, cada segmento externo se reemplaza por un generador tomado al azar de un conjunto de generadores externos con probabilidad p'_k de ocurrir. El generador externo k tiene un número de nodos adicionales (sin incluir las fuentes) igual a n_k. Asimismo, cada segmento interno se reemplaza por un generador de segmentos internos tomado al azar del conjunto de generadores internos, con una probabilidad de p_i y m_i nodos adicionales. Ambas selecciones son independientes e independientes entre sí. En la figura 4 y en la figura 5 se ilustra el esquema de un generador determinístico y de uno aleatorio, respectivamente.

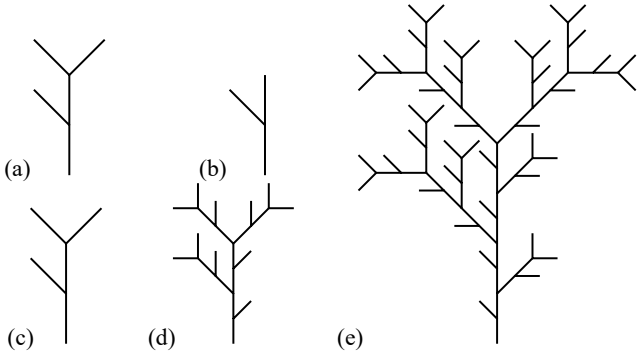


Figura 4. Esquema de construcción de una red determinística a partir de los generadores indicados: **(a)** para el segmento externo, **(b)** para el segmento interno, de orden 2 en **(c)**, de orden 3 en **(d)** y de orden 4 en **(e)**

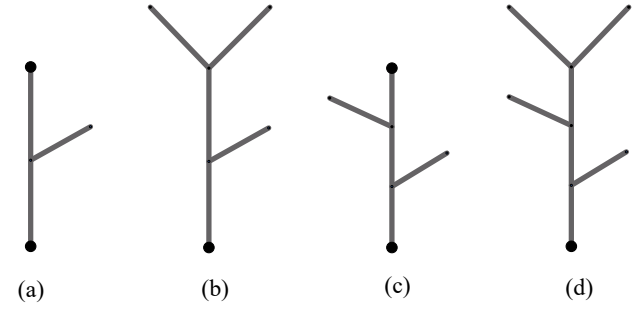


Figura 5. Esquema de la construcción de una red aleatoria a partir de los generadores indicados. Con probabilidad p cada segmento interno se reemplaza por el generador **(a)**, y con probabilidad $q = 1-p$, se reemplaza por el generador **(c)**. Cada segmento externo se reemplaza de manera independiente por el generador **(b)** o **(d)** con probabilidades p y q.

Específicamente en la Figura 5 se trabaja con dos generadores externos ($p = p'_1 = 0{,}7$, $\gamma = n_1 = 2$) y ($q = p'_2 = 0{,}3$, $\delta = n_2 = 3$) y dos internos ($p = p_1 = 0{,}7$, $\alpha = m_1 = 1$) y ($q = p_2 = 0{,}3$, $\beta = m_2 = 2$). En la tercera etapa de construcción se tienen 51 posibles realizaciones, con sus respectivas probabilidades. En la figura 6 se muestran 12 de ellas.

Para especificar completamente el proceso de construcción, es necesario definir los generadores externos e internos y sus respectivas probabilidades. Lo usual es que se trabaje con pocos generadores tanto externos como internos. En el ejemplo, solo se trabajó con dos en ambos casos.

De esta construcción resulta un conjunto de árboles cuyo número aumenta rápidamente a medida que crece el orden. Ajustándose a la filosofía del modelo aleatorio, lo que se observa es lo más probable. Para cualquiera de las variables de interés hay una distribución cuyo estudio debe permitir obtener las regularidades observadas como una predicción del modelo en el sentido de las leyes generalizadas.

Ley de Horton para el número de segmentos

Sea C_ω el número aleatorio de segmentos en una corriente de orden ω en la etapa k de la construcción. Se puede ver que la siguiente relación condicional es válida:

$$[C_\omega \mid C_{\omega-1} = n] = B(n,q)\,(\beta+1) + (n - B(n,q))(\alpha+1)$$

donde $B(n,q)$ es una variable aleatoria con distribución binomial que puede tomar los posibles valores de 0, 1, ⋯, n con probabilidad

$$\Pr[B(n,q) = r] = \binom{n}{r} q^r p^{n-r},$$

y función generatriz

$$\varphi_B(s) = \sum s^r \Pr[B(n,q) = r] = (qs + p)^n.$$

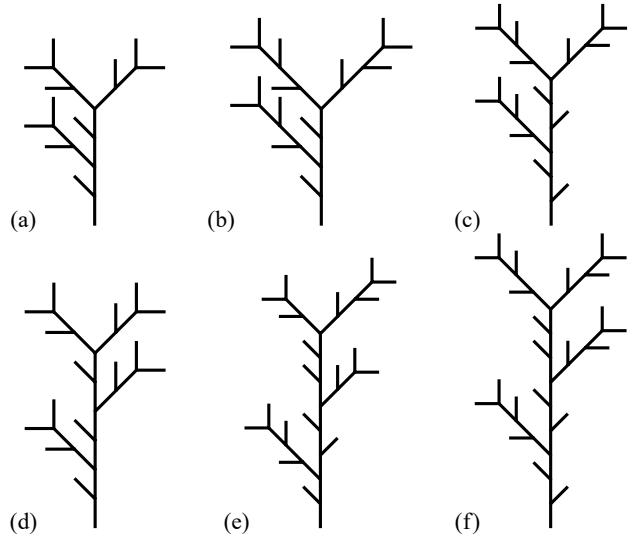


Figura 6. Seis de los 51 árboles topológicamente diferentes de orden 3 que se pueden obtener usando los generadores que se ilustran en la Figura 5. Las respectivas probabilidades son: **(a)** p^6, **(b)** p^3q^3, **(c)** pq^5, **(d)** p^7q, **(e)** p^3q^5 y **(f)** q^8.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

Por tanto, $\varphi_{C_{\omega|\omega-1}}$, la función generatriz condicional de $[C_\omega | C_{\omega-1} = n]$, es $\varphi_{C_{\omega|\omega-1}}(s) = (\varphi(s))^n$, con $\varphi(s) = (qs^{\beta+1} + ps^{\alpha+1})$. Para calcular φ_ω, la función generatriz no condicional de C_ω, se procede así:

$$\begin{aligned}\varphi_{C_\omega}(s) &= \sum \varphi_{C_{\omega|\omega-1}}(s)\Pr[C_{\omega-1} = n] \\ &= \sum (\varphi(s))^n \Pr[C_{\omega-1} = n] \\ &= \varphi_{C_{\omega-1}}(\varphi(s)).\end{aligned}$$

Esta expresión es semejante a la que de la teoría de procesos de ramificación del tipo de Galton-Watson y permite utilizar un resultado asintótico conocido para el caso, en el cual el valor esperado del número de descendientes μ_i es mayor que 1. En este caso, $\mu_i = \alpha p + \beta q + 1$. El resultado es que C_ω/μ^ω converge con la probabilidad 1 en una variable aleatoria, lo cual se puede escribir como

$$C_\omega \triangleq R_C^{\omega-k} C_k.$$

Ley de la magnitud de Horton

Sea M_ω la magnitud de una red de orden ω en la etapa k de construcción. Se procede de manera semejante al caso anterior, teniendo en cuenta que cada segmento externo da origen a $\gamma + 1$ o a $\delta + 1$ segmentos externos con probabilidad p y q respectivamente, y que cada segmento interior da origen a α o β nuevos segmentos exteriores con probabilidad p y q, respectivamente. Luego

$$\begin{aligned}[M_\omega | M_{\omega-1} = m] = B_e(m,q)(\delta + 1) + (m - B_e(m,q))(\gamma + 1) \\ + B_i(m,q)\beta + (m - B_i(m,q))\alpha.\end{aligned}$$

Usando las funciones generatrices $\phi_{M_{\omega|\omega-1}}(s) = (\phi(s))^m$, con $\phi(s) = (qs^\beta + ps^\alpha)(q' s^{\delta+1} + p' s^{\gamma+1})$ y $\phi_{M_\omega}(s) = \phi_{M_{\omega-1}}(\phi(s))$, M_ω/η^ω converge igualmente con la probabilidad 1 en una variable aleatoria, lo cual se puede escribir como

$$M_\omega \triangleq R_M^{\omega-k} M_k.$$

En este caso, $\eta = \mu_i + \mu_e + 1 = \alpha p + \beta q + \gamma p' + \delta q' + 1$.

Ley de la bifurcación de Horton

Sea $N_{k-j}^{(k)}$ el número de corrientes de orden $k-j$ en la etapa k de construcción, con $j = 0,1,\cdots, k\text{-}1$. La identidad $N_{k-j}^{(k)} = M_{j+1}$, que se encontró por primera vez en el caso del modelo de Tokunaga, permite extender la ley de magnitudes a la ley de bifurcación, con $R_m = R_B$.

Leyes de longitud y de área de Horton

Las leyes topológicas anteriores dan lugar a leyes geométricas tal como en los modelos anteriores.

Modelo geométrico de ramificación

En un conjunto de artículos, **Kovchegov & Zaliapin** (2016, 2017, 2018) desarrollaron la estructura de un proceso estocástico geométrico de ramificación que genera árboles autosemejantes de acuerdo al modelo de Tokunaga y que pone sobre bases matemáticas más firmes los modelos de Tokunaga y de Gupta-Veitzer. Sin entrar en todos los detalles matemáticos, se presenta un recuento de las ideas principales.

Como la propuesta es estocástica, hay lugar a la variabilidad y lo que se observa es lo más probable. Por lo tanto, se sigue la filosofía discutida en la introducción (**Shreve,** 1966, **Leopold, *et al.*,** 1964). Para empezar, la matriz de tributarios laterales $T_{\omega,\omega-k}$, es decir, el número de corrientes de orden ω-k que lateralmente se unen a las corrientes de orden ω, se interpreta como el valor esperado.

El modelo desarrollado permite la justificación teórica de que (i), las observaciones empíricas de los árboles naturales son topológicamente autosemejantes (ATS), es decir, cumplen con $T_{\omega,\omega-k} = T_k$, $k = 2, 3, \cdots$,y (ii), la hipótesis de que la secuencia $T_k = ac^{k-1}$, $k = 1, 2, \cdots$ (ecuación 2), es una secuencia geométrica.

Para este modelo, la operación de podado ya mencionada consiste en remover los segmentos de orden 1, es decir, dado un árbol τ de orden ω, el resultado es un árbol $R(\tau)$ de orden ω - 1. El concepto de invariancia bajo podado para un árbol aleatorio, que es una realización de un proceso estocástico, significa que la medida de probabilidad del árbol μ cumple con

$$\mu(R^{-1}(\tau) \mid \tau \neq \phi) = \mu(\tau).$$

Uno de los resultados importantes de **Kovchegov & Zaliapin** (2017) es que las realizaciones de procesos estocásticos con medida de probabilidad invariante bajo poda son árboles autosemejantes, es decir, se cumple $T_{\omega,\omega-k} = T_k$, $k = 2, 3, \cdots$. Debe recordarse que $T_{\omega,\omega-k}$ es el cociente entre el valor esperado del número de tributarios laterales de orden ω-k que le caen a una corriente de orden ω y el número de corrientes de orden ω.

La otra operación importante introducida por **Kovchegov & Zaliapin** (2018) es el desfase temporal que consiste en remover el segmento de la raíz. El resultado es que cada árbol de orden $\omega > 1$ da lugar, en general, a un par de árboles, aunque si la operación actúa sobre un árbol de orden 1, este desaparece. La operación puede actuar sobre un conjunto plural de árboles. La invarianza ante el desfase temporal da lugar a árboles que cumplen con la ecuación (2).

Proceso de ramificación geométrico

Dada una secuencia T_k, $k = 2, 3$, y $0 < p < 1$, se define $S_k = 1 + T_1 + \cdots + T_k$, para $k \geq 0$. El proceso estocástico $\mathcal{G}(s)$, indexado por el tiempo discreto s, describe el crecimiento de la población de acuerdo a las siguientes condiciones:

1. el proceso inicia en el tiempo $s = 0$ con un progenitor (raíz) de orden aleatorio Ω tal que $\Omega - 1$ se distribuye geométricamente con un parámetro p;
2. en cada etapa $s > 0$, cada miembro (segmento) de la pobla-ción con orden $\omega \leq \Omega$ termina con probabilidad $q_\omega = S_\omega^{-1}$ o sobrevive con probabilidad $1 - q_\omega$, en todos los casos independientemente de los demás miembros. En caso de terminación, un miembro de orden $\omega > 1$ produce dos descendientes (tributarios) de orden ω - 1. Si se trata de un miembro de orden $\omega = 1$, termina sin dejar descendientes;

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):379-391, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641

3. si el miembro no termina produce un (descendiente) tributario lateral de orden aleatorio i, $1 \leq i < \omega$ de acuerdo a la distribución

$$p_{\omega,i} = \frac{T_{\omega-i}}{T_1 + \cdots + T_{\omega-1}}.$$

Propiedades

Por definición, el proceso de ramificación geométrico es markoviano. **Kovchegov & Zaliapin** (2018) demuestran que para un proceso así definido, la matriz de tributarios lateral sigue la condición de autosemejanza de Tokunaga en el sentido de valores esperados y, por lo tanto, de las leyes de Horton.

Sea m_k el número de tributarios laterales de una corriente de orden k y $m_{k,i}$ el número de tales tributarios de orden i. Se puede ver que, de acuerdo a la definición m_k, sigue una distribución geométrica con un parámetro $(S_{k-1})^{-1}$ y, por lo tanto, de un valor esperado de $S_{k-1} - 1 = T_1 + \cdots + T_{k-1}$. Además, $m_{k,i}$ sigue una distribución geométrica con un parámetro $(1 + T_{k-i})^{-1}$ y un valor esperado de T_{k-i}.

Dependiendo del número de tributarios laterales, la asignación de sus órdenes sigue una distribución multinomial, propiedad que sugiere que este modelo engloba el modelo de Gupta-Veitzer, aunque hay que tener en cuenta que el proceso de construcción en ese modelo va hasta el infinito mientras que el modelo de ramificación en el primer paso define un orden aleatorio finito con distribución geométrica.

La invarianza ante el desfase temporal es una propiedad de los árboles críticos de Tokunaga, aquellos con $p = 1/2$, $a = c - 1$, $T_k = (c - 1)c^{k-1}$ para cualquier $c \geq 1$. Dado un árbol crítico de Tokunaga, los dos sub-árboles que confluyen en la raíz tienen la misma distribución. Además, son independientes si y solo si $c = 2$. La dimensión fractal de un árbol crítico de Tokunaga es $1+\ln 2/\ln c$, con $R_b = 2c$.

Las observaciones sugieren que $a \neq c - 1$, lo cual da una pista para proceder a poner a prueba el modelo frente a las observaciones. Por ejemplo, para las cuencas de los río Kentucky y Powder analizadas por **Peckham** (1995b), los valores de a y c son 1,17 y 2,5 para la primera y 1,16 y 2,7 para la segunda. Faltaría verificar si tales desviaciones son significativas o no.

Conclusiones

Los modelos de Gupta-Veitzer o el de ramificación geométrica cumplen con incorporar la aleatoriedad y describir adecuadamente las observaciones, manteniendo hipótesis simples. Entre sus características más interesantes está la posibilidad de generalizar las leyes de Horton a equivalencia de distribuciones debidamente escaladas.

Todavía deben someterse a prueba estos modelos contrastándolos con una base de datos representativa de las observaciones, y con resultados teóricos que cuantifiquen la probabilidad de fluctuaciones con respecto a los valores esperados.

También hay otras líneas de trabajo que no se discutieron aquí por motivos de espacio y que se relacionan con la autosemejanza de la geometría hidráulica (**Gupta & Mesa,** 2014). Es decir, debe trascenderse el análisis de las propiedades planimétricas para incorporar variables de interés dinámico como la pendiente, la velocidad, el ancho y la profundidad de la corriente, así como la rugosidad. Las observaciones empíricas indican que hay una dependencia potencial de estas variables con el caudal. La hidrología entra a jugar un papel en la medida en que el caudal, como variable aleatoria, se relaciona con el área de la cuenca, la cual, a su vez, está relacionada con la magnitud sobre la cual se estableció la ley de Horton generalizada. La relación entre el caudal y el área de la cuenca es aproximadamente lineal para caudales medios o mínimos, pero es potencial para los caudales máximos con exponente menor de uno. Esta cadena de relaciones implica la autosemejanza estadística (leyes de Horton generalizadas) para las variables de la geometría hidráulica y la hidrología en el sentido de semejanza incompleta o asintótica de segunda clase. Al parecer, el exponente anómalo proviene del hecho de que no toda la cuenca contribuye al pico de la creciente. La explicación completa de estas observaciones mediante una adecuada construcción teórica sigue siendo un problema fundamental de la hidrología. De todas maneras, una consecuencia es la interpretación de estas relaciones potenciales como leyes generalizadas de Horton para cada una de las variables.

La autosemejanza de las cuencas y su geometría hidráulica tienen, a su vez, implicaciones profundas para la construcción de una teoría hidrológica de las crecientes y de la semejanza hidrológica (**Gupta,** 2016), aspecto que también está en desarrollo.

Referencias

Barenblatt, G. I. (1996). Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics. Cambridge University Press.

Barenblatt, G. I. (2003). Cambridge University Press.

Dawdy, D. R. (2007). Prediction versus understanding (the 2006 Ven Te Chow lecture). J Hydrol Eng. **12** (1): 1-3.

Dawdy, D. R., Griffis, V. W., Gupta, V. K. (2012). Regional flood-frequency analysis: How we got here and where we are going. J Hydrol Eng. **17** (9): 953-959.

de Vries, H., Becker, T., Eckhardt, B. (1994). Power law distribution of discharge in ideal networks. Water Resour Res. **30** (12): 3541-3543.

Dodds, P. S. and Rothman, D. H. (1999). Unified view of scaling laws for river networks. Phys Rev. **59** (5): 4865.

Eagleson, P. S. (1970). Dynamic Hydrology. McGraw-Hill, New York.

Feller, W. F. (1968). An introduction to probability theory and its applications Vol. 1. Wiley, New York, third edition.

Feder, J. (1968). Fractals. Plenum Press, New York.

Furey, P. R., Gupta, V. K., Troutman, B. M. (2013). A top-down model to generate ensembles of runoff from a large number of hillslopes. Nonlinear Process Geophys. **20** (5): 683-704.

Gibbings, J. C. (2011). Dimensional analysis. Springer.

Gupta, V. (2016). Scaling theory of floods for developing a physical basis of statistical flood frequency relations. In Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science. Oxford University Press. Retrieved 16 Nov.

2018, from http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-301

Gupta, V. K. &Mesa, O. J. (2014). Horton laws for hydraulic–geometric variables and their scaling exponents in self-similar Tokunaga river networks. Nonlinear Process Geophys. **21** (5): 1007-1025.

Gupta, V. K., Mesa, O. J., Waymire, E. C. (1990). Tree-dependent extreme values: The exponential case. J Appl Probab. **27** (1): 124-133.

Gupta, V. K., Troutman, B. M., Dawdy, D. R. (2007). Towards a nonlinear geophysical theory of floods in river networks: an overview of 20 years of progress. In Tsonis, A. A. and Elsner, J. B., editors, Nonlinear Dynamics in Geosciences, p. 121-151. Springer, New York, NY 10013, USA.

Gupta, V. K. & Waymire, E. C. (1998). Spatial variability and scale invariance in hydrologic regionalization. In Sposito, G., editor, Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology, p. 88-135. Cambridge University Press, London.

Hack, J. T. (1957). Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. USGS Professional Paper. **294** (B): 1-97.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin. **56** (3): 275-370.

Kovchegov, Y. & Zaliapin, I. Horton law in self-similar trees. Fractals. **24** (02): 1650017, 2016.

Kovchegov, Y. & Zaliapin, I. Horton self-similarity of kingman's coalescent tree. *Ann Inst H Poincare Probab Statist*. **53** (3): 1069-1107, 08 2017. doi: 10.1214/16-AIHP748. https://doi.org/10.1214/16-AIHP748.

Kovchegov, Y. & Zaliapin, I. Tokunaga self-similarity arises naturally from time invariance. Chaos. **28** (4): 041102, 2018.

La Barbera, P. and Rosso, R. (1989). On the fractal dimension of stream networks. Water Resour Res. **25** (4): 735-741.

Langbein, W. B., *et al.* (1947). Topographic characteristics of drainage basins. Water Supply Paper 968-C. US Government Printing Office.

Leopold, L. B. (1994). A View of the River. Harvard University Press.

Leopold, L. B., Wolman, M. G., Miller, J. P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology. W. H. Freeman, San Francisco.

Mantilla, R. (2007). Physical basis of statistical scaling in peak flows and stream flow hydrographs for topologic and spatially embedded random self-similiar channel networks. PhD thesis, University of Colorado at Boulder.

Mantilla, R. & Gupta, V. K. (2005). A GIS framework to investigate the process basis for scaling statistics on river networks. IEEE Geosci Remote S. **2** (4): 404-408.

Mantilla, R., Gupta, V. K., Troutman, B. M. (2012). Extending generalized Horton laws to test embedding algorithms for topologic river networks. Geomorphology. **151-152:** 13-26.

Mantilla, R., Mesa, O. J., Poveda, G. (2000). Análisis de la ley de Hack en las cuencas hidrográficas de Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos. **1** (7): 1-18.

Mantilla, R., Troutman, B. M., Gupta, V. K. (2010). Testing statistical self-similarity in the topology of river networks. J Geophys Res. **115:** F03038.

Mcconnell, M. & Gupta, V. K. (2008). A proof of the Horton law of stream numbers for the Tokunaga model of river networks. Fractals. **16** (03): 227-233.

Mesa, O. J. (1986). Analysis of Channel Networks Parameterized by Elevations. PhD thesis, University of Mississippi.

Mesa, O. J. & Gupta, V. K. (1987). On the main channel length-area relationship for channel networks. Water Resour Res. **23** (11): 2119-2122.

Mueller, J. E. (1973). Re-evaluation of the relationship of master streams and drainage basins: Reply. Geol Soc Am Bull, **84:** 3127-3130.

Peckham, S. (1995a). New results of self-similar trees with applications to river networks. Water Resour Res. **31** (4): 1023-1029.

Peckham, S. (1995b). Self-Similarity in the Three-Dimensional Geometry and Dynamics of Large River Basins. Ph. D. thesis, Univ. of Colo., Boulder.

Peckham, S. & Gupta, V. K. (1999). A reformulation of Horton's laws for large river networks in terms of statistical self-similarity. Water Resour Res. **35** (9): 2763-2777.

Rodríguez-Iturbe, I. & Rinaldo, A. (2001). Fractal River Basins: Chance and Self-Organization. Cambridge University Press.

Shreve, R. L. (1966). Statistical law of stream numbers. J Geol. **74:** 17-37.

Shreve, R. L. (1967). Infinite topologically random channel networks. J Geol. **75:** 178-186.

Shreve, R. L. (1969). Stream length and basin areas in topologically random channel networks. J Geol. **77:** 397-414.

Shreve, R. L. (1974). Variation of mainstream length with basin area in river networks. Water Resour Res. **10** (6): 1167-1177.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J. J., Mendiondo, E., O'Connell, P. E., *et al.* (2003). IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. Hydrolog Sci J. **48** (6): 857-880.

Stirling, J. (1730). The differential method: A Treatise of the Summation and Interpolation of Infinite Series. *Methodus Differentialis: sive Tractatus de Summatione et Interpolatione Serierum Infinitarum.* Gul. Bowyer, London, English translation by Holliday, J., 1749.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geol Soc Am Bull. **63** (11): 1117-1142.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union. **38** (6): 913-920.

Tokunaga, E. (1966). The composition of drainage network in Toyohira River basin and valuation of Horton's first law (in Japanese with English summary). Geophys Bull Hokkaido Univ. **15:** 1-19.

Tokunaga, E. (1978). Consideration on the composition of drainage networks and their evolution. Geogr Rep. **13:** 1.

Troutman, B. M. & Karlinger, M. (1998). Stochastic Methods in Hydrology: Rain, Landforms and Floods, chapter Spatial Channel Network Models in Hydrology, p. 85-128. World Sci., River Edge, N. J.

Veitzer, S. & Gupta, V. K. (2000). Random self-similar river networks and derivations of generalized horton laws in terms of statistical simple scaling. Water Resour Res. **36** (4): 1033-1048.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):392-401, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

Artículo de posesión

Ciencias de la Tierra

La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano

Camilo Montes

Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 22 de noviembre de 2018

Resumen

El fenómeno de El Niño en Colombia está marcado por un déficit de precipitaciones precisamente donde se localizan la mayor parte de las hidroeléctricas del país. Si el clima del Plioceno, hace ~2,6 a 5,3 millones de años, es análogo al que podríamos esperar durante este siglo, el déficit en las precipitaciones afectaría la generación hidroeléctrica en Colombia. El respaldo de la generación hídroeléctrica en Colombia es el gas. Las reservas de gas y petróleo en nuestro país están agotándose y nuestra ventana de autoabastecimiento está cercana a su fin. La combinación de estos factores hace que la generación eléctrica colombiana sea muy vulnerable a los fenómenos climáticos que implican déficit en las precipitaciones. El calentamiento global, producto principalmente de la quema de carbón, petróleo y gas, podría llevarnos a una situación en la que, paradójicamente, la única alternativa para que el país tenga independencia y seguridad energética sea el carbón. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: El Niño; El Niño - Oscilación Meridional (ENOM); Electricidad; Carbón; Gas; Cambio climático; Colombia.

Climatic uncertainty and the Colombian energy dilema

Abstract

The El Niño phenomenon in Colombia is characterized by a rainfall deficit precisely where most of the country's hydroelectric plants are located. Climatic conditions of the Pliocene, ~ 2.6 to 5.3 million years ago, a good analogy for the changing global climate, suggest that rainfall deficits would occur in Colombia, negatively impacting hydroelectric generation. The backup for hydroelectric generation in Colombia is gas. Gas and oil reserves in our country are running out and our self-supply window is nearing its end. The combination of these factors make Colombia's electricity generation highly vulnerable particularly to climatic conditions where rainfall deficits exist. Global warming caused by the burning of coal, oil and gas, could bring a scenario where, paradoxically, the only alternative for the country to have independence and energy security would be coal. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: El Niño; El Niño Southern Oscillation (ENSO); Electricity; Coal; Gas; Climate change; Colombia.

Introducción

Más de dos terceras partes de la generación eléctrica colombiana dependen de un predecible régimen de lluvias que llena los embalses entre abril-mayo y septiembre-noviembre, con una regularidad solo interrumpida por el fenómeno de El Niño. No sabemos si este fenómeno, actualmente con una periodicidad subdecadal, podría volverse más frecuente o más grave como resultado del cambio climático. La generación térmica, respaldo del sistema interconectado colombiano, funciona fundamentalmente a partir de gas y combustibles líquidos, con capacidad de generar menos de la mitad del consumo del país. Colombia, sin embargo, se está quedando sin gas y sin petróleo. La inversión en investigación en energías renovables es prácticamente nula. Aún así, el congreso acaba de ratificar el tratado de las partes adoptado en la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP21, **Naciones Unidas,** 2015), que aunque bien intencionado, limita nuestras emisiones de gases de efecto invernadero (http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2957-congreso-aprueba-proyecto-de-ley-para-ratificar-acuerdo-de-paris).

El consenso alcanzado en París fijó una meta de calentamiento global de 2°C o menos (con 1,5 °C como meta preferida) y 20 cm de ascenso de nivel del mar con respecto a niveles preindustriales para finales del siglo XXI. Estas metas eran ya extremadamente ambiciosas en el momento

Correspondencia:
Camilo Montes, montes.camilo@gmail.com
Recibido: 14 de mayo de 2018
Aceptado: 29 de agosto de 2018
Editor: Carlos Alberto Vargas

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

de la firma del acuerdo en el 2015. Las emisiones globales de gases de efecto invernadero continuaron creciendo desde la firma en París y, recientemente, el mayor emisor acumulativo de gases de efecto invernadero (Estados Unidos, con el 29,3 % de las emisiones entre 1850 y 2002, **Baumert, *et al*.,** 2005), se retiró de dicho acuerdo (**Tollefson,** 2017). Algunos modelos que analizan las tendencias de decarbonización sugieren que en el 2018 debimos haber tenido crecimiento nulo en emisiones de CO_2 con respecto a los niveles del 2010 (**Rogelj, *et al.,*** 2015). Dado que la reducción no ocurrió, y es muy dudoso que ocurra en el siguiente lustro, la ventana de oportunidad para alcanzar las metas establecidas para final de siglo parece ya cerrada. Así haya cálculos más optimistas (**Millar, *et al.,*** 2017), más que limitar las emisiones, la alternativa de Colombia parece limitarse a la adaptación a los cambios venideros en un planeta con temperaturas promedio 2 °C más cálidas, más aun teniendo en cuenta que aquellos países que no nos beneficiamos de la abundante energía (cuyo subproducto son las emisiones de los últimos 200 años) estamos siendo afectados por los cambios de manera más intensa (**Bathiany, *et al.,*** 2018) dada la fragilidad general de su infraestructura (**Kreft, *et al.,*** 2015). La política consignada en el documento COP21 de Colombia, que es, *de facto*, la hoja de ruta energética del gobierno, parece desligada de la realidad geológica colombiana e insensible a los posibles escenarios del cambio climático.

Si Colombia pretende seguir un modelo de desarrollo como el europeo y el norteamericano, requiere mucha energía confiable y barata. El acuerdo de las partes COP21 de París —aunque no vinculante— nos pone como sociedad en una encrucijada energética. Dado que el desarrollo, entendido como desarrollo industrial, requiere tanta energía (**Woodall,** 2011), esta debe ser barata de modo que la industria pueda ser competitiva en el escenario global. En este ensayo exploro alternativas para una hoja de ruta energética a corto y mediano plazo enraizada en la realidad geológica nacional y teniendo en cuenta un posible escenario de cambio climático. Ignoro a propósito los efectos de estas alternativas en el clima del planeta porque Colombia es, y lo ha sido siempre, un contribuidor apenas marginal de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (con apenas un 0,46 % de las emisiones globales, **Naciones Unidas,** 2015). El análisis que presento está sustentado en datos concretos sobre los recursos que tenemos en abundancia, como el carbón, sobre aquellos más escasos, como el petróleo y el gas, y sobre los que podrían escasear en un escenario de cambio climático, como el agua. La solidez o debilidad energética del país depende de las interacciones entre los posibles efectos del cambio climático —como un fenómeno de El Niño más frecuente o intenso—, y la naturaleza de la matriz energética que decidamos implementar en las siguientes décadas. Muestro aquí que una continuada dependencia de la energía hidroeléctrica y de la generación por gas es suceptible de multiplicar los efectos negativos del cambio climático en nuestro país.

Es la incertidumbre acerca de la naturaleza y magnitud de los cambios climáticos la que lógicamente nos indica que la ruta más segura para suministrarle energía a nuestra sociedad, a falta de mejores alternativas, es el carbón. Enfatizo que la ruta preferida sería la de la disminución del consumo y las energías renovables, pero como muestro en esta contribución, estas requieren décadas de inversión, construcción de experiencia e investigación. Colombia no ha desarrollado ninguna de las anteriores, y el cambio climático podría, sí, avanzar más rápido que la renovación energética colombiana.

El fenómeno de El Niño

El fenómeno de El Niño y la oscilación meridional (ENOM) es la fluctuación climática más importante del planeta. En condiciones normales, en el océano Pacífico los vientos alisios empujan agua cálida y superficial hacia el occidente, favoreciendo el afloramiento de aguas profundas y frías a lo largo de la costa occidental suramericana. El contraste de temperaturas superficiales del agua (~4°C) refuerza el contraste de presiones atmósfericas de este a oeste, intensificando aun más los alisios. Durante un año de El Niño, sin embargo, los alisios se debilitan y la presión atmosférica aumenta en el oeste y disminuye en el este. Esto hace que en un año de El Niño los alisios debilitados y el calentamiento de aguas superficiales en el ecuador se refuercen uno a otro llevando a que una "piscina" de agua cálida se estacione en el normalmente frío Pacífico oriental (**Collins, *et al.,*** 2010). Durante un año así ocurren muchos cambios, incluidos los que se producen en la frecuencia de los huracanes en el Atlántico (**Bove, *et al.,*** 1998; **Donnelly & Woodruff,** 2007), en las precipitaciones en los trópicos y en los sistemas de monzones (**Dai & Wigley,** 2000), en las temperaturas en Canadá y las precipitaciones en Norteamérica (**Ropelewski & Halpert,** 1986), entre muchas otros, los cuales afectan los patrones climáticos en todo el planeta. El fenómeno de El Niño es global, con conexiones más o menos intensas en todo el planeta, y, naturalmente, en el norte de los Andes.

El Niño en épocas glaciales. Una forma de tratar de entender la variabilidad de El Niño es estudiar los registros paleoclimáticos de los últimos cientos a miles de años. A escalas de observación de milenios, sin embargo, no parece haber una correlación directa y sencilla entre la recurrencia e intensidad del ENOM con un incremento o disminución en las temperaturas globales. Los registros de corales en el Pacífico tropical sugieren que la actividad más intensa del ENOM ocurrió precisamente en el siglo XVII durante la fría "pequeña edad de hielo" (**Cobb, *et al*.,** 2003), así como después de los "inviernos" producidos por actividad volcánica (**Adams, *et al*.,** 2003). En contraste, los registros de inundación costa afuera en Perú (**Rein, *et al*.,** 2005) documentan algunas correlaciones positivas entre una mayor actividad e intensidad del ENOM y mayores temperaturas globales durante los últimos 17.000 años. Estos estudios sugieren una contemporaneidad y, posiblemente

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):392-401, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

una relación de causalidad entre la destrucción de la última masa glacial de Norteamérica (Laurentina) y el inicio del ENOM en Perú. Una compilación de registros globales desde 1.525, sugiere sin embargo que el siglo XX ha tenido una actividad más intensa de El Niño, con 12 de los 37 eventos considerados como fuertes o extremos (**Gergis & Fowler,** 2009). En esta misma compilación se reporta que los eventos más largos de El Niño han llegado a durar hasta siete años (1900-1906 y 1718-1724). Así las cosas, algunos registros climatológicos en escalas de siglos y milenios parecieran entregar resultados ambiguos acerca de la correlación entre la intensidad y la frecuencia del ENOM y las temperaturas globales. Otros, sin embargo, parecieran sugerir que las temperaturas atmosféricas más altas se correlacionan positivamente con eventos más pronunciados o prolongados de El Niño.

Predicciones computacionales del ENOM. Otra forma de intentar entender el ENOM es mediante modelos computacionales globales. En ellos se acopla el comportamiento de la atmósfera y los océanos, intentando reproducir y, eventualmente, predecir el clima planetario. Para ello se divide el globo en pequeñas celdas donde se calculan variables climáticas a partir de las ecuaciones que describen los comportamientos físicos de la atmósfera y los océanos. Aunque aún lejos de reproducir los detalles del ENOM, estos modelos parecen sugerir que un incremento en la temperatura planetaria generaría un ENOM más intenso y frecuente (**Timmermann, *et al*.,** 1999; **Yeh, *et al*.,** 2009; **Cai, *et al.,*** 2014; **Cai, *et al*.,** 2015), incluso si es diferente al que se produjo en el siglo XX. Sin embargo, las altísimas complejidades de los modelamientos numéricos, las parametrizaciones necesarias y las interacciones entre variables todavía constituyen una barrera en la predicción climática de los siguientes 100 años. Existen modelos que, simulando las mismas interacciones, sugieren exactamente lo contrario (**van Oldenborgh, *et al*.,** 2005). En un experimento para verificar la veracidad de las predicciones, se tomaron los aumentos de las temperaturas planetarias de múltiples modelos de los 20 años anteriores y se compararon con localidades en las que se habían registrado instrumentalmente en el mismo período, y se encontró un sesgo de entre dos y cuatro veces en las predicciones del aumento en la temperatura observada (**Fyfe, *et al*.,** 2013). Este experimento llevó a proponer un hiato en la tendencia de calentamiento global en las últimas décadas, que después ha sido intensamente disputado y eventualmente descalificado en el marco de las discusiones del acuerdo climático (**Rajaratnam, *et al*.,** 2015).

En resumen, es poco lo que sabemos acerca de los mecanismos que generan el ENOM, no lo suficiente en cualquier caso para ejecutar modelos determinísticos. Pero sí conocemos los efectos, amplitudes, recurrencias y teleconexiones actuales del ENOM, y podemos estudiar el registro geológico, con el fin de intentar discernir sus efectos en el pasado. A medida que nos internamos en el tiempo geológico, la incertidumbre en la datación precisa de los eventos y la dificultad de hacer correlaciones empíricas aumentan e impiden tener certeza sobre las relaciones de causalidad. Al adentrarse más en las profundidades del tiempo geológico y pasar a la escala de millones de años, cuando la temperatura del planeta (**Zachos, *et al.,*** 2001) se parecía más a la que se espera al final del siglo XXI (**Naciones Unidas,** 2015), podríamos aprender más acerca de este fenómeno y sus impactos en Colombia, ya que los efectos locales y puntuales en el espacio y en el tiempo se difuminan y, aunque borrosa, aparece una visión empírica más robusta de las relaciones e interacciones entre el calentamiento global y el ENOM.

El Niño permanente del Plioceno, una visión global. El Plioceno, entre ~2,6 y 5,3 millones de años, es el intervalo más reciente del pasado geológico con temperaturas sostenidas promedio más cercanas (~2,5 a 4 °C, **Zachos, *et al.,*** 2001) a las esperadas como resultado del cambio climático. De todo el pasado geológico, el Plioceno, además, presenta la configuración de placas, océanos y cadenas montañosas más similar a la actual (**Scotese & Golonka,** 1997; **Müller, *et al.,*** 2008), de modo que las corrientes oceánicas y atmosféricas tenían barreras y corredores parecidos, aunque no idénticos, a los de hoy en día. Por ello, es probable que este intervalo de tiempo sea el mejor parangón para prepararnos frente al comportamiento del clima del planeta en las décadas venideras (**Wara,** 2005).

La intrigante posibilidad de que el clima del Plioceno se haya caracterizado por un fenómeno de El Niño permanente fue propuesta por **Molnar & Cane** (2002; 2007) al observar la coincidencia de condiciones climáticas del pasado con las que se han presentado durante eventos recientes de El Niño, observación coincidente con la de **Philander & Fedorov** (2003). Durante el Plioceno el clima canadiense era más cálido y seco, el hielo en los grandes lagos en invierno era más delgado, y la región alrededor del Golfo de México y el sur del continente suramericano más fresca y húmeda. La India y el noreste australiano eran más secos que hoy, en tanto que Africa oriental era más húmeda. El contraste de temperaturas entre las aguas tropicales del Pacífico oriental y el occidental era mínimo, o inexistente. Todas estas observaciones paleoclimáticas se correlacionan positivamente con los fenómenos atmosféricos y oceánicos que se registran durante los actuales eventos de El Niño, en particular el de 1997 y, por ende, sugieren que el ENOM podría haber sido permanente durante el Plioceno. **Wara** (2005) llegó a conclusiones similares estudiando registros isotópicos de temperaturas marinas superficiales en conchas de foraminíferos en el Pacífico tropical. También en el Pacífico tropical, pero más al oriente y estudiando registros de alquenonas, **Lawrence, *et al.*** (2006) encontraron que la asimetría en temperaturas superficiales era prácticamente inexistente en el Plioceno, conclusión también apoyada en la revisión de diferentes indicadores climáticos (*proxies*) de **Ravelo, *et al.*** (2006).

El registro paleoclimático terrestre del Plioceno en los trópicos es aún muy limitado, pues solo se tienen dos registros en Costa Rica y Etiopía, y ninguno a menos de 10° del ecuador (**Salzmann, *et al.,*** 2013). Sin embargo, el norte de los Andes, más seco y cálido durante eventos de El Niño de hoy, tiene un completo registro palinológico del Plioceno (**van der Hammen, *et al.,*** 1973). Este registro documenta un cambio florístico entre ~ 3 y 6 millones de años, originalmente interpretado como resultado del levantamiento de la cordillera Oriental y el consiguiente enfriamiento por ganancia altitudinal (**Helmens & van der Hammen,** 1994). Según esta hipótesis, durante el Plioceno temprano la Sabana de Bogotá habría estado localizada a una elevación de ~ 500 m sobre el nivel del mar con una flora típica de tierras bajas tropicales. Un levantamiento de la superficie de ~ 2 kilómetros habría causado un cambio en la temperatura (entre 9 y 12 °C, **Hooghiemstra, *et al.,*** 2006) y la aparición de la flora de tierras altas, que hace ~ 2,5 millones de años ya era la característica flora andina de altitud (**van der Hammen, *et al*.,** 1973).

El cambio en temperaturas derivado del registro palinológico ha sido recientemente reevaluado a solo ~3°C por **Anderson, *et al.*** (2015) utilizando biomarcadores en los lípidos de las membranas de bacterias presentes en los suelos. Estas cadenas de lípidos se encuentran preservadas en las mismas localidades de los estudios palinológicos y, con base en los cambios estructurales en las cadenas, se puede calcular una paleotemperatura, pues la complejidad de estas cadenas depende del pH y de la temperatura media anual de los suelos. Una vez el cambio en temperaturas es corregido por el clima global, este concordaría, no con un cambio de elevación, sino más probablemente con un estado de El Niño en el norte de los Andes (**Pérez-Ángel & Molnar,** 2017) durante el Plioceno. Este último análisis se basa en la comparación del registro instrumental de las temperaturas de la Cordillera Oriental de 1961 a 2016 con las temperaturas de la superficie oceánica durante los eventos de El Niño de 1982-83, 1997-98 y 2015-16. Cuando las temperaturas de la superficie del océano Pacífico se incrementan en 4 °C, las temperaturas en la cordillera Oriental lo hacen en ~2 °C. Este cambio, extrapolado a las condiciones climáticas del Plioceno es suficiente para explicar el cambio florístico sólo con un El Niño más intenso o más frecuente.

Sin embargo, en el registro palinológico no existe evidencia clara de condiciones más secas durante el Plioceno. Sólo el registro sedimentológico del delta del río Magdalena en la transición Mioceno-Plioceno marca la instalación de condiciones más secas en el norte de los Andes durante el Plioceno, consistente con la idea de un El Niño más intenso o frecuente (**Molinares, *et al.,*** 2012). Aun así, es necesario emplear más marcadores independientes, por ejemplo, las rutas fotosintéticas de plantas C3 o C4, para evaluar las condiciones de precipitación en el norte de los Andes durante el Plioceno.

En resumen, existe evidencia suficiente que sugiere que en una época no muy distante del pasado geológico, cuando la configuración geográfica era similar a la de hoy y las temperaturas estaban dentro del rango esperado debido al cambio climático, el clima del planeta estaba dominado por un fenómeno de El Niño permanente. En el norte de los Andes dicho aumento en su intensidad o frecuencia parece haber estado acompañado por temperaturas más altas, pero aún no hay confirmación de que las precipitaciones fueran más bajas, como se esperaría si el fenómeno global tenía teleconexiones similares a las de hoy en día.

El Niño en Colombia. Los efectos del ENOM en el norte de los Andes se caracterizan actualmente por un déficit de precipitaciones y de los caudales y cargas medias mensuales de los ríos (**Restrepo & Kjerfve,** 2000; **Restrepo-López & Torregroza,** 2017), y una disminución en la humedad de los suelos y la actividad vegetal (**Poveda, *et al.,*** 2001; **Poveda,** 2004) que, por consiguiente, disminuye el nivel de los embalses. Incluso existe una correlacion entre el índice de la oscilación meridional y los índices de malaria (**Poveda & Rojas,** 1997), los cambios en la salinidad de ciénagas costeras debidos a la disminución de los caudales (**Blanco, *et al*.,** 2007), los eventos de avulsión del río Magdalena (**Morón, *et al*.,** 2017) y los glaciales tropicales (**Bedoya-Soto, *et al.,*** 2018).

La disminución de las precipitaciones durante un evento de El Niño es mayor precisamente en las áreas donde se encuentran las hidroeléctricas más importantes del país: Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca y Tolima, así como en zonas de la Orinoquia (**López, *et al*.,** 2013). La recurrencia moderna del fenómeno de El Niño está entre los 3 y 5 años o casi bienal (**Wara,** 2005), con registros más tempranos y marcados en los caudales de los ríos en el occidente de Colombia y más tardíos y menos marcados en los del este (**Poveda, *et al*.,** 2001; **Poveda,** 2004). Un típico año de El Niño inicia con un déficit moderado en las precipitaciones entre junio y agosto y entre septiembre y noviembre, con la consecuente disminución en los caudales de los ríos. Durante los siguientes meses, especialmente entre diciembre y febrero, se presenta una disminución muy marcada en las precipitaciones y las descargas de los ríos, seguida por un comportamiento casi normal de la temporada de marzo a mayo (**Poveda, *et al*.,** 2001).

El Niño que trajo el apagón de mayo de 1992 a febrero de 1993 está aún vivo en la memoria colectiva de los colombianos, cuando una marcada disminución en las lluvias colapsó la disponibilidad de los acueductos y el suministro energético causó cortes de entre nueve y 18 horas diarias en muchas partes del país (**Unidad de Planeación Minero Energética - UPME,** 2010), (http://www.elcolombiano.com/historico/hace_20_anos_colombia_sufrio_el_apagon-JVEC_180119). El evento de El Niño del 2009 trajo una disminución en las precipitaciones que redujo el embalse agregado nacional a un 30 % de su nivel en el mes de marzo del 2010 (**UPME,** 2010).

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):392-401, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

Recursos hídricos y eventos de El Niño. Aunque el sistema interconectado nacional nunca ha tenido que soportar dos años seguidos con eventos significativos de El Niño, es fácil predecir cuáles serían sus consecuencias. En múltiples estudios se ha destacado la debilidad de nuestro sistema interconectado debido a su dependencia de la regularidad del sistema hídrico (**Uribe, *et al.,*** 2014; **UPME,** 2015). En ningún escenario, sin embargo, se ha evaluado la posibilidad de que Colombia sufra dos o más años con fenómenos de El Niño consecutivos, como podría haber sido la norma en el Plioceno, o, incluso, a principios del siglo XX (**Gergis & Fowler,** 2009).

Las proyecciones de los cambios en el régimen de precipitaciones en Colombia debidos al cambio climático, se limitan a extrapolar los datos instrumentales recientes (**Macías & Andrade,** 2014), a partir de los cuales un leve descenso en las precipitaciones registrado instrumentalmente en los últimos ~ 30 años, se proyecta linealmente en el futuro. Esta lógica de predicción, con una disminución gradual en los aportes hídricos de 6 a 8 %, no tiene en cuenta que el régimen hidrológico del país es claramente no linear (**Poveda, *et al*.,** 2001), ni tampoco la posibilidad de un ENOM permanente como lo sugieren los análisis paleoclimáticos globales (**Molnar & Cane,** 2002; **Wara,** 2005; **Molnar & Cane,** 2007), o locales del norte de los Andes (**Molinares, *et al*.,** 2012; **Pérez-Ángel & Molnar,** 2017). El componente paleoclimático en los escenarios de generación futura (**UPME,** 2015) brilla por su ausencia.

El sistema interconectado nacional depende de una temporada normal de marzo a mayo para iniciar la recuperación de los niveles de los embalses. Si llegase a faltar una sola de estas temporadas, la generación hídrica podría, sencillamente, no estar disponible por varios años.

Recursos térmicos y eventos de El Niño. A raíz del apagón de 1992 a 1993 el gobierno entendió la debilidad del sistema y diversificó la canasta energética (**UPME**, 2010) mediante la instalación de una mayor capacidad de generación térmica, fundamentalmente a partir de gas y combustibles líquidos. Como resultado, se agilizó la terminación de la hidroeléctrica del Guavio, se amplió la interconexión con Venezuela y se aseguró la inversión privada en generadoras térmicas con garantías de compra de energía a 15 y 20 años a precios fijos. Así, entraron en funcionamiento las centrales de Flores I (150 MW, 1994), Flores II (100 MW, 1996), Tebsa (750 MW, 1996), Termodorada (50 mW, 1997), Termovalle (150 MW, 1998), Termoemcali (220 MW, 1999) y Paipa-I (150 MW, 1999), con las que se logró esquivar el racionamiento eléctrico durante el evento de El Niño de 1997.

A partir de 1998 se ampliaron las redes de transmisión eléctrica del país y en el 2003 se inició la interconexión eléctrica con Ecuador. Apartir del 2006 se instauró el 'cargo por confiabilidad', con el cual se regulan las 'obligaciones de energía firme', un compromiso de los generadores para producir energía durante los periodos de condiciones críticas. El 'precio de escasez', cuando los precios de la bolsa exceden un umbral determinado, debía garantizar la solvencia económica de los generadores privados a la hora de cumplir con los compromisos establecidos en el 'cargo por confiabilidad'. Este esquema, sin embargo, no alcanzó a garantizar la solvencia de varios de los operadores y en el evento de El Niño del 2016 el gobierno tuvo que intervenir la operación de Termocandelaria, la cual argumentaba que no tenía disponibilidad porque el 'precio de escasez' no justificaba su operación (Figura 1), (http://www.eluniversal.com.co/colombia/proxima-terminar-la-intervencion-de-termocandelaria-225093). A pesar de las críticas del sector al cálculo del 'precio de escasez' (**Asociación Nacional de Empresas Generadoras - ANDEG,** 2014), y la necesidad del gobierno de intervenir la operación de los generadores privados, el evento de El Niño del 2016 no llegó a doblegar el sistema interconectado nacional y se pudo esquivar, por muy poco, otro racionamiento energético.

En resumen, la respuesta al apagón de 1992-93 trajo un sistema descentralizado, interconectado, privado, pero regulado, que hasta ahora y con algunos inconvenientes, ha garantizado el suministro energético del país. El sector térmico, basado en gas (26 % de la capacidad instalada, **UPME,** 2015) y en combustibles líquidos ha demostrado

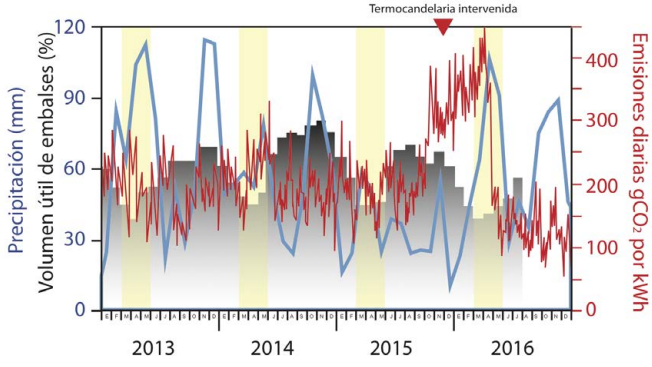


Figura 1. Figura 1. Ejemplo de cómo se comportan los niveles de los embalses ante escenarios de escasez de precipitación. El volumen útil de los embalses se expresa como porcentaje (barras grises hasta julio del 2016, **UPME,** 2016); las emisiones de CO2 (línea roja) se presentan como marcador de la generación térmica (http://informesanuales.xm.com.co/2017/SitePages/operacion/Default.aspx), y se da el promedio de las precipitaciones en cuatro estaciones pluviométricas de la CAR (Fute en Soacha, La Ramada en Funza, Checua en Nemocón y Venecia en Facatativá) entre el 2013 y el 2016 (https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Precipitaciones-Totales-Mensuales/mb4n-6m2g). La temporada de lluvias de marzo a mayo se resalta en amarillo, así como la fecha de inicio de la generación en la termoeléctrica Termocandelaria después de la intervención (ver texto). Aunque las precipitaciones graficadas no son representativas de todo el país, obsérvese cómo con solo dos temporadas lluviosas deficitarias, el nivel de los embalses se reduce a puntos críticos y las termoeléctricas deben entrar a operar a capacidad quemando gas importado.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

que puede llenar el vacío que deja la disminución en las precipitaciones durante un solo evento de El Niño. Pero el sistema interconectado nacional no ha experimentado todavía dos años consecutivos bajo las condiciones de El Niño.

Recursos no renovables y eventos de El Niño. Si suponemos que la generación hídrica puede ser golpeada por dos eventos intensos de El Niño consecutivos, podemos analizar entonces cuáles son las alternativas de generación. Aumentar la construcción de hidroeléctricas, sacrificando aun más nuestros ríos, sería multiplicar la incertidumbre, como ya lo anoté. La construcción de hidroeléctricas, además, tiene impactos ambientales y sociales en las cuencas locales y aguas abajo en importantes sistemas de humedales como la depresión momposina (**Angarita, *et al*.,** 2018). Descarto, sin mayor discusión, la opción nuclear, pues Colombia está muy lejos, tecnológica y políticamente, de consi-derar una opción de este tipo. Después de la fusión del reactor de Fukushima, Japón, de forma muy pragmática (**Friedel, *et al.,*** 2011), parece haber abandonado la opción nuclear a favor del carbón (**Normile,** 2018). Alemania está en el mismo proceso, pero a favor de los renovables. Los recursos eólicos, solares y geotérmicos, aunque ampliamente discutidos y ponderados en círculos políticos y ambientalistas colombianos, han tenido una inversión prácticamente nula en investigación y desarrollo (una fracción infinitesimal del 0,27 % del PIB, **Colciencias,** 2017). De modo que a corto y mediano plazo los renovables no son una opción realista para llenar el probable déficit de generación hídrica y la satisfacción de las dos terceras partes del consumo del país. Para com-parar la magnitud de la inversión necesaria, y según datos de la Agencia de Energías Renovables de Alemania, el *energiewende* o la transformación energética requerirá una inversión más de 200 mil millones de euros (2010-2020), un compromiso político y económico de toda la sociedad, y varias décadas para alcanzar una meta de apenas el 47 % de la electricidad y 28 % de la energía total alemana. Las inversiones de Colombia están muy, muy lejos, de estas cifras.

Así las cosas, las opciones colombianas para garantizar la generación de energía eléctrica en un escenario de cambio climático con un ENOM más intenso o frecuente, se reducen a aprovechar los recursos no renovables. Como explico a continuación, la ventana de autoabastecimiento de gas y petróleo es de menos de cinco años, lo que deja al carbón como la única alternativa viable para mantener la independencia energética.

Los recursos no renovables en Colombia. Colombia es un país geológicamente muy diverso debido a la acreción secuencial de terrenos geológicos a lo largo de su borde occidental (**Cediel, *et al.,*** 2003; **Spikings, *et al.,*** 2015). Hace aproximadamente 90 a 100 millones de años un período prolongado de anoxia oceánica (escasez de oxígeno disuelto en la interfase agua-sedimento) causó la preservación de espesores importantes de rocas ricas en materia orgánica a lo largo del todo el borde noroccidental de Suramérica (**Moreno-Sánchez & Pardo-Trujillo,** 2003). Estas rocas de grano fino son característicamente negras (*shale* negro), y se conocen en Colombia y Venezuela como Formación La Luna (**Villamil,** 2003). Hace aproximadamente 80 millones de años, arcos de islas intraoceánicas colisionaron con el borde occidental de Colombia, barriendo de sur a norte (**Villamil,** 1999; **Weber, *et al.,*** 2009; **Cardona, *et al.,*** 2012), causando deformación y metamorfismo y destruyendo la materia orgánica necesaria para la generación de hidrocarburos. Más al oriente, estas secuencias se preservaron en cuencas internas protegidas de la deformación, que hoy son productivas (**Villamil,** 2003; **Escalona & Mann,** 2006). Más tarde, hace aproximadamente 65 a 55 millones de años, el mar que había inundado gran parte del actual territorio colombiano, se retiró paulatinamente dejando grandes extensiones de pantanos tropicales donde se acumularon enormes espesores de materia orgánica vegetal que después se convirtieron en carbón (**Bayona, *et al*.,** 2011). Así, la cordillera Oriental, el piedemonte y la cuenca de los ríos Cesar y Ranchería, son territorios ricos en carbón, con reservas de miles de millones de toneladas.

Por definición, los recursos no renovables se agotan, ejemplo de ello es la cuenca del Valle Medio del Magdalena, donde se han extraído más de 3.000 millones de barriles de hidrocarburos (**Cediel,** 2011), y donde, recientemente, el campo Cira Infantas cumplió 100 años de explotación (https://www.larepublica.co/economia/los-hitos-de-los-100-anos-de-extraccion-de-petroleo-en-colombia-2717278). Esta es una cuenca madura para los recursos convencionales, es decir, los esfuerzos exploratorios han dado frutos y muchos campos ya se han agotado y ahora están en proceso de recuperación asistida. En el otro extremo están las cuencas frontera, donde aun no hay hallazgos pero sí exploración activa, y se espera encontrar yacimientos con potencial comercial. Este podría ser el ejemplo del Caribe colombiano, donde varias empresas han invertido enormes recursos financieros y tecnológicos en la búsqueda de hidrocarburos. Sin embargo, el sistema petrolífero podría, sencillamente, estar ausente. Los ejemplos recientes de descubrimientos de gas sugieren que se trata de acumulaciones biogénicas, es decir, por descomposición de materia orgánica y no por el proceso de su maduración para formar hidrocarburos (http://www.rigzone.com/news/oil_gas/a/136194/Petrobras_Finds_Gas_at_Orca1_Well_in_Colombias_Offshore_Tayrona_Block). Sin tener en cuenta una posible revolución de recursos no convencionales, Colombia está hoy en el medio del espectro, con cuencas maduras, aún en producción, pero en franco declive, y cuencas frontera, donde aún no se han probado acumulación de hidrocarburos con potencial comerciales. Por ello, el gobierno ha reconocido que en las condiciones actuales, la autosuficiencia petrolera del país es de menos de cinco años y la gasífera, incluso menor (**UPME,** 2015). No obstante, el cálculo de la autosuficiencia es complejo, ya que los incrementos en el precio del barril hacen que las reservas más caras, más inaccesibles, se

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):392-401, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

vuelvan comerciales y rentables a medida que sube el precio. El efecto contrario ocurre con las caídas en los precios, lo cual conlleva la contracción de las reservas. Sea como sea, nos estamos quedando sin gas y sin petróleo.

El carbón como alternativa

Colombia, en cambio tiene carbón, mucho carbón, y de muy buena calidad, típicamente con contenidos de azufre de menos del 1% (**Beltrán,** 1974). Por eso el país lleva décadas exportando a Europa millones de toneladas de carbón térmico al año (~90 millones de toneladas, **UPME,** 2013), mayoritariamente de la cuenca del Cesar-Ranchería. Esa cantidad de carbón que exportamos es suficiente para llevar electricidad a 30 millones de hogares en países desarrollados en un año o, dicho de otra manera, con la producción de un solo año se puede alimentar una planta térmica de 600 Mw durante cerca de 60 años operando a capacidad, suponiendo un 38 % de eficiencia y una disponibilidad del 75 %. Colombia, entonces, exporta mucho carbón, pero produce menos del 5 % de su electricidad a partir de este mineral, y el crecimiento que se proyecta es de menos del 12,5 % de la capacidad instalada para el 2028 (**UPME,** 2015). El resto de la generación térmica es a gas, con diesel y otros combustibles líquidos que, como sabemos, se están agotando en nuestras cuencas.

Incluso en una situación de precipitaciones normales, sin considerar cambios en el ENOM, Colombia ya está importando gas licuado (la forma costosa del gas) y combustibles líquidos, ambos amarrados al volátil precio del barril de petróleo (https://www.dinero.com/economia/articulo/gas-en-colombia-se-importa-o-se-produce-segun-canacol/243683). Es contradictorio que un país tan rico en energía (en forma de carbón) tenga que construir plantas regasificadoras para poder importar gas licuado de los Estados Unidos (país que, como dije arriba, ya se retiró del acuerdo de París), para quemar en su sector térmico. Si se da un ENOM más intenso o más frecuente, el sector térmico deberá importar grandes cantidades de gas licuado, y el país pasaría a ser un importador neto de energía, sin siquiera llegar a cubrir toda su demanda. El gas importado podría llegar a costar más del triple del precio del gas nacional, sin tener en cuenta los costos de transporte y regasificación (**UPME,** 2015).

Enfrentado a una disyuntiva comparable, Japón ha decidido quemar carbón, no gas. Una razón pueden ser los costos, ya que una vez que se decide importar gas, hay que hacerlo en su forma licuada, lo que lo hace más costoso. Otra razón de mayor peso puede ser estratégica. El carbón es fácilmente apilable como reserva a largo plazo en los patios traseros de las plantas térmicas, y a muy bajo costo. La posibilidad de apilamiento estratégico barato a largo o muy largo plazo es una ventaja que solo tiene el carbón. No se puede decir lo mismo de ninguna otra fuente de energía.

Aprovechando sus reservas de carbón, Colombia podría suplir la totalidad de su consumo de energía eléctrica y convertirse en un exportador neto de electricidad a países vecinos. Las nuevas tecnologías aumentan la eficiencia de las plantas (**Schrag,** 2009), y podrían hacerlo más limpio (https://www.bbc.com/news/science-environment-35659947), (https://www.bbc.com/news/science-environment-39032748) que el gas (**Álvarez, *et al.,*** 2018) procesándolo en plantas de ciclo ultra-supercrítico, donde las presiones y las temperaturas del vapor exceden los 300 bar y los 600 °C (http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-25/issue-3/features/critical-thinking.html).

La minería de carbón a cielo abierto ciertamente tiene impactos ambientales negativos. La cuenca del Cesar-Ranchería es la principal productora de carbón del país, y una de las más grandes del mundo. Dichos impactos incluyen cambios en la calidad del aire en las comunidades vecinas a los tajos de minería, ruido, vibraciones, impactos visuales, y otros. Además, la huella de los tajos no solo implica el tajo mismo, sino también los depósitos de material estéril, las vías de acceso y la infraestructura de transporte, manejo y embarque. Así, el valle del Cesar-Ranchería, en particular en su zona más septentrional, donde es más angosto, es una zona casi totalmente intervenida por la minería. Desde el piedemonte de la serranía del Perijá al de la Sierra Nevada de Santa Marta existen depósitos de material estéril y tajos de minería. La zona minera se ve interrumpida solo por el todavía bello río Ranchería, su acuífero y su bosque de galería, protegido dentro de la zona minera.

Sin embargo, y apelando al pragmatismo, el impacto (y las compensaciones) de la minería del carbón en la cuenca del Cesar-Ranchería ya están causadas. La minería a cielo-abierto inició a gran escala en la década de los años 80 y ha continuado de manera ininterrumpida desde entonces. Cerrar las minas, o dejar que lentamente se ahoguen con la previsible caída de la demanda europea, no arreglaría los impactos, y de hecho podría agravarlos, ya que no habría un ente responsable por la administración y manejo de estas áreas. La reducción del consumo en algunos países que tradicionalmente han sido grandes consumidores de carbón, como el Reino Unido, ya están contrayendo los mercados del carbón colombiano (https://www.nytimes.com/2017/04/21/world/europe/britain-burning-coal-electricity.html). Tales reducciones podrían ser suplidas por el consumo interno para la generación de electricidad. Permitir el cierre de las minas de carbón colombianas, mientras importamos gas licuado y combustibles líquidos, sería un contrasentido. Le estaríamos dando la espalda al único recurso que podría asegurar nuestra independencia y seguridad energética.

Conclusiones

En este ensayo presento una mirada pragmática sobre la encrucijada energética en la que se encuentra Colombia. Mientras que es claramente preferible tener una economía verde donde toda la energía del país provenga de energías limpias y amigables con el medio ambiente, no tenemos muchas alternativas diferentes al carbón. Décadas de inversiones mínimas o nulas en energías renovables, donde

Colombia podría ser una potencia, como la eólica y solar en la costa Caribe, o la geotérmica en el occidente colombiano, hace que el camino por recorrer se aún muy largo. Tan largo de hecho, que los efectos del cambio climático podrían llegar antes que la renovación energética.

Esta mirada podría ser más despreocupada, podríamos, por ejemplo, sentarnos a esperar que en vez de una disminución el cambio climático traiga un aumento en las precipitaciones (como en los años de eventos de La Niña), en cuyo caso la generación hídrica estaría de plácemes a corto plazo. También podríamos esperar que los esfuerzos exploratorios en el Caribe colombiano sean exitosos y traigan nuevas y abundantes reservas de gas económicamente explotables. Sin embargo, la preparación frente a situaciones desconocidas debe considerar por lo menos un escenario con la peor combinación de factores, que en Colombia incluye tres elementos fundamentales: 1) eventos de ENOM con déficits consecutivos (por lo menos dos) en las temporadas lluviosas; 2) una matriz energética basada en la hidrogeneración, y 3) respaldada por gas y combustibles líquidos importados. Infortunadamente, de los tres factores arriba mencionados, Colombia ya tiene los dos últimos sólidamente establecidos en su infraestructura energética. Recordemos que más de dos terceras partes de nuestra generación es hidroeléctrica, y que nuestras plantas térmicas queman principalmente gas, no carbón. Un ENOM más intenso, o simplemente dos eventos consecutivos de este tipo, sería el tercer factor detonante de una crisis del sector energético. Colombia entonces pasaría a depender del gas licuado y los combustibles líquidos importados, o de la interconexión eléctrica con países vecinos (Ecuador y Venezuela). En cualquiera de los casos, y con nuestras termoeléctricas quemando gas y no carbón, Colombia pierde independencia y confiabilidad en el suministro energético.

Mientras nos preparamos para los efectos desconocidos del ineludible calentamiento global, debemos seguir aprendiendo más acerca del régimen climático en el norte de los Andes durante el Plioceno. Todavía es muy poco lo que sabemos, pero puede potencialmente ser la clave para planear mejor nuestras alternativas de matriz energética en el mediano y largo plazo. Debemos también, como lo indica el documento de las partes COP21, eliminar o reversar las tendencias de deforestación actuales. Aunque no se ha calculado todavía, solo manteniendo nuestros bosques tropicales intactos y generando toda nuestra electricidad de carbón, podríamos mantener nuestras emisiones netas de CO_2 en cero.

Agradecimientos

A J. H. Escobar, al Instituto de Desarrollo Sostenible de la Universidad del Norte y A. I. Cadena de la Universidad de Los Andes, por fomentar seminarios sobre el tema. A M.L. Rodríguez-Puerto por las correcciones idiomáticas. A L. Pérez-Ángel por sus comentarios sobre el clima del Plioceno en los trópicos. A los revisores y al editor por sus sugerencias y comentarios para mejorar el manuscrito. Las opiniones aquí expresadas, así como cualquier error factual o de interpretación, son responsabilidad del autor.

Referencias

Adams, J. B., Mann, M. E., Ammann, C. M. 2003. Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing. Nature. **426** (6964): 274.

Álvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., Davis, K. J., Herndon, S. C., Jacob, D. J., Karion, A., *et al.* 2018. Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain. Science. **361** (6398): 186-188. doi: 10.1126/science.aar7204

Asociación Nacional de Empresas Generadoras – ANDEG. 2014. Un análisis del precio de escasez. ANDEG. Bogotá: 28.

Anderson, V. J., Saylor, J. E., Shanahan, T. M., Horton, B. K. 2015. Paleoelevation records from lipid biomarkers: Application to the tropical Andes: GSA Bulletin. **127** (11-12): 1604-1616.

Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A., Delgado, J., Purkey, D. 2018. Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. Hydrology and Earth System Sciences. **22** (5): 2839.

Bathiany, S., Dakos, V., Scheffer, M., Lenton, T. M. 2018. Climate models predict increasing temperature variability in poor countries. Science advances. **4** (5): eaar5809. doi: 10.1126/sciadv.aar5809

Baumert, K. A., Herzog, T., Pershing, J. 2005. Navigating the Numbers, Greenhouse Gas Data and International Climate Policy, U.S.A. World Resources Institute. Washington DC, World Resources Institute: 122.

Bayona, G. A., Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Ojeda, G., Valencia, V., Ayala-Calvo, R. C. 2011. Intraplate subsidence and basin filling adjacent to an oceanic arc-continent collision: A case from the southern Caribbean-South America plate margin. Basin Research. **23:** 403-422.

Bedoya-Soto, J. M., Poveda, G., Trenberth, K. E., Vélez-Upegui, J. J. 2018. Interannual hydroclimatic variability and the 2009-2011 extreme ENSO phases in Colombia: From Andean glaciers to Caribbean lowlands. Theoretical and Applied Climatology. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2452-2:1-14.

Beltrán, E. 1974. Carbones de Colombia. Bogotá, Ministerio de Minas y Petróleos: 254.

Blanco, J. A., Barandica, J. C. N., Viloria, E. A. 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. Fisheries Research. **88** (1-3): 100-108.

Bove, M. C., O'Brien, J. J., Eisner, J. B., Landsea, C. W., Niu, X. 1998. Effect of El Niño on US landfalling hurricanes, revisited. Bulletin of the American Meteorological Society. **79** (11): 2477-2482.

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. Nature climate change. **4** (2): 111.

Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., Collins, M., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Kug, J.-S., *et al.* 2015. ENSO and greenhouse warming. Nature Climate Change. **5** (9): 849.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):392-401, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.664

Cardona, A., Montes, C., Ayala, C., Bustamante, C., Hoyos, N., Montenegro, O., Ojeda, C., Niño, H., Ramírez, V., Valencia, V., Rincón, D., Vervoort, J. D., Zapata, S. 2012. From arc-continent collision to continuous convergence, clues from Paleogene conglomerates along the southern Caribbean-South America plate boundary. Tectonophysics. **580:** 58-87.

Cediel, F. 2011. Petroleum Geology of Colombia. Geology and Hydrocarbon Potential. Regional Geology of Colombia, Medellín. p. 225.

Cediel, F., Shaw R.P., Cáceres, C. 2003. Tectonic assembly of the northern Andean Block. AAPG Memoir. **79:** 815-848.

Cobb, K. M., Charles, C. D., Cheng, H., Edwards, R. L. 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. Nature. **424** (6946): 271.

Colciencias. 2017. Boletín estadístico No 5: Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Collins, M., An, S.-I., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. Nature Geoscience. **3** (6): 391.

Dai, A. & Wigley, T. 2000. Global patterns of ENSO-induced precipitation. Geophysical Research Letters. **27** (9): 1283-1286.

Donnelly, J. P. & Woodruff, J. D. 2007. Intense hurricane activity over the past 5,000 years controlled by El Niño and the West African monsoon. Nature. **447** (7143): 465.

Escalona, A. & Mann, P. 2006. An overview of the petroleum system of Maracaibo Basin. AAPG Bulletin. **90** (4): 657-678.

Friedel, J., Bard, P., Bernard, P., Cara, M., Courtillot, V., Dercourt, J., Jaupart, C., Le Pichon, X., Madariaga, R., Mantagner, J., Pecker, A., Poirier, J., Salencon, J., Schiendele, F., Tapponnier, P. 2011. Interim Report by an ad hoc working party of the Academie des Sciences. Academie des Sciences: 32.

Fyfe, J. C., Gillett, N. P., Zwiers, F. W. 2013. Overestimated global warming over the past 20 years. Nature Climate Change. **3** (9): 767.

Gergis, J. L. & Fowler, A. M. 2009. A history of ENSO events since A.D. 1525: Implications for future climate change. Climatic Change. **92:** 343-387.

Helmens, K. & van der Hammen, T. 1994. The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): A history of tectonic uplift, basin development and climatic change. Quaternary International. **21:** 41-61.

Hooghiemstra, H., Wijninga, V., Cleef, A. M. 2006. The paleobotanical record of Colombia: Implications for biogeography and biodiversity. Annals of the Missouri Botanical Garden. **93:** 297-324.

Kreft, S., Eckstein, L., Kerestan, C., Hagen, U. 2015. Global Climate Risk Index 2015: Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2013 and 1994 to 2013. Germanwatch e.V., Bonn: 32.

Lawrence, K. T., Liu, Z., Herbert, T. D. 2006. Evolution of the eastern tropical Pacific through Plio-Pleistocene glaciation. Science. **312** (5770): 79-83.

López, J. A., Medina, G., Domínguez, E., Uribe, E., Zapata, W., Arango, S., Martínez, J. F., Correa, C. 2013. Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME. Bogota: 416.

Macías, A. M. & Andrade, J. 2014. Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático. Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME: Bogota: 106.

Millar, R. J., Fuglestvedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., Skeie, R. B., Forster, P. M., Frame, D. J., Allen, M. R. 2017. Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 C. Nature Geoscience. **10:** 741-748.

Molinares, C., Martínez, J., Fiorini, F., Escobar, J., Jaramillo, C. 2012. Paleoenvironmental reconstruction for the lower Pliocene Arroyo Piedras section (Tubará–Colombia): Implications for the Magdalena River–paleodelta's dynamic. Journal of South American Earth Sciences. **39:** 170-183.

Molnar, P. & Cane, M. A. 2002. El Niño's tropical climate and teleconnections as a blueprint for pre-Ice Age climates. Paleoceanography. **17** (2): 11.

Molnar, P. & Cane M.A. 2007. Early Pliocene (pre-Ice Age) El Niño-like global climate; which El Niño? Geosphere. **3** (5): 337-365.

Moreno-Sánchez, M. & Pardo-Trujillo, A. 2003. Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate. En: Bartolini, C., Buffler, R., and Blickwede, J., editors. The Circum-Gulf of México and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. **79:** 891-924.

Morón, S., Amos, K., Edmonds, D. A., Payenberg, T., Sun, X., Thyer, M. 2017. Avulsion triggering by El Niño–Southern Oscillation and tectonic forcing: The case of the tropical Magdalena River, Colombia. GSA Bulletin. **129** (9-10): 1300-1313.

Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., Roest, W. R. 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. **9** (4): 19.

Normile, D. 2018. Bucking global trends, Japan again embraces coal power. Science. **360** (6388): 476-477.

Pérez-Ángel, L. C. & Molnar, P. 2017. Sea Surface Temperatures in the Eastern Equatorial Pacific and Surface Temperatures in the Eastern Cordillera of Colombia During El Niño: Implications for Pliocene Conditions. Paleoceanography. **32** (11): 1309-1314.

Philander, S. G. & Fedorov, A. V. 2003. Role of tropics in changing the response to Milankovich forcing some three million years ago. Paleoceanography. **18** (2): 23.

Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **28** (107): 201-222.

Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., Mantilla, R. I. 2001. Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. Water resources research. **37** (8): 2169-2178.

Poveda, G. & Rojas, W. 1997. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **21** (81): 421-429.

Rajaratnam, B., Romano, J., Tsiang, M., Diffenbaugh, N. S. 2015. Debunking the climate hiatus. Climatic Change. **133** (2): 129-140.

Ravelo, A. C., Dekens, P. S., McCarthy, M. 2006. Evidence for El Niño-like conditions during the Pliocene. Gsa Today. **16** (3): 4.

Rein, B., Luckge, A., Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A., Dullo, W. C. 2005. El Niño variability off Perú during the last 20,000 years. Paleoceanography. **20** (4): 17.

Restrepo, J. & Kjerfve, B. 2000. Magdalena river: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. Journal of hydrology. **235** (1-2): 137-149.

Restrepo-López, J. C. & Torregroza, A. C. 2017. Suspended sediment load in northwestern South America (Colombia): A new view on variability and fluxes into the Caribbean Sea. Journal of South American Earth Sciences. **80:** 340-352.

Rogelj, J., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Kriegler, E., Schae, M., Krey, V., Riahi, K. 2015. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. Nature Climate Change. **5** (6): 519, 527.

Ropelewski, C. F. & Halpert, M. S. 1986. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). Monthly Weather Review. **114** (12): 2352-2362.

Salzmann, U., A. M., Dolan, A. M., Haywood, W. L., Chan, J., Voss, D. J., Hill, A., Abe-Ouchi, B., Otto-Bliesner, F. J., Bragg, M. A., Chandler, C., Contoux, H. J., Dowsett, A., Jost, Y., Kamae, G., Lohmann, D. J., Lunt, S. J., Pickering, M. J., Pound, G., Ramstein, N. A., Rosenbloom, L., Sohl, C., Stepanek, H., Ueda, Z., Zhang, Z. 2013. Challenges in quantifying Pliocene terrestrial warming revealed by data-model discord. Nature Climate Change. **3:** 969-974.

Schrag, D. 2009. Coal as a low-carbon fuel? Nature Geoscience. **2** (12): 818.

Scotese, C. R. & Golonka, J. 1997. Paleogeographic atlas, PALEOMAP Project, University of Texas at Arlington: 35.

Spikings, R. A., Cochran, R., Villagómez, D., van der Lelij, R., Vallejo, C., Winker, W., Beate, B. 2015. The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). Gondwana Research. **27:** 96-139.

Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M., Roeckner, E. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. Nature. **398** (6729): 694.

Tollefson, J. 2017. Trump pulls United States out of Paris climate agreement. Nature News. **546** (7657): 198.

Naciones Unidas. 2015. Convención Marco sobre el Cambio Climático: Conferencia de las Partes, 21er período de sesiones: Naciones Unidas. París: 40.

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. 2010. Boletín Estadístico de Minas y Energía 1990-2010. Bogota: 248.

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. 2013. Boletín Estadístico de Minas y Energía 2000-2013. Bogotá: 263.

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. 2015. Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. Bogotá:183.

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. 2016. Boletín Estadístico de Minas y Energía, 2012-2016: Bogotá: 200.

Uribe, E., Cruz, G., Arango, S., Ramírez, C., León, I., Domínguez, E., García, L. C., Reyes, J. M. 2014. Definir estrategias del mapa de ruta para la adaptación del sector energético frente al cambio climático: UPME, Unidad de Planeación Minero Energética.:203.

van der Hammen, T., Werner, J., van Dommelen, H. 1973. Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: A study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its High-Andean biota. Review of Palaeobotany and Palynology. **16** (1-2): 1-122.

van Oldenborgh, G. J., Philip, S., Collins, M. 2005. El Niño in a changing climate: A multi-model study. Ocean Science. **1** (2): 81-95.

Villamil, T. 1999. Campanian–Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. **153** (1): 239-275.

Villamil, T. 2003. Regional hydrocarbon systems of Colombia and western Venezuela; their origin, potential, and exploration. AAPG Memoir. **79:** 697-734.

Wara, M. W. 2005. Permanent El Niño-Like Conditions During the Pliocene Warm Period. Science. **309** (758): 758-761.

Weber, M., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepúlveda, L., Wilson, R. 2009. The Cabo de la Vela Mafic-Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: A record of multistage evolution of a Late Cretaceous intra-oceanic arc. Geological Society, London, Special Publications. **328** (1): 549-568.

Woodall, J. M. 2011. Physics for Future Presidents. New York, W. W. Norton & Company: 361.

Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P., Jin, F.-F. 2009. El Niño in a changing climate. Nature. **461** (7263): 511.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science. **292** (5517): 686-693.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):402-409, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

Artículo original

Ciencias de la Tierra

Modelo estructural del Campo Escuela Colorado a partir de modelos análogos

Camilo Anaya[1], Giovanny Jiménez-Díaz[2], Dilan A. Martínez-Sánchez[1,*]

[1] Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
[2] Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Resumen

La cuenca del Valle Medio del Magdalena es una cuenca intermontana (**Cooper, *et al*.,** 1995; **Taboada, *et al*.,** 2000; **Sarmiento-Rojas, *et al.,*** 2006), que se caracteriza por tener estructuras con doble vergencia y está limitada por las cordilleras Central y Oriental (**Córdoba, *et al.,*** 2000). En el sector sureste del Valle, asociado al frente de deformación occidental de la Cordillera Oriental, se localiza el Campo Escuela Colorado de la Universidad Industrial de Santander. Los estudios previos (**Ecopetrol,** 2003; **Chajín, *et al.,*** 2013; **Zafra,** 2013) en dicho campo difieren en cuanto al modelo estructural y su relación con las estructuras regionales (por ejemplo, la falla de La Salina). En este trabajo se presentan los resultados de 15 modelos de simulación de una cuña crítica para definir las características estructurales en un ambiente compresivo. Los resultados de los modelos muestran un frente de deformación dominado por fallas con vergencia hacia el promontorio y retrocabalgamientos asociados. El apilamiento de material causó elevación topográfica en la zona axial de la cuña. Con base en la tendencia observada en los 15 experimentos realizados, se concluyó que la geometría de las estructuras está dominada por la escamación delgada y que el modelo estructural que define al Campo Escuela Colorado es una zona triangular controlada por un retrocabalgamiento. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Estilo estructural; Valle Medio del Magdalena; Campo Escuela Colorado; Modelos análogos.

Structural model of *Campo Escuela Colorado* based on analog models

Abstract

The Middle Magdalena Valley is an intermontane basin (**Cooper, *et al.,*** 1995; **Taboada, *et al.,*** 2000; **Sarmiento-Rojas, *et al.,*** 2006) characterized by double vergence structures and flanked by the Central and Eastern Cordilleras (**Córdoba, *et al*.,** 2000). The *Campo Escuela Colorado* oil field of the *Universidad Industrial de Santander* is located in the South Eastern zone of the Valley, associated with the western deformation front of the Eastern Cordillera. Previous works on this oil field have diverged as regards the structural model and the relationship with major structures (e.g., La Salina Fault). We present the results of 15 critical wedge simulation models to define the main structural characteristics in a compressive tectonic setting. Our results showed a deformation front dominated by thrust faults that verge towards the foreland and by associated backthrusts. The topographic elevation is caused by material stacked in the axial zone of the wedge. Based on the 15 experimental models we concluded that the geometry of the structure is dominated by thin flaking and that the structural model of the *Campo Escuela Colorado* is a triangular zone dominated by a backthrust. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Structural style; Middle Magdalena Valley; Campo Escuela Colorado; Analog models.

Introducción

El Valle Medio del Magdalena es una cuenca intermontana afectada por eventos de extensión, compresión, transcurrencia e inversión tectónica (**Cooper, *et al.,*** 1995; **Taboada, *et al.,*** 2000; **Sarmiento-Rojas, *et al.,*** 2006). En estudios previos en el sector central-sur de la cuenca se evidenció un estilo estructural predominante con vergencia hacia el oeste (**Mojica & Franco,** 1990; **Caballero, *et al.,*** 2010; **López & Jaimes,** 2015) y presencia de zonas transversales (**Restrepo-Pace, *et al.,*** 2004; **Jiménez, *et al*.,** 2016). El Valle del Magdalena Medio se caracteriza por una deformación concentrada en la secuencia sedimentaria que no involucra basamento (**Restrepo-Pace, *et al.,*** 2004; **Jiménez, *et al.*** 2016; **López & Jaimes,** 2015), y se define como de escamación delgada (**Cristallini,** 1998). En márgenes convergentes,

***Correspondencia:**
Dilan A. Martínez-Sánchez; dilanmsanchez30@gmail.com
Recibido: 18 de junio de 2018
Aceptado: 2 de octubre de 2018
Editor: Carlos Vargas Jiménez

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

el acortamiento horizontal y el espesor de la secuencia sedimentaria son los dos aspectos principales que controlan la geometría de las cuñas de deformación, las cuales generan un ángulo con respecto a la horizontal (ángulo crítico = δ + φ) (**Davis, *et al.,*** 1983; **Portillo,** 2008). Uno de los métodos para el estudio de procesos relacionados con las cuñas de deformación es el análisis por modelamiento análogo. Este método se basa en el uso de materiales granulares como la arena. Los modelos análogos han demostrado una relación con la evolución estructural de las cuñas de deformación y las propiedades de los materiales utilizados, por lo tanto, el modelamiento es un acercamiento de primer orden para entender los mecanismos de los diferentes estilos de deformación presentes en la naturaleza (**Malavieille,** 1984).

Las cuñas acrecionales, cuñas de deformación o cinturones plegados y con fallas, así como las cuñas de arena en modelos análogos, se describen en términos del coeficiente de fricción interna de los materiales (Tang ϕ) y el ángulo del despegue basal (μb), los cuales controlan el ángulo de la topografía de la cuña (δ) y el ángulo de des-pegue basal (φ) (**Davis, *et al*.,** 1983; **Portillo,** 2008).

El análisis e interpretación de los datos mejoran considerablemente con el empleo de modelos conceptuales, mecánicos o cinemáticos basados en técnicas numéricas o experimentales (**Graveleau, *et al*.,** 2012). Los modelos experimentales son útiles porque permiten observar geometrías y características distintivas de los procesos geológicos a escala de laboratorio. Estos modelos, además, son útiles y viables, pues pueden escalarse razonablemente (**Brun,** 2002; **Hubbert,** 1937).

Teniendo en cuenta que para el Campo Escuela Colorado, localizado en la cuenca del Valle del Medio del Magdalena (Figura 1), se han propuesto por lo menos tres modelos estructurales o hipótesis diferentes (**Ecopetrol,** 2003; **Chajín, *et al*.,** 2013; **Zafra,** 2013), el propósito principal de este trabajo fue evaluar experimentalmente el estilo estructural de su sector sureste, con el fin de determinar cuál de dichos modelos era el más coherente.

Marco geológico del Valle Medio del Magdalena

Geología estructural. El Valle Medio del Magdalena es una depresión tectónica asimétrica, limitada por dos frentes

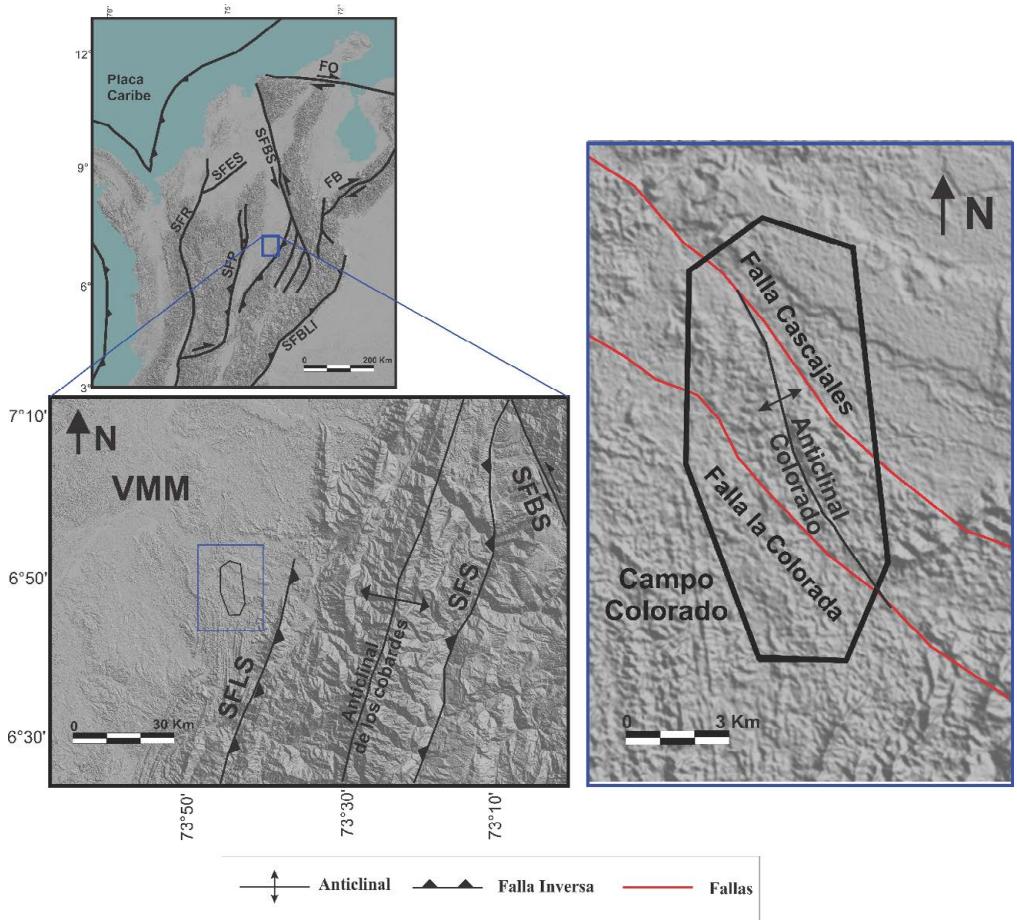


Figura 1. Modelo de elevación digital (DEM) con la ubicación del Campo Escuela Colorado en el contexto colombiano. VMM: cuenca del Valle Medio del Magdalena; FO: Falla de Oca. FB: Falla de Boconó; SFP: sistema de fallas de Palestina; SFR: sistema de fallas de Romeral; SFBLl: sistema de fallas del Borde Llanero; SFLS: sistema de fallas de Las Salinas; SFS: sistema de fallas de Suárez; SFBS: sistema de fallas de Bucaramanga- Santa Marta

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):402-409, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

cabalgantes de vergencia opuesta, (**Córdoba, *et al.*,** 2000). Está limitado al norte por el sistema de fallas de Espíritu Santo (S.F.E.S), al noreste, por el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta (S.F.B.S.M); al sureste, por el sistema de fallas de Bituima y La Salina (S.F.B.S), y al oeste, por la Serranía de San Lucas y la cordillera Central (**Barrero, *et al.*,** 2007).

El Valle presenta diversos estados de deformación que se iniciaron con un periodo extensional durante el Jurásico y hasta el Cretácico temprano. Posteriormente, se produjo un periodo de subsidencia y flexura de la cuenca hasta el Eoceno, cuando las fases iniciales de la orogenia andina cambiaron el estado de la cuenca y la sometieron a procesos compresivos que resultaron en la generación de fallas inversas y la inversión de estructuras preexistentes (**Sarmiento-Rojas, *et al.*,** 2006; **Bayona, *et al.*,** 2008; **Horton, *et al.*,** 2010; **Moreno, *et al.*,** 2011; **Nie, *et al.*,** 2012).

El Valle se ha definido estructuralmente en tres sectores (**Córdoba, *et al.*,** 2001). El sector oriental, caracterizado por estructuras con dirección noreste-suroeste, corresponde predominantemente a sistemas de cabalgamientos con vergencia hacia el oeste. El sector central se encuentra poco deformado y allí se encuentran fallas normales fosilizadas. El sector occidental se caracteriza por la presencia de fallas inversas con componente transpresivo y vergencia hacia el este.

La deformación del Valle se incrementa hacia el sureste en un frente de deformación netamente compresional (**Taborda,** 1965). Su límite oeste se caracteriza por una baja deformación y por truncaciones de las formaciones cretácicas y acuñamientos de rocas cenozoicas (**Mojica & Franco,** 1990).

Estratigrafía. La secuencia sedimentaria del Valle Medio del Magdalena está conformada por rocas cuya edad corresponde al Jurásico-Cretácico inferior (Berriasiano), asociadas a sistemas fluviales, con un control estructural (formaciones de Girón, Arcabuco-Los Santos) (**Etayo-Serna,** 1968; **Fabre,** 1983), así como por rocas del Cretácico temprano depositadas en una plataforma marina somera (formaciones de Cumbre, Rosablanca, Paja y Tablazo), rocas con edad entre el Albiano y el Maastrichtiano que corresponden a ambientes marinos someros (formaciones de Simití y La Luna) (**Rolón,** 2004), rocas con edad entre el Cretácico Superior y el Paleoceno que corresponden a rocas siliciclásticas marinas a paludales (formaciones de Umir y Lisama) depositadas en ciclos regresivos-transgresivos (**Cooper, *et al.*,** 1995; **Horton, *et al.*,** 2010; **Rolón,** 2004), y, por último, rocas de edad entre el Paleógeno y el Neógeno inicialmente deltaicas, seguidas de rocas continentales depositadas en un ambiente fluvial y rocas clásticas lacustres (formaciones de La Paz, Esmeraldas, Mugrosa, Colorado y Real) (**Moreno, *et al.*,** 2011; **Caballero, *et al.*,** 2010; **Rolón,** 2004).

Modelos del Campo Escuela Colorado. Mediante la interpretación sísmica, **Ecopetrol** (2003) definió un modelo estructural para el Campo Escuela Colorado controlado por un sistema de fallas inversas paralelas que lo delimita y segmenta en cinco bloques. Por otro lado, con base en la reinterpretación de cuatro líneas sísmicas, **Chajín, *et al.*** (2013) propusieron un modelo estructural definido por fallas inversas con anticlinales y retrocabalgamientos asociados (Figura 2). Con base en información de superficie, **Zafra** (2013) propuso que el anticlinal de Colorado está afectado trasversalmente por fallas normales con componente de rumbo sinestral.

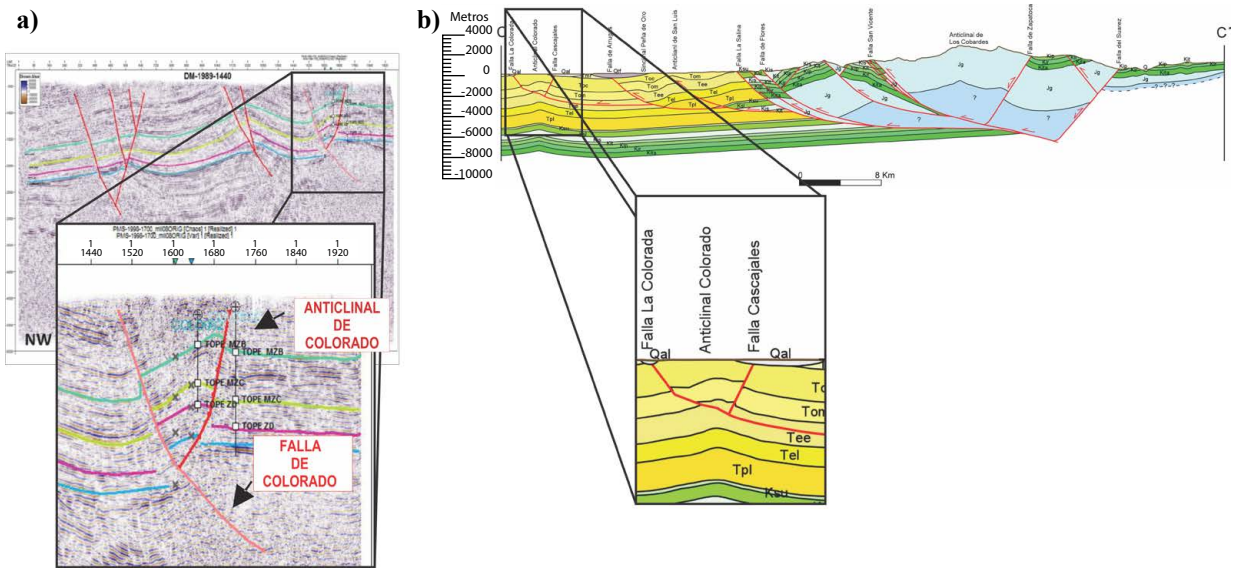


Figura 2. Comparación de: **a)** la interpretación de líneas sísmicas realizada por **Chajín, *et al.*** (2013); **b)** corte regional realizado por **Jiménez, *et al.*** (2016), enfocado en la zona del Campo Escuela Colorado. Gráficas tomadas y modificadas de **Chajín, *et al.*** (2013), **López & Jaimes** (2015) y **Macías & Cabanzo** (2017)

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

Condiciones experimentales y escalado. El escalado puede definirse como la relación entre dos cuerpos con igual forma y densidad, pero con dimensiones diferentes. Con una constante de proporcionalidad es posible vincular directamente ambos cuerpos para el análisis de las propiedades físicas en el laboratorio (**Hubbert,** 1937). Según **Graveleau, *et al.*** (2012), en modelos de deformación de la corteza superior se consideran dos comportamientos reológicos: 1) un comportamiento frágil (granitos y secuencias sedimentarias), y 2) un comportamiento viscoso (evaporitas, *shales*). Estas subdivisiones de la corteza se representan en los modelos análogos con diferentes materiales. Un material no cohesivo, como la arena, con un ángulo de reposo (μ) de 0,6 a 0,85 es una opción para representar el comportamiento frágil de la corteza superior (**Graveleau, *et al.,*** 2012; **Davis & Engelder,** 1985). Los materiales viscosos, como la silicona, generalmente se emplean para simular la corteza inferior o cuerpos que presenten comportamientos dúctiles (diapiros de lodo o sal) (**Dooley & Schreurs,** 2012). El comportamiento frágil se asume como un comportamiento friccional o del tipo Mohr-Coulomb, en el que el escalado entre las propiedades físicas del modelo y la naturaleza ponen en relación la cohesión (C), la densidad (ρ), la gravedad (g) y una dimensión de longitud (L) (**Graveleau, *et al.,*** 2012).

$$C^* = \rho^* \times L^* \times g^* \quad (1)$$

El comportamiento viscoso sigue un comportamiento newtoniano, el cual es el parámetro básico del escalado y liga el esfuerzo (σ), la viscosidad (η) y la tasa de deformación (ε) (**Graveleau, *et al*.,** 2012).

$$\sigma^* = \eta^* \times \varepsilon^* \quad (2)$$

En las ecuaciones 1 y 2 la estrella (*) representa el factor de proporcionalidad entre el modelo y la naturaleza para cada parámetro. El factor de tiempo (t*) entre el modelo y la naturaleza puede derivarse de la ecuación 2.

Experimentos, parámetros y materiales. La mesa de deformación utilizada para los experimentos consistió en una base deslizante de 100 cm, con dos paredes de vidrio (Figura 3). Los experimentos se desarrollaron bajo condiciones de gravedad normal. Se utilizó arena cuarzosa, seca, no cohesiva, con un coeficiente de fricción interna de 0,7 y una densidad promedio de 1,58 g/cm^3. Se usó un papel mylar para simular el despegue basal horizontal cuyo coeficiente de fricción es despreciable (**McClay, *et al*.,** 1999; **Davis, *et al*.,** 1983). Con base en la ecuación (1) se determinó que el factor de escala era 10^{-5}, donde 1 cm en el modelo equivale a 1 km en la naturaleza.

La configuración experimental fue igual a la utilizada en modelos de cuñas de doble vergencia (**Storti, *et al.,*** 2000). La deformación es inducida en la arena cuando la película de papel mylar (basamento) se mueve simulando una banda transportadora que genera un prisma de acreción bivergente (Figura 3) al llegar al punto que denominamos barrera cinética, o discontinuidad de velocidad (**van der Pluijn & Marshak,** 2004)

Los modelos se construyeron sobre una superficie horizontal y utilizando un tamiz se dispuso la arena capa a capa y con alternancia de colores. En los experimentos el espesor de la arena fue constante, de 3 cm, y la longitud variable, entre 80 y 95 cm (Figura 3). Las paredes de vidrio se cubrieron con grafito para minimizar la fricción en esta zona del experimento. Al finalizar cada experimento, el modelo se cubrió con arena residual y se procedió a humedecerlo con agua, con el fin de consolidarlo y cortarlo en secciones transversales para observar la geometría interna.

El seguimiento fotográfico del registro transversal y en planta de los experimentos se hizo con dos tipos de cámaras: una Canon EOS T3i y una Go-pro-Silver.

Resultados

Con el fin de garantizar estadísticamente la reproducibilidad de los experimentos se hicieron 15 pruebas experimentales de cuñas bivergentes con longitudes iniciales (Xo) máximas de 92 cm y longitudes mínimas de 80 cm (Tabla 1), y longitudes finales (X) máximas de 78 cm* y mínimas de 57 cm. Los resultados de los 15 experimentos (Tabla 1, Figura 4) evidenciaron una tendencia en sus estructuras y geometrías repetibles y similares a la de los experimentos reportados en trabajos previos (**Malavieille,** 1984; **Liu, *et al*.,** 1992; **Biggi, *et al*.,** 2010). En el análisis de evolución del modelo, se registraron los datos de longitud (Xo) y altura

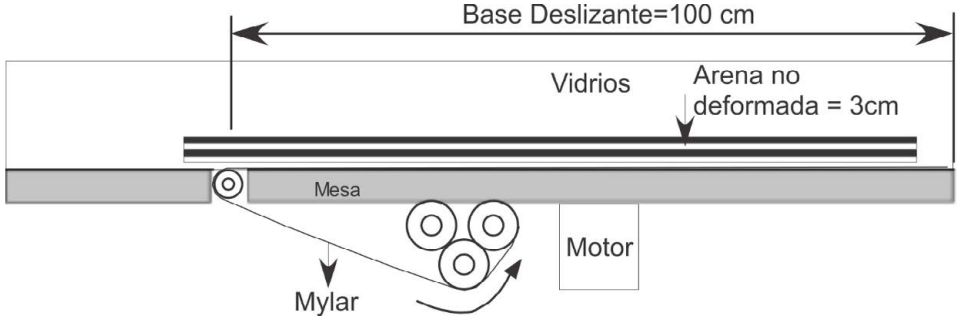


Figura 3. Esquema del montaje inicial de cada uno de los 15 modelos en el que se aprecia la intercalación de capas con un espesor total de 3 cm y la base deslizante de 100 cm

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):402-409, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

(Yo) iniciales y finales(x, y), con el fin de calcular el porcentaje de acortamiento. En promedio, para los experimentos este fue de 26 % (22 cm) (Tabla 1). Los experimentos mostraron un rápido crecimiento de la zona axial de la cuña debido al apilamiento de material asociado a las estructuras de la retrocuña (Figura 1S, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/673/2766) (Tabla 1).

En la figura 4 se muestran diferentes cortes trasversales en la prueba n°15, en la que se resaltan las fallas generadas en la cuña bivergente. Estas fallas se enumeraron (Figura 4c) según el orden cronológico de crecimiento.

En el análisis de la cuña bivergente establecida en los modelos se puede observar el crecimiento de las fallas de cabalgamiento principales en el frente de la deformación (con vergencia hacia el promontorio) y una serie de retrocabalgamientos en el flanco trasero de la cuña. Las estructuras hacia el frente de la cuña crecieron con dos fallas inversas principales espaciadas cada 10 cm aproximadamente, definiendo una geometría de cuenca de promontorio (Figura 4). Las fallas de acomodación o retrocabalgamientos en los modelos se asociaron únicamente con la segunda falla principal (Figuras 4 y 5). Esta estructuración se localizó en las zonas más distales de la cuña y se evidenció por la doble vergencia de las fallas que se definen en un despliegue *pop up* (Figura 5).

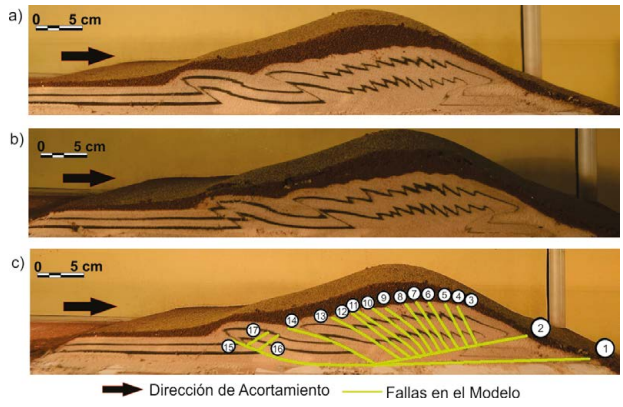


Figura 4. a., b., c. Cortes transversales en el modelo 15 de cuña bivergente. En **c.** las fallas generadas se enumeraron de 1 a 17 según su orden de crecimiento.

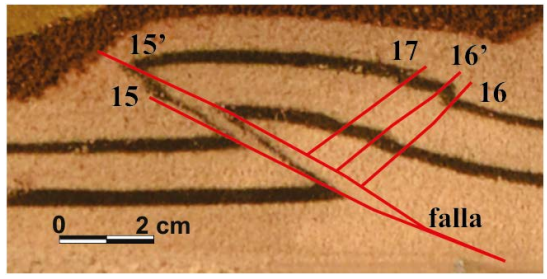


Figura 5. Corte trasversal del modelo 15 en el que se resalta la formación de una falla principal con vergencia al promontorio y cuatro retrocabalgamientos asociados

Discusión y conclusiones

El flanco occidental de la Cordillera Oriental está definido como un frente de deformación netamente inverso o dominado por cizalla pura (**Taboada, *et al.*,** 2000; **Cortés,**

Tabla 1. Condiciones iniciales (Xo) y finales (X) para el cálculo del porcentaje de elongación (%e) de los modelos realizados.

N° de serie	Longitud inicial - Xo (cm)	Longitud final - X (cm)	ΔX	Altura inicial - Yo (cm)	Altura final - Y (cm)	ΔY	%e
1	80,0	57,0	-23,0	3	9,0	6,0	-28,8
2	88,0	59,0	-29,0	3	10,0	7,0	-33,0
3	80,0	59,0	-21,0	3	8,5	5,5	-26,3
4	80,0	57,0	-23,0	3	8,5	5,5	-28,8
5	80,0	59,0	-21,0	3	9,0	6,0	-26,3
6	85,0	60,0	-25,0	3	9,0	6,0	-29,4
7	85,0	61,0	-24,0	3	9,5	6,5	-28,2
8	83,0	60,0	-23,0	3	8,3	5,3	-27,7
9	85,0	65,0	-20,0	3	7,7	4,7	- 8,2
10	85,0	78,0	- 7,0	3	8,2	5,2	-22,2
11	90,0	70,0	-20,0	3	8,0	5,0	-32,9
12	85,0	57,0	-28,0	3	8,0	5,0	-32,9
13	88,0	64,0	-24,0	3	8,3	5,3	-27,3
14	92,0	65,0	-27,0	3	8,8	5,8	-29,3
15	80,0	57,0	-23,0	3	9,5	6,5	-28,8
Promedio	84,4	61,9	-22,5	3	8,7	5,7	-26,7

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

et al., 2006). En las series experimentales realizadas en este trabajo se consideró una deformación coaxial o de cizalla pura, y durante los experimentos no se consideraron factores como las anisotropías de basamento, las fallas transversales o la cizalla simple. Para los 15 experimentos se asumió esta condición como condición límite, por lo tanto, los modelos representan una cuña bivergente caracterizada por fallas netamente de cabalgamiento con vergencia al promontorio y con pliegues asociados (Figura 5 y 6).

Con base en las características estructurales definidas en los 15 modelos experimentales es posible definir el Campo Escuela Colorado dentro de un estilo estructural de piel delgada, caracterizado por fallas inversas con vergencia hacia el oeste y desarrollo de pliegues por propagación de falla y retrocabalgamientos en las zonas más distales del frente de deformación de la Cordillera Oriental (Figura 6 y 7). Los resultados son coherentes con el marco estructural del sector sureste del Valle Medio del Magdalena, el cual

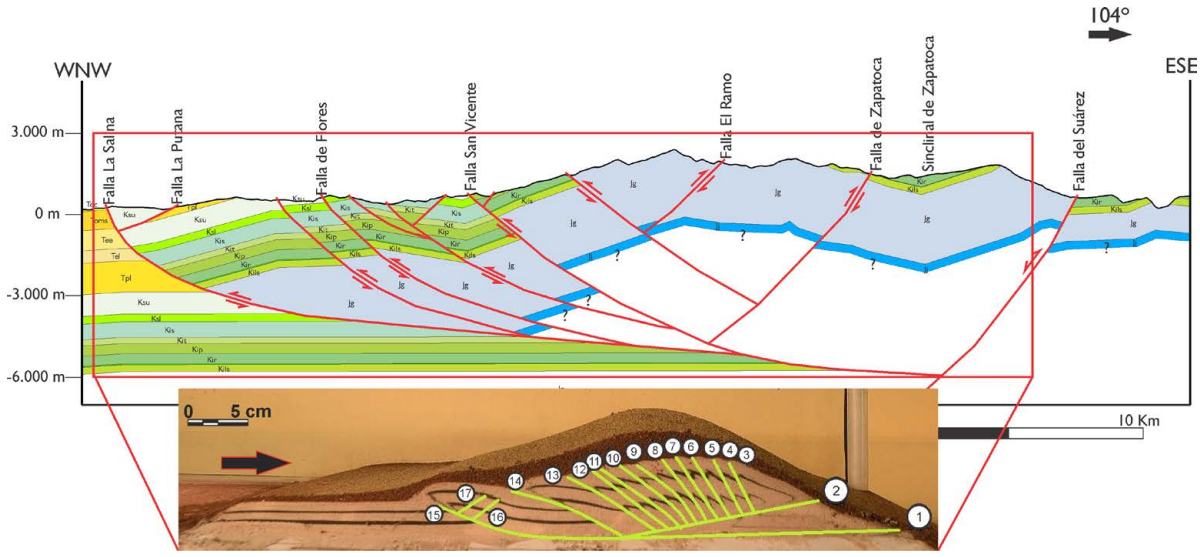


Figura 6. Corte regional de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (**Macías & Cabanzo,** 2017) y corte transversal del modelo de cuña bivergente. En los dos esquemas se resaltan fallas inversas principales con el desarrollo de retrocabalgamientos y pliegues asociados.

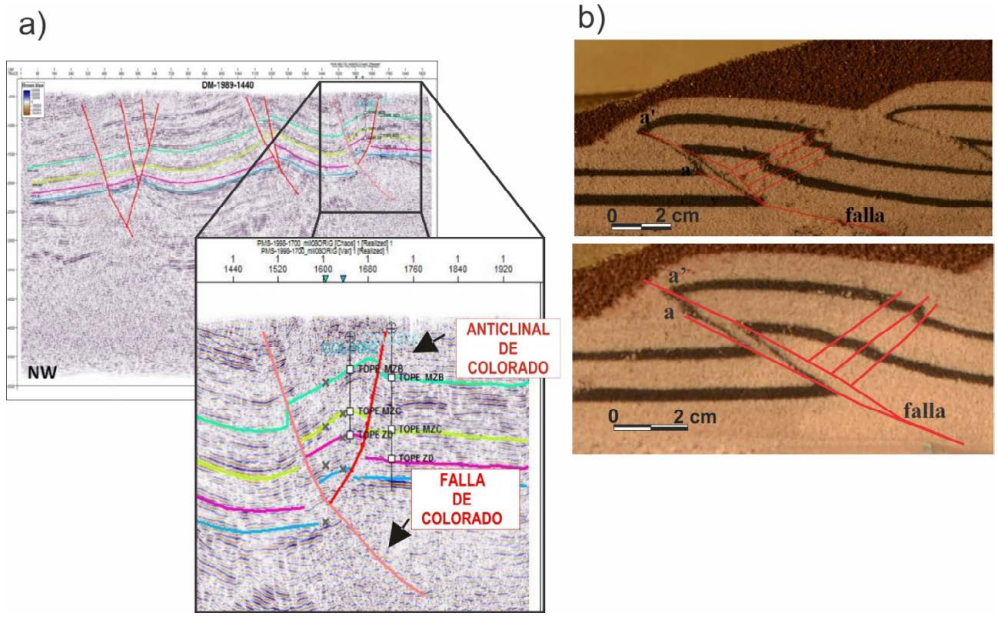


Figura 7. Comparación entre: **a)** el modelo estructural del Campo Escuela Colorado de **Chajín,** ***et al.*** (2013) y **b)** el resultado de los experimentos realizados. **a)** Modelo estructural definido por la falla de Colorado con vergencia inversa hacia el oeste y su anticlinal y retrocabalgamiento asociados. Interpretación de la línea sísmica DM-1989-1440. **b)** Corte transversal del modelo a escala de laboratorio en el que se muestra una falla principal con vergencia al promontorio y retrocabalgamientos asociados

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):402-409, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.673

según **Córdoba, *et al.*** (2001), se define como una cadena plegada y fallada con vergencia hacia el oeste (fallas de Bituima y La Salina) e intervalos de despegue en las formaciones de La Luna y Umir.

La cuña sedimentaria en los experimentos se caracterizó por acortamientos constantes en el rango de 20 a 30 %, con ligeras variaciones entre los modelos con la misma longitud inicial. Según **Pierson** (2014), las variaciones de acortamiento pueden explicarse por el desplazamiento de las fallas y por la acomodación granular debida al acortamiento paralelo a las capas. La zona axial de la cuña se caracterizó por elevaciones topográficas rápidas en las primeras fases de deformación, con un apilamiento de material y engrosamiento hasta duplicar el espesor de la cobertera (Figura 1S, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/673/2766 y Tabla 1).

Según los resultados obtenidos en los 15 experimentos realizados y con las condiciones límites definidas, no se encontraron estructuras de alto ángulo, independientes o que segmentaran la cuña. Además, no se observaron estructuras con componente de rumbo o deformación no coaxial, por lo que los resultados difieren de las interpretaciones realizadas en los modelos de **Ecopetrol** (2003) y **Zafra** (2013). Asimismo, el estilo estructural definido en los experimentos y los resultados observados (Figura 6) concuerdan y presentan similitudes con el corte regional realizado por **Garavito** (200)8, **Araque & Otero** (2016), **Jiménez, *et al.*** (2016) y **Macías & Cabanzo** (2017). Teniendo en cuenta el estilo estructural de piel delgada y la geometría de las estructuras definidas por un frente de deformación con retrocabalgamientos, se concluye que los resultados concuerdan con el modelo estructural propuesto por **Chajín, *et al.*** (2013) para el Campo Escuela Colorado.

Información suplementaria

Figura 1S. Secuencia completa de la evolución de la cuña bivergente del experimento nº 15: **a)** etapa inicial y **q)** etapa final. Esta imagen evidencia el crecimiento de la estructura asociado a las fallas de la retrocuña enumeradas según su etapa de crecimiento. Vea la figura 1S en: https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/673/2766

Agradecimientos

Agradecemos a la administración del Campo Escuela Colorado por colaborarnos con la información requerida para esta publicación. Además, agradecemos a los revisores anónimos y al editor ya que sus comentarios y sugerencias permitieron mejorar el manuscrito.

Contribución de los autores

El presente artículo, fue elaborado y revisado por Camilo Anaya, Giovanny Jiménez Díaz y Dilan A. Martínez Sánchez. Camilo Anaya realizó los experimentos bajo la supervisión de Giovanny Jimenez. Las figuras y tablas fueron diseñadas, realizadas y discutidas por los tres autores. La redacción del texto fue liderada por Camilo Anaya y Dilan A. Martinez, Giovanny Jimenez participó en la redacción de la introducción y la discusión. El documento final es un aporte equitativo de los tres autores.

Conflicto de intereses

Ninguno

Referencias

Araque-G., C. N. & Otero-R., J. L. (2016). Zonas transversales y su relación con estructuras regionales, flanco O-Cordillera Oriental. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH. Editado y compilado por ANH and B&M Exploration Ltda. Bogotá, Colombia.

Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J. J., Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Bulletin of the Geological Society of America, **120** (9-10): 1171–1197. doi: 10.1130/B26187.1

Bigi, S., Di Paolo, L., Vadacca, L., Gambardella, G. (2010). Load and unload as interference factors on cyclical behavior and kinematics of Coulomb wedges: Insights from sandbox experiments, Journal of Structural Geology. **32:** 28-44.

Brun, J. P. (2002). Deformation of the continental lithosphere: Insights from brittle-ductile models. En: Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives. Editores: S. De Meer, *et al.*, Geol. Soc. Spec. Publ. **200:** 355-370.

Caballero, V., Parra, M., Mora, A. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología. **32** (1): 45-77.

Chajín, P., Mier, R., Palmera, T. Delgado, L., Luna, J. (2013). Reinterpretación del modelo estructural del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia. En XV Congreso Colombiano de Petrólero y Gas. Noviembre 20 al 22. Corferias, Bogotá.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. **79** (10): 1421-1443.

Córdoba, F., Rolón, L., Buchelli, F., Suárez, M. (2000). Provincia petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL). 7º Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Caracas, Venezuela. p. 603-605.

Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Buchelli, F., Sotelo, C. (2001). Proyecto evaluación regional del Valle Medio del Magdalena y Cordillera, Ecopetrol, informe interno: Bogotá.

Cortés, M., Colletta, B., Angelier, J. (2006), Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia, J. S. Am. Earth Sci. **21:** 437-465, doi:10.1016/j.jsames.2006.07.004

Cristallini, E. (1998). Introducción a las fajas plegadas y corridas. Buenos Aires, Argentina.

Davis, D., Suppe, J., Dahlen, F.A. (1983). Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. Journal of Geophysical Research. **88:** 1153-1172.

Dooley, T. P. & Schreurs, G. (2012). Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. Tectonophysics. **574:** 1-71.

Ecopetrol. (2003). Diagnóstico y estrategias de recobro Campo Colorado, Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano de Petróleo. Bogotá. p. 126.

Etayo-Serna, F. (1968). El sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. Geología Colombiana. **5:** 5-74.

Fabre, A. (1983). La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior. Primera parte: Estudio cuantitativo de la subsidencia. Geología Norandina. **8:** 22-27.

Garavito, C. F. (2008). Structural analysis of an area in the northern central part of the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Tesis de Maestría, Colorado School of Mines.

Graveleau. F., Malavieille, J., Dominguez, S. (2012). Experimental modelling of orogenic wedges: A review. Tectonophysics. **538-540:** 1-66

Horton, B.K., Saylor, J.E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., Stockli, D.F. (2010). Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. GSA Bulletin. **12:** 1423-1442.

Hubbert, M. K. (1937). Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geological Society of America Bulletin. **48** (10): 1459-1520.

Jiménez, G., López, O., Jaimes, L., Mier U., R. (2016). Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. Revistas Académicas Ciencias de la Tierra. **40** (155): 312-319.

Liu, H., McClay, K.R., Powell, D. (1992). Physical models of thrust wedges. En: McClay, K.R. (Editores). Thrust Tectonics. New York, USA: Chapman and Hall. p. 71-81.

López. O. A. & Jaimes. E. L. (2015). Contribución al conocimiento geológico del sector Sureste de la Plancha 120-II-C, Valle Medio del Magdalena. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Macías, Y. & Cabanzo, M. (2017). Análisis y caracterización estructural de zonas transversales en el bloque colgante de la falla del Suárez (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

McClay, K., Dooley, T., Whitehouse, P. (1999). Analogue modeling of thin and thick-skinned thrust systems. Thrust Tectonics. Egham, U.K. p. 26-29.

Malavieille, J. (1984). Modelisation experimentale des chevauchements imbriques: Application aux chaınes de montagnes. Bulletin de la Societe´ Geologique de France. **7:** 129-138.

Mojica, J. & Franco, R. (1990): Estructura y Evoluci6n Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. Geología Colombiana. **17** (14): 41-64.

Moreno, C. J., Horton, B. K., Caballero, V., Mora, A., M., Sierra, J. (2011). Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Journal of South American Earth Sciences. **32:** 246-263.

Nie, J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Mange, M., Garzione, C. N., … Parra, M. (2012). Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U-Pb ages, heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley basin, northern Andes, Colombia. Earth-Science Reviews. **110** (1-4): 111-126. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.11.002

Pierson, N. (2014). Assessing Layer Parallel Shortening in the Eastern Colorado Front Range Using Thin Section Analysis and Analog Sandbox Models (Thesis of Master of Science). University of Nebraska, Lincoln.

Portillo, R. (2008). Influencia de la heterogeneidad mecánica de medios estratificados en el estilo y evolución estructural durante acortamiento: experimentos físicos. (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, Mexico DF, méxico.

Restrepo-Pace, P. A., Colmenares, F., Higuera, C., Mayorga, M. (2004). A fold and thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia-Style, kinematics, and timing constraints derived from seismic data and detailed surface mapping. En K. R. McClay (Editores). Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir. **82:** 598-613.

Rolón, L. F. (2004). Structural Geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin-Colombia. Department of Geology and Geography. Thesis of Master of Science in Geology, West Virginia University. Morgantown, WV, USA.

Sarmiento-Rojas, L. F., van Wess, J. D., Cloetingh, S. (2006), Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models, J. S. Am. Earth Sci., **21:** 383-411. doi:10.1016/j.jsames.2006.07.003

Storti, F., Salvini, F., McClay, K. (2000). Synchronous and velocity-partitioned thrusting and thrust polarity reversal in experimentally produced, doubly-vergent thrust wedges: Implications for natural orogens. Tectonics. **19** (2): 378-396.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics. **19:** 787-813.

Taborda, B. (1965). Guide book to the Geology of the De Mares Concession. Geotec, Bogotá

van Der Pluijm, B. A. & Marshak, S. (2002). Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics. Norton & Company inc. New York.

Zafra, E. (2013). Cartografía geológica del Campo Colorado a escala 1: 25.000. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

Artículo original

Ciencias de la Tierra

Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki

Lina M. Serna*, Paola A. Arias, Sara C. Vieira

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Resumen

El objetivo de este artículo fue analizar la influencia de dos tipos de eventos de El Niño, conocidos como Canónico y Modoki, en las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe, importantes mecanismos de transporte de humedad y generación de precipitación en Colombia. La influencia de estos tipos de eventos de El Niño en las corrientes superficiales de interés se examinó con base en las diferencias entre las características en la climatología de estos chorros durante dichos eventos y el análisis de correlaciones entre estos fenómenos. Los resultados obtenidos indicaron que en los dos primeros trimestres del año, la intensidad de estas corrientes superficiales se ve disminuida durante ambos tipos de eventos El Niño, en tanto que en los dos últimos trimestres del año se observan efectos contrarios: un fortalecimiento del chorro del Caribe y un debilitamiento del chorro del Chocó. Sin embargo, la magnitud del impacto durante los eventos El Niño Modoki es menor que durante los eventos El Niño Canónico, aunque se observa un mayor número de eventos El Niño Modoki durante el periodo de análisis. Lo anterior es fundamental para la elaboración de pronósticos de precipitación en Colombia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: ENSO; Chorro del Chocó; Chorro del Caribe; Colombia; Modoki.

The Choco and Caribbean low-level jets during El Niño and El Niño Modoki events

Abstract

The objective of this paper was to analyze the influence of two types of El Niño events (known as Canonical and Modoki) on the Chocó and the Caribbean low-level jets, which are important moisture transport and precipitation generation mechanisms in Colombia. We explored the influence of these types of El Niño events on these low-level jets by analyzing the differences between climatological features of these jets and the patterns observed during the occurrence of these two El Niño events, as well as the correlations between these phenomena. Our results indicated that for the first half of the year, the strength of these low-level jets diminished during the occurrence of both types of events, while in the last half of the year opposite effects were observed, with the strengthening of the Caribbean low-level jet and the weakening of the Choco jet during the occurrence of both events. However, the magnitude of the impacts observed during Canonical El Niño events was larger than during El Niño Modoki events. This finding is essential in the development of rainfall forecasting in Colombia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: ENSO; Choco jet; Caribbean low-level jet; Colombia; Modoki.

Introducción

La climatología de una región está determinada por una diversidad de procesos atmosféricos, así como por su posición geográfica y su geomorfología. El clima en el norte de Suramérica, y en concreto el de Colombia, por su ubicación en latitudes tropicales, registra un marcado ciclo de precipitación bimodal en la región central y en el oeste del país debido, en parte, a la migración de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (**Poveda,** 2004), a la cercanía de los océanos Pacífico y Atlántico, que facilita la llegada y el transporte de humedad atmosférica hacia el continente (**Sakamoto, *et al.,*** 2012), y a la presencia de tres ramificaciones de la cordillera de los Andes y de la selva Amazónica en su territorio y en el de los países vecinos, lo que constituye una fuente de humedad mediante procesos de evapotranspiración (**Poveda, *et al.,*** 2014). Ello explica la gran diversidad de ecosistemas y biomas del país, los cuales dependen del acoplamiento y la estabilidad de estas condiciones para su supervivencia.

En las numerosas regiones que componen el territorio colombiano se puede encontrar una gran variedad de características climáticas: desde los climas secos y áridos

***Correspondencia:**
Lina M. Serna; linam.sernat@gmail.com
Recibido: 23 de julio de 2018
Aceptado: 27 de octubre de 2018
Editor: José Pabón Caicedo

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

de los desiertos, con poca o casi nula precipitación, hasta los climas con precipitaciones anuales entre 8.000 y 13.000 mm (**Poveda & Mesa,** 1999) como la selva del Chocó, en la cual se registran altos índices de biodiversidad. En las zonas que se encuentran más cerca de los océanos, como es el caso del departamento de Chocó o de la costa Caribe, existe una importante influencia de estas masas oceánicas, así como de las corrientes superficiales que se generan en regiones tropicales, conocidas como corrientes superficiales de chorro, y que están estrechamente relacionadas con la proximidad de los océanos al continente y los gradientes de temperatura que se forman entre ambos. Esto propicia la circulación de corrientes de aire desde lugares con mayor presión (fríos) a lugares de menor presión (calientes). Otras condiciones que favorecen la formación, circulación e intensidad de estas corrientes en el norte de Colombia son la curvatura de los vientos alisios que, al cruzar el ecuador, son afectados por el cambio de signo de la aceleración de Coriolis, la posición de la ZCIT, los cambios en los ciclos diurnos, las oscilaciones inerciales y los cambios en la fricción de las superficies, entre otros (**Prabha, *et al*.,** 2011). Estas corrientes están vinculadas al transporte y el flujo de la humedad desde los océanos hacia los continentes, al desarrollo de la actividad de convección, a la liberación de calor latente hacia la atmósfera, lo que añade energía potencial al sistema continente-océano, y a los cambios en los patrones de la temperatura superficial del mar (TSM) (**Stensrud,** 1996; **Poveda & Mesa,** 1999). Al propiciar la actividad de convección en la atmósfera, las corrientes superficiales de chorro son importantes modeladores del clima regional; por lo tanto, el estudio de su variabilidad espaciotemporal y de los factores y fenómenos que las puedan afectar es de vital importancia para entender su influencia en la hidroclimatología de una región. El norte de Suramérica se ve afectado por dos corrientes superficiales de chorro: el chorro del Chocó (**Poveda & Mesa,** 1999; **Poveda, *et al.,*** 2014; **Sierra, *et al.,*** 2018) y el chorro del Caribe (**Amador,** 2008; **Wang,** 2007), los cuales son mecanismos importantes en la generación de precipitación en la región (**Arias, *et al.,*** 2015; **Durán-Quesada, *et al.,*** 2017).

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), en sus fases de El Niño y La Niña, también tiene un papel trascendental en la variabilidad climática de distintas regiones del planeta, entre ellas el norte de Suramérica, debido a que este fenómeno interfiere en el normal acoplamiento del sistema océano-atmósfera al inducir patrones de circulación atmosférica atípicos y de calentamiento o enfriamiento oceánico inusuales, produciendo así anomalías en los ciclos de precipitación y en los caudales de los ríos en Colombia y el norte de Suramérica (**Tedeschi, *et al.,*** 2013; **Poveda, *et al.,*** 2014). Las corrientes de los chorros del Chocó y del Caribe se pueden ver especialmente influenciadas por este fenómeno, ya que ambas corrientes presentan un componente geostrófico en su origen, por lo que el calentamiento del océano Pacífico durante los eventos de El Niño genera una disminución de los gradientes de temperaturas y presiones y lleva a una modificación en la intensidad de dichas corrientes (**Amador,** 2008; **Poveda & Mesa,** 1999).

En las últimas décadas ha habido un interés creciente por estudiar los cambios que se están dando en los patrones de anomalías de la TSM en el Pacífico tropical, que se han notado desde el siglo pasado, pero que solo se empezaron a analizar y a discutir debido a la detección de un calentamiento anómalo en la región central del océano Pacífico, y enfriamientos en el este y oeste de este océano durante el verano del año 2004. En estudios posteriores se evidenció la necesidad de clasificar este calentamiento localizado del océano Pacífico como una manifestación diferente del fenómeno de El Niño Canónico, caracterizado por un calentamiento anómalo de la lengua fría localizada en el este del Pacífico tropical (**Ashok, *et al.,*** 2007). Este patrón de calentamiento, más concentrado en el centro y oeste del Pacífico tropical, se ha denominado en la literatura contemporánea como El Niño Modoki (ENM) o El Niño del Pacífico Central. Algunos autores han estudiado la influencia de El Niño Modoki en la climatología de Suramérica y han establecido que este tipo de eventos de El Niño es cada vez más frecuente y puede generar efectos contrarios en la región a los observados durante los eventos de El Niño Canónico (**Tedeschi, *et al.,*** 2016; **Córdoba, *et al.,*** 2015).

Este trabajo se enfocó específicamente en el estudio del chorro del Chocó y del chorro del Caribe y sus variaciones durante los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki. Se compararon las distintas variables atmosféricas que representan la dinámica, el transporte de humedad y la evolución temporal de estas corrientes superficiales durante dichos eventos.

Datos y métodos

Datos. Se analizaron las características climatológicas de los chorros de bajo nivel del Chocó y el Caribe y sus variaciones durante El Niño Canónico y El Niño Modoki. Dichas características se definieron mediante el análisis de vientos horizontales a 925 hPa, el corte vertical de vientos zonales en los 80°W, el corte vertical del flujo de humedad en los 80°W, y el ciclo anual de los vientos zonales a 925 hPa. Además, se obtuvieron los índices para determinar la intensidad de estas corrientes de chorro.

Para estos análisis se emplearon datos del reanálisis ERA-Interim del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPPM) (**Dee, *et al.,*** 2011). Para ello se emplearon las componentes zonales y meridionales de los vientos (*u* y *v,* respectivamente) y la humedad específica (q) desde niveles de 1.000 hPa hasta 700 hPa. ERA-Interim cuenta con registros diarios por hora desde enero de 1979 hasta octubre de 2016, con un variado rango de resolución espacial que va desde 0,125° x 0,125° hasta 3° x 3°. En este trabajo se usaron las series mensuales de tiempo obtenidas de los promedios diarios en una resolución espacial estándar de 0,75° x 0,75°.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

Para determinar la aparición de los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki se emplearon los registros de las anomalías de la TSM de la base de datos *Optimum Interpolation*, *Version 2* (OI V2) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (*National Oceanic and Atmospheric Administration,* NOAA), el cual posee registros de promedios mensuales desde diciembre de 1981 hasta agosto de 2016, con una resolución espacial única de 1° x 1° (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html).

Metodología

Los análisis desarrollados en este trabajo consideraron los cuatro trimestres del año: diciembre - enero – febrero, marzo - abril – mayo, junio - julio – agosto y septiembre - octubre – noviembre. Con la intención de enfocar los análisis en la zona de influencia de los chorros del Caribe y del Chocó, se limitó el área de estudio al norte de Suramérica. Con el objeto de caracterizar estas corrientes de chorro y determinar sus variaciones durante los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki se consideraron tres características básicas: distribución horizontal de vientos a 925 hPa, cortes verticales de viento, y ciclo anual de viento zonal a 925 hPa.

Para el análisis de la distribución horizontal de vientos a 925 hPa, se consideró el dominio 110°W–50°W, 15°S–40°N y, así, se calcularon los promedios multianuales de los componentes zonal y meridional del viento a 925 hPa en los cuatro trimestres del año en cada uno de los pixeles del dominio de interés y se obtuvieron sus anomalías (con respecto al promedio de 1981 a 2016) durante los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki, determinados según se describe más adelante en esta sección. Para los cortes verticales de viento y de flujo de humedad, se consideró una sección latitudinal en los 80°W y se obtuvo el promedio trimestral multianual del componente zonal del viento para dicha longitud, correspondiente a la costa Pacífica colombiana y el oeste del Caribe, así como para cada latitud entre los 5°S y los 20°N y para cada nivel de presión entre 1.000 hPa y 700 hPa. Este corte permite observar los núcleos de los chorros y cómo varía su posición y magnitud en cada trimestre del año. La selección de la longitud de 80°W radica en que en ella se pueden encontrar los dos picos de velocidades para ambos chorros (**Poveda & Mesa,** 1999).

En cuanto a la determinación del ciclo anual de estas corrientes de chorro, se calcularon los promedios mensuales multianuales del viento zonal a 925 hPa para cada latitud en el rango entre los 5°S y los 20°N, lo cual permitió analizar la evolución de los chorros durante el año, pues sus núcleos se observan típicamente a este nivel de presión.

Antes de establecer la presencia de los eventos de El Niño Canónico y del Modoki, se hizo un análisis de componentes principales y funciones ortogonales empíricas (*Empirical Orthogonal Functions*, EOF) (**Wilks,** 2011) del campo de anomalías mensuales de la TSM para el dominio 20°S-20°N, 130°E-300°E, durante el periodo de 1981 a 2016. Las EOF se obtuvieron a partir de la matriz de correlaciones.

Para determinar la presencia de los eventos del El Niño Canónico y el Modoki, se utilizaron dos índices diferentes. Para los eventos del primero se empleó el índice Niño3, que se define como el promedio de anomalías de la TSM en el área de 150°W–90°W, 5°S–5°N. El índice Niño3.4, más comúnmente usado para determinar la presencia de dichos eventos, no se consideró, pues el área que este abarca se traslapa con las áreas de influencia del índice empleado para identificar la presencia de los eventos de El Niño Modoki, por lo que se quiso separar las regiones de mayores anomalías durante ambos tipos de evento (este del Pacífico durante eventos de El Niño Canónico y centro del Pacífico durante eventos de El Niño Modoki). Debido a que los índices previamente propuestos para determinar los eventos de El Niño Canónico no capturan el patrón anómalo de tripolo observado en la TSM del Pacífico ecuatorial durante los eventos de El Niño Modoki, **Ashok, *et al.*** (2007) han planteado un nuevo índice para describir este tipo de eventos, conocido como el índice de El Niño Modoki (*El Niño Modoki index*, EMI), el cual considera las diferencias de las temperaturas en tres regiones diferentes del océano Pacífico tropical, tal que

$$EMI = [SSTA]_A - 0.5[SSTA]_B - 0.5[SSTA]_C \quad (1)$$

donde SSTA indica las anomalías de la TSM. Las regiones están definidas de manera que la región A se encuentra entre los 165°E-140°W y los 10°S-10°N, la región B entre los 110°-70°W y los 15°S-5°N, y la región C entre los 125°-145°E y los 10°S-20°N. Para identificar la presencia de eventos de El Niño Canónico y de El Niño Modoki, es necesario remover la tendencia en las series de ambos índices. Así, el umbral de decisión para clasificar eventos de estos dos tipos se fijó en 0,7, que corresponde al valor usado por **Ashok, *et al.*** (2007**)** y **Córdoba, *et al.*** (2014). De esta manera, fue posible identificar los dos tipos de eventos de El Niño cuando los índices respectivos eran iguales o superaban este umbral.

Al establecer todos los años en que se presentaron eventos de los dos tipos de El Niño, se analizaron las diferencias en las características generales de los chorros durante su transcurso seleccionando en cada una de las series de tiempo utilizadas para describir la climatología las mismas fechas de estos eventos. De esta manera se estableció un promedio de las variables de interés durante cada tipo de evento y se calculó la diferencia con respecto a la climatología para determinar si las anomalías en las características de los chorros presentaban cambios negativos, es decir, si disminuían, o cambios positivos, o sea, aumentaban en comparación con el promedio de largo plazo.

Una parte importante del análisis de la influencia de los eventos de El Niño Canónico y del Modoki en las dos corrientes de chorro consideradas consiste en determinar qué parte de esta variabilidad se debe precisamente a estos

eventos y no a otros fenómenos atmosféricos. Para ello se calcularon los índices de los chorros según lo sugerido en la literatura. El índice del chorro del Caribe (*Caribbean low-level jet* -CLLJ- index) se obtuvo promediando las anomalías del viento zonal a 925 hPa en la región 80°W–70°W, 12,5°N–17,5°N, y multiplicando dicho promedio por -1, de modo que los picos de actividad de este chorro coincidieran con los valores positivos más altos del índice (**Wang,** 2007). Para determinar la intensidad del chorro del Chocó se consideró el promedio de las anomalías de los vientos zonales a 925 hPa en la zona delimitada por los 80°W y los 5°S–7°N (**Poveda & Mesa,** 1999). Por último, se calcularon las correlaciones entre las series de tiempo de los índices de los chorros y de los índices Niño 3 (para El Niño Canónico) y EMI (para El Niño Modoki) por trimestres y por el promedio anual. Además, se elaboraron mapas de correlaciones entre los vientos zonales a 925 hPa y los índices Niño 3 y EMI, estableciendo la significación estadística de las correlaciones mediante la prueba t de Student en un nivel del 5 %. Para eliminar la influencia de las tendencias en las correlaciones, antes de calcularlas se removieron las tendencias lineales de las series.

Resultados y análisis

Detección de los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki. *Análisis de componentes principales de la TSM.* La figura 1 muestra los dos primeros modos de variabilidad de las anomalías de la TSM en el Pacífico tropical, representados por sus dos primeras EOF, los cuales explican más de la tercera parte de la variabilidad registrada en el periodo en los registros utilizados para este análisis (1981–2016). El modo de mayor aporte representó aproximadamente el 27 % de la variabilidad y en él se evidencia el patrón espacial correspondiente a un evento de El Niño Canónico (Figura 1a), con valores positivos a lo largo del ecuador desde la lengua fría del Pacífico y hacia el centro y el oeste del océano. En la evolución temporal de este modo de variabilidad se observaron distintos picos que coincidían con eventos de El Niño Canónico de gran magnitud, como los de 1998 y 2015. El segundo modo principal (Figura 1b) contribuyó con cerca del 11 % de la variabilidad y representa el patrón espacial típico de los eventos de El Niño Modoki, con valores positivos en el centro del Pacífico tropical localizados hacia el oeste del Pacífico, flanqueados por valores negativos en

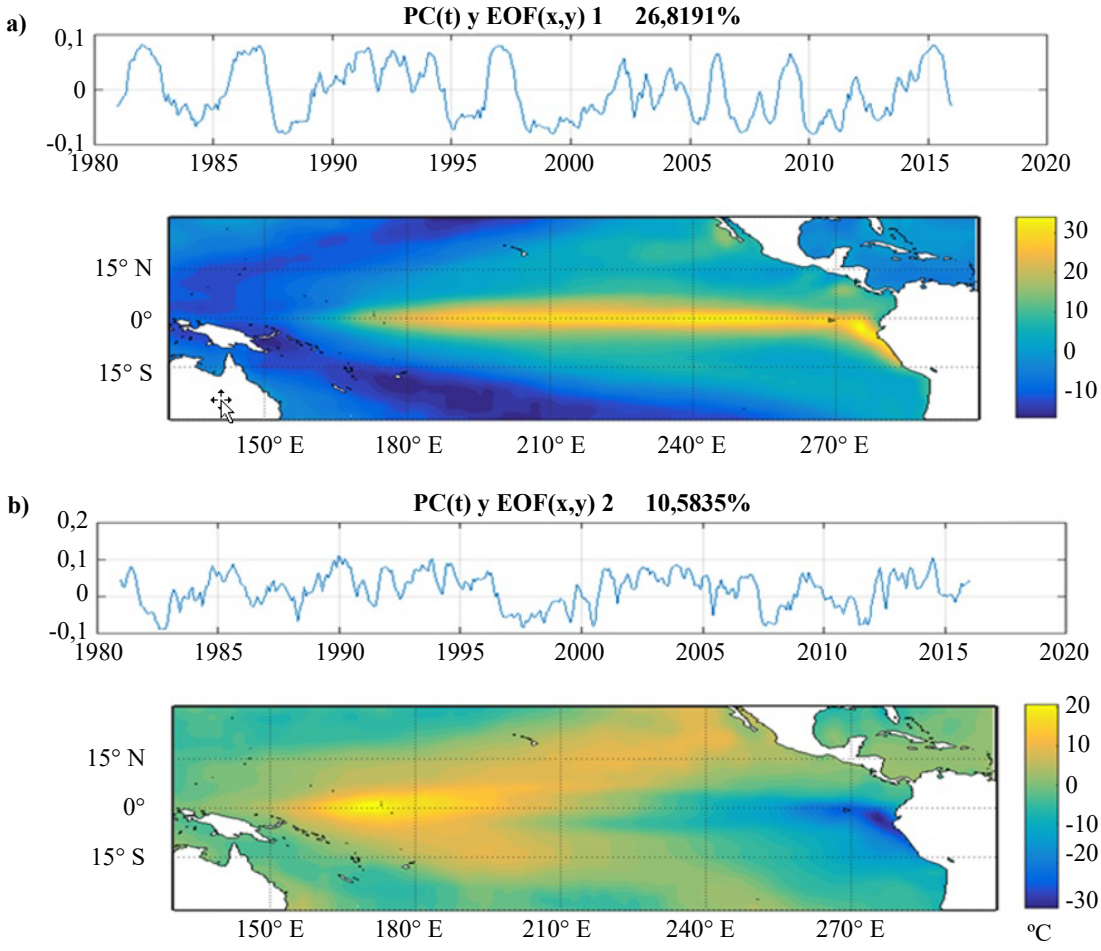


Figura 1. a) Primer modo de variabilidad de anomalías de la TSM en el Pacífico tropical (evento de El Niño Canónico). **b)** Segundo modo de variabilidad de anomalías de la TSM en el Pacífico tropical (evento de El Niño Modoki)

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

el este, cerca de las costas de Suramérica, así como en el extremo oeste. El componente principal correspondiente a este segundo modo de variabilidad evidenció una mayor cantidad de picos en comparación con los del componente principal asociado a eventos de El Niño Canónico (Figura 1a), lo que sugiere una mayor presencia de eventos de El Niño Modoki que del Canónico durante el periodo de registro. Hubo tres modos de variabilidad que aportaron el 6, 4 y 3 % del total de la varianza, respectivamente (no se muestran). Es importante aclarar que los resultados de este análisis de componentes principales pueden variar dependiendo de la base de datos que se utilice, del procesamiento previo de los datos, del procedimiento seguido para hallar los resultados y del área seleccionada para el análisis. Estos factores afectan, principalmente, el porcentaje de variabilidad explicado en cada modo, pero el patrón espacial en los dos primeros (eventos de El Niño Canónico y de El Niño Modoki, respectivamente) sigue siendo el mismo. Lo anterior se ha demostrado en otros estudios con técnicas similares a las empleadas en este trabajo, aunque los porcentajes de varianza explicada difieren entre un estudio y otro (**Ashok, *et al.,*** 2007; **Kao & Yu,** 2009; **Deser, *et al*.,** 2010; **Lian & Chen,** 2012).

Presencia de los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki. La presencia de estos eventos se detectó utilizando los índices Niño3 y EMI, respectivamente, y considerando un umbral de 0,7. Los trimestres seleccionados para cada uno de estos eventos se clasificaron según se presenta en las tablas 1 y 2. Se seleccionaron 27 trimestres con el índice Niño 3 (eventos de El Niño Canónico), correspondientes a siete inviernos, seis primaveras, siete veranos y siete otoños boreales en el periodo de diciembre de 1981 a agosto de 2016. Los eventos de El Niño Modoki se produjeron en un número mayor de trimestres, con 41 eventos en total, correspondientes a 12 inviernos, seis primaveras, diez veranos y 14 otoños boreales. Se detectó una

Tabla 1. Trimestres en los que se presentaron eventos de El Niño Canónico

Trimestres			
Diciembre, enero, febrero	**Marzo, abril, mayo**	**Junio, julio, agosto**	**Septiembre, octubre, noviembre**
1982/83	1983	1982	1982
1986/87	1987	1983	1987
1991/92	1992	1987	1997
1997/98	1993	1991	2002
2006/7	1998	1997	2006
2009/10	2016	2009	2009
2015/16		2015	2015

Tabla 2. Trimestres en los que se presentaron eventos de El Niño Modoki

TRIMESTRES ENM			
Diciembre, enero, febrero	**Marzo, abril, mayo**	**Junio, julio, agosto**	**Septiembre, octubre, noviembre**
1986/87	1991	1982	1982
1990/91	1993	1987	1986
1991/92	1995	1990	1987
1992/93	2007	1991	1990
1993/94	2015	1992	1991
1994/95	2016	1993	1993
2001/2002		1994	1994
2002/2003		2002	2002
2004/2005		2004	2004
2009/2010		2015	2006
2014/2015			2009
2015/2016			2012
			2014
			2015

mayor presencia de eventos de El Niño Modoki durante las estaciones de otoño e invierno boreales. En general, estos eventos sucedieron con mayor frecuencia en el Pacífico tropical durante el periodo de análisis. En comparación con otros estudios en los que también se determinó la presencia de estos dos eventos (**Tedeschi, *et al*.,** 2013; **Córdoba, *et al*.,** 2014), se encontró una coincidencia casi total en cuanto a los trimestres seleccionados, con algunas diferencias atribuibles al uso de distintas bases de datos.

En la figura 1S, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/705/3142 se presentan las series de tiempo de los índices Niño3 y EMI, indicando el umbral de 0,7 para establecer la presencia de eventos de El Niño Canónico y del Modoki, respectivamente. En la serie de tiempo del índice Niño3, se observan tres picos de magnitud importante que están relacionados con la fase positiva del ENOS, los cuales ocurrieron en los años de 1983, 1998 y 2015, siendo el evento de El Niño Canónico de 1998 el de mayor magnitud durante el periodo de 1981 a 2016. En la serie de tiempo en la que se aplicó el índice EMI, no se presentaron picos de una magnitud comparable a los del Niño3, pero sí se cruzó el umbral en más ocasiones, lo que indica una mayor presencia de este tipo de eventos. Los eventos de este tipo con mayor intensidad ocurrieron durante la fase negativa, es decir, La Niña Modoki. Algunos eventos de El Niño Modoki de magnitud considerable se produjeron en los años de 1992, 1995, 2004 y 2010.

Climatología de las corrientes superficiales de chorro. *Vientos a 925 hPa.* La figura 2 presenta la climatología trimestral de vientos horizontales a 925 hPa en el norte de Suramérica durante el periodo comprendido entre enero de 1979 y agosto de 2016. La distribución espacial de los vientos asociados al CLLJ evidenció un ciclo anual con una primera temporada de fortalecimiento durante el trimestre de diciembre-enero-febrero y velocidades entre 14 m/s y 16 m/s (Figura 2a); durante marzo-abril-mayo se presentaba

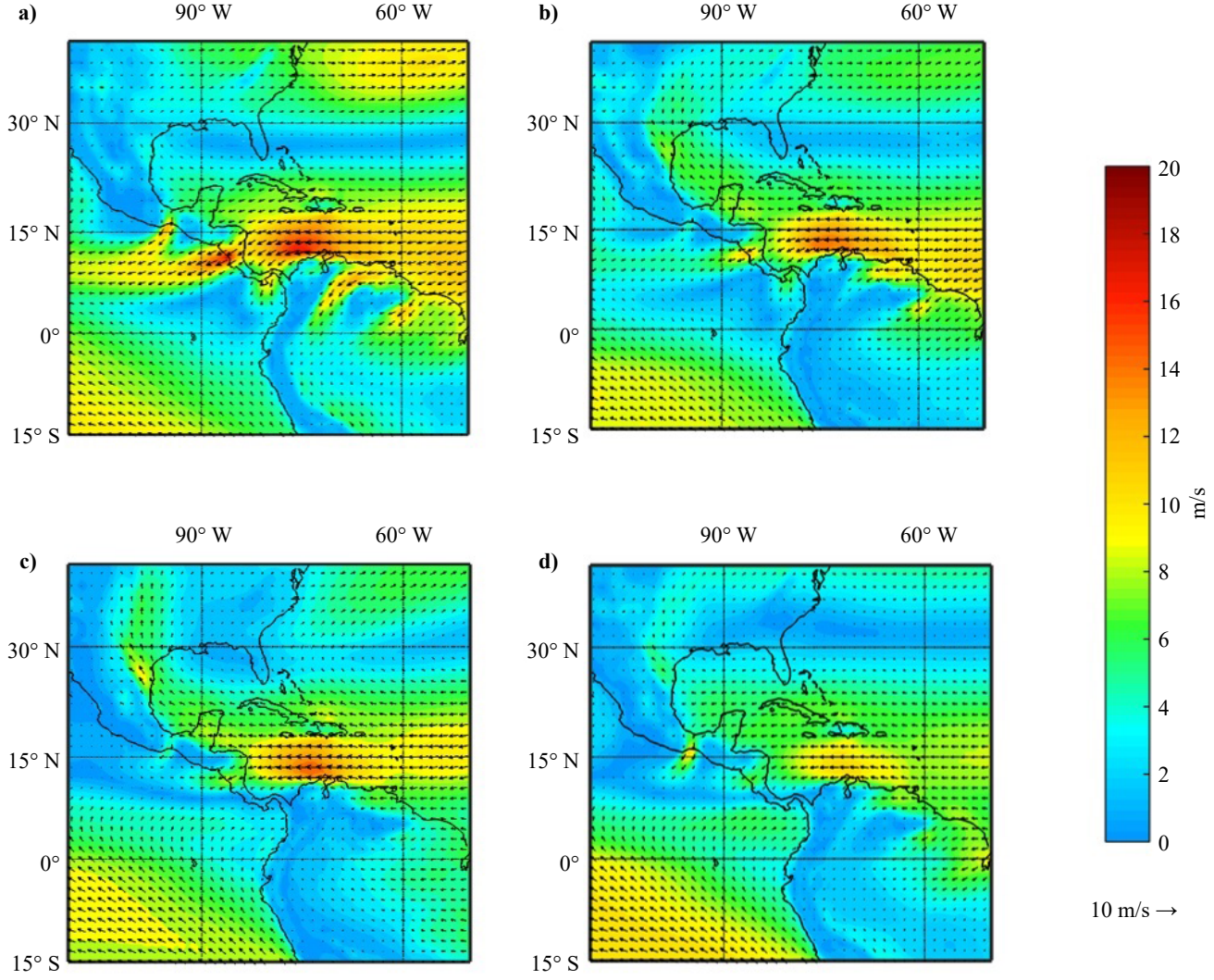


Figura 2. Climatología de los vientos a 925 hPa durante el periodo 1979 – 2016 para los trimestres de **a)** diciembre-enero-febrero, **b)** marzo-abril-mayo, **c)** junio-julio-agosto y **d)** septiembre-octubre-noviembre

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

un debilitamiento de estos vientos (Figura 2b), que volvían a fortalecerse durante junio-julio-agosto, alcanzando velocidades entre 12 m/s y 14 m/s (Figura 2c), y, por último, las menores intensidades del CLLJ se observaron en septiembre-octubre-noviembre, con velocidades de 8 m/s a 10 m/s (Figura 2d). Además, durante la temporada der junio-julio-agosto se observó una bifurcación del CLLJ, al conformarse la corriente de chorro de las Grandes Planicies (*Great Plains low-level jet*, GPLLJ) (**Cook & Vizy,** 2010).

Para el chorro del Chocó, solo se detectó un pico anual en las velocidades, el cual alcanzó valores entre 5 m/s y 7 m/s durante el trimestre de septiembre-octubre-noviembre; las velocidades más bajas se observaron durante los trimestres de diciembre-enero-febrero (Figura 2a) y marzo-abril-mayo (Figura 2b), con magnitudes no superiores a 3 m/s. En general, las velocidades en el CLLJ fueron mayores que en el chorro del Chocó en todas las estaciones del año. Además, en el CLLJ se evidenció un claro ciclo bimodal, en tanto que en el chorro del Chocó fue unimodal.

Corte vertical de viento zonal en los 80°W. La figura 3 muestra un corte vertical de vientos zonales en los 80°W para cada trimestre del año. Alrededor de los 15°N, con vientos entre los 950 y 700 hPa, se puede ver el perfil del CLLJ, caracterizado por valores negativos de velocidad zonal durante todo el año. Por su parte, el perfil del chorro del Chocó se distingue cerca de los 5°N, con vientos entre 1.000 y 900 hPa, caracterizado por valores positivos de velocidad zonal, principalmente para el trimestre de septiembre a noviembre. En la región que representa el núcleo del CLLJ se pueden observar los dos picos de velocidades descritos con los vientos a 925 hPa durante los trimestres de diciembre-enero-febrero (Figura 3a) y junio-julio-agosto (Figura 3c), siendo de mayor magnitud durante este último, lo que produjo que dicho núcleo se expandiera a capas más altas de la atmósfera en este trimestre que en los otros, en los cuales no pasó de los 800 hPa. El núcleo del CLLJ estuvo presente a lo largo del año alrededor de los 15°N.

En el extremo sur se puede reconocer el perfil que representa el chorro del Chocó, con su respectivo ciclo anual con un solo pico de velocidades de vientos zonales durante el trimestre de septiembre-octubre-noviembre. A medida que este chorro se fortalece, su núcleo se desplaza hacia el norte y a la vez se expande latitudinalmente, abarcando regiones que van aproximadamente desde los 5°S hasta los 10°N durante el trimestre de mayores velocidades. Por el contrario, durante el trimestre de menores velocidades (marzo-abril-mayo), este chorro solo llega a abarcar latitudes desde los 5°S hasta los 5°N. En cuanto a la altura del chorro del Chocó, en ningún momento del año alcanza a influenciar las capas por encima de los 800 hPa.

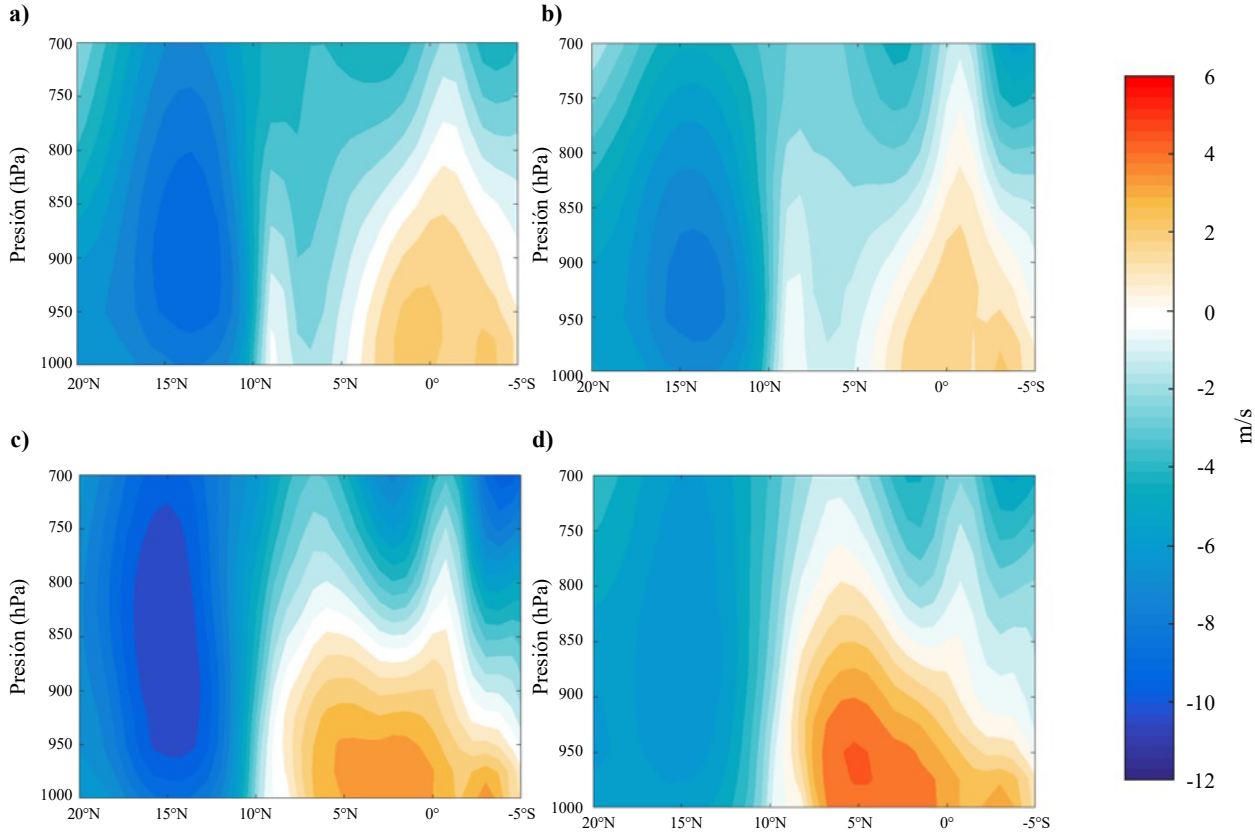


Figura 3. Climatología de corte vertical de los vientos zonales en los 80°W durante el periodo 1979 – 2016 para los trimestres de **a)** diciembre-enero-febrero, **b)** marzo-abril-mayo, **c)** junio-julio-agosto y **d)** septiembre-octubre-noviembre

Por otra parte, un análisis del transporte de humedad integrado en la vertical (no se muestra), indicó que el flujo de humedad asociado con estas corrientes fue directamente proporcional a la velocidad del viento zonal, aunque los núcleos de mayor transporte estuvieron más cerca de la superficie.

Ciclo anual de viento zonal en los 80°W y a 925 hPa. En la figura 4 se presenta el ciclo anual de los vientos zonales en los 80°W y a 925 hPa. Se puede observar, desde otra perspectiva, la evolución de la velocidad y la posición de los chorros a lo largo del año. En esta visualización se aprecian, de una forma más detallada, los cambios en la magnitud y la posición del núcleo de cada uno de los chorros. En este ciclo anual se comprobó cómo el CLLJ desarrolló dos fases de velocidades máximas a lo largo del año: específicamente durante el mes de julio se observaron velocidades superiores a los 10 m/s, en tanto que se observó un pico menor en enero. El núcleo del CLLJ no sufrió cambios notables en su posición: durante la época de mayor velocidad (julio) se posicionó en los 15°N, en tanto que en enero estuvo un poco más al sur, alrededor de los 14°N. Con el chorro del Chocó sucedió también lo descrito para los perfiles verticales y la distribución horizontal de los vientos a 925 hPa, con único pico de velocidad específicamente en el mes de octubre y una posición desplazada hacia el norte que abarcó un rango de latitudes más amplio al exhibir mayor intensidad.

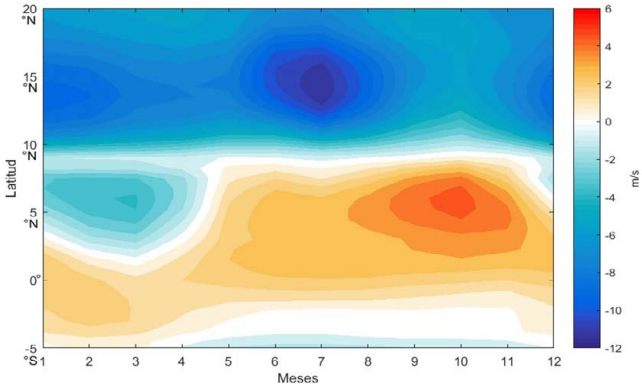


Figura 4. Climatología del ciclo anual de los vientos zonales a 925 hPa en una longitud de 80°W para el periodo 1979 – 2016

Cambios en las corrientes de chorro durante los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki. *Vientos a 925 hPa.* La figura 5 muestra las anomalías del viento zonal a 925 hPa en el norte de Suramérica y el Caribe en los cuatro trimestres del año durante los eventos de El Niño Canónico (Figuras 5a - 5d) y El Niño Modoki (Figuras 5e - 5h). En general, las anomalías en las velocidades del CLLJ fueron mayores durante los eventos de El Niño Canónico. En cuanto al chorro del Chocó, también se observó una mayor variación en sus anomalías durante los eventos de este tipo. El trimestre de diciembre-enero-febrero, en particular, se caracterizó por un fortalecimiento de esta corriente durante ambos eventos de El Niño, en tanto que en el trimestre de marzo-abril-mayo su velocidad disminuyó durante los eventos de El Niño Modoki, pero se fortaleció levemente en los eventos de El Niño Canónico. Durante los trimestres de junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre se observó un debilitamiento de esta corriente durante ambos tipos de eventos, siendo mayores las anomalías asociadas con El Niño Canónico.

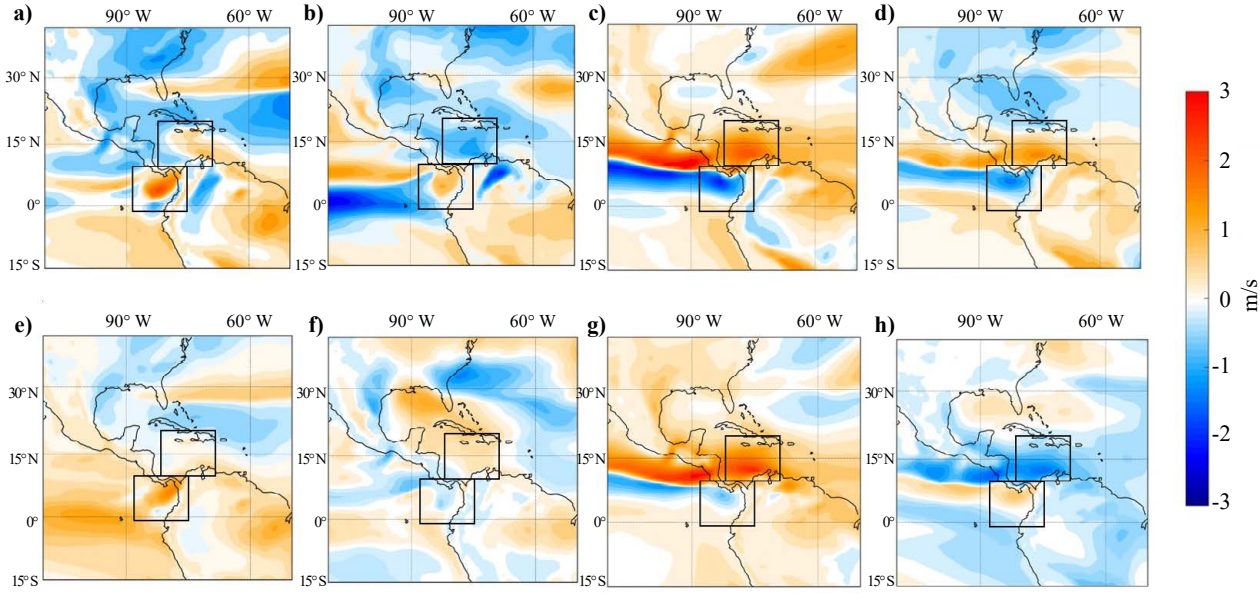


Figura 5. Anomalías de vientos horizontales a 925 hPa durante los eventos de El Niño Canónico en los trimestres de: **a)** diciembre-enero-febrero, **b)** marzo-abril-mayo, **c)** junio-julio-agosto y **d)** septiembre-octubre-noviembre. Anomalías de vientos horizontales a 925 hPa durante los eventos de El Niño Modoki en los trimestres de: **e)** diciembre-enero-febrero, **f)** marzo-abril-mayo, **g)** junio-julio-agosto y **h)** septiembre-octubre-noviembre. Los recuadros muestran las regiones de aparición de los chorros del Caribe (norte) y el Chocó (sur).

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

Corte vertical del viento zonal en los 80°W. La figura 6 muestra las anomalías en los perfiles verticales del viento zonal en los 80°W durante los eventos de El Niño Canónico (Figuras 6ª - 6d) y El Niño Modoki (Figuras 6e - 6f). Las anomalías negativas observadas en la región de influencia del CLLJ (alrededor de los 15°N) indican un fortalecimiento de esta corriente, mientras que los valores positivos en esta región sugieren un debilitamiento. En el chorro del Chocó (que ocurre en latitudes más al sur, entre los 5°S y los 7°N), las anomalías positivas indican un fortalecimiento de este chorro mientras que las negativas indican su debilitamiento. Durante diciembre-enero-febrero (Figura 6a), el componente zonal del CLLJ se debilitó en los eventos de El Niño Canónico; por su parte, durante los eventos de El Niño Modoki se observó un debilitamiento más leve de esta corriente, con algunos sectores de fortalecimiento hacia el norte y de debilitamiento hacia el sur.

En general, se identificó que el chorro del Chocó se debilitó en diciembre-enero-febrero y en marzo-abril-mayo durante El Niño Canónico, en tanto que durante El Niño Modoki se observaron diferencias de pequeña magnitud, con un leve debilitamiento alrededor de los 5°N en diciembre-enero-febrero y un fortalecimiento en marzo-abril-mayo. En la segunda mitad del año (junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre), se observó un debilitamiento del chorro del Chocó durante los dos tipos de eventos de El Niño, siendo de mayor magnitud el impacto del Canónico. Estos resultados coinciden con lo observado en la distribución espacial de los vientos durante ambos tipos de eventos El Niño (Figura 5).

Ciclo anual del viento zonal en los 80°W y a 925 hPa. La figura 2S, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/705/3143, muestra el ciclo anual de anomalías de la velocidad del viento zonal en los 80°W y a 925 hPa durante los eventos de El Niño Canónico (Figura 2Sa) y El Niño Modoki (Figura 2Sb). Para los eventos de El Niño Canónico se observó que el CLLJ se debilitaba entre enero y mayo, en tanto que desde junio hasta diciembre se fortalecía. Por su parte, el chorro del Chocó se debilitaba a lo largo de los 12 meses del año durante los eventos de El Niño Canónico. Debido a que estas figuras solo muestran el nivel de los 925 hPa, que es donde se encuentra el núcleo de ambos chorros, no se observan los debilitamientos en las capas superiores del chorro del Chocó identificados en su estructura vertical (Figura 3).

En los eventos El Niño Modoki se observó un debilitamiento del CLLJ en enero y febrero; el resto del año, este chorro se fortalecía, presentando los mayores cambios durante junio y agosto. En contraste, el núcleo del chorro del Chocó se debilitaba en los dos primeros meses del año, se fortalecía entre marzo y abril, y se debilitaba nuevamente en el resto del año.

Análisis de correlaciones. Para profundizar en la posible relación entre los dos tipos de eventos de El Niño y las circulaciones del chorro en estudio, se elaboraron mapas de correlación entre la componente zonal del viento a 925 hPa y los índices EMI (Figuras 7a - 7d) y Niño 3 (Figuras 7e - 7h). La significación estadística de la correlación se determinó mediante una prueba t de Student de dos colas con un nivel de confianza de 95 %. Así, cuando los coeficientes de correlación no superaron el umbral indicado por la prueba, se consideró que no representaban adecuadamente la relación entre ambas variables y se les asignó un valor de 0.

Los resultados obtenidos indican que ambos tipos de eventos de El Niño se asociaron con un fortalecimiento del CLLJ durante diciembre-enero-febrero, y con un debilitamiento durante junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre, principalmente durante El Niño Canónico. Esto

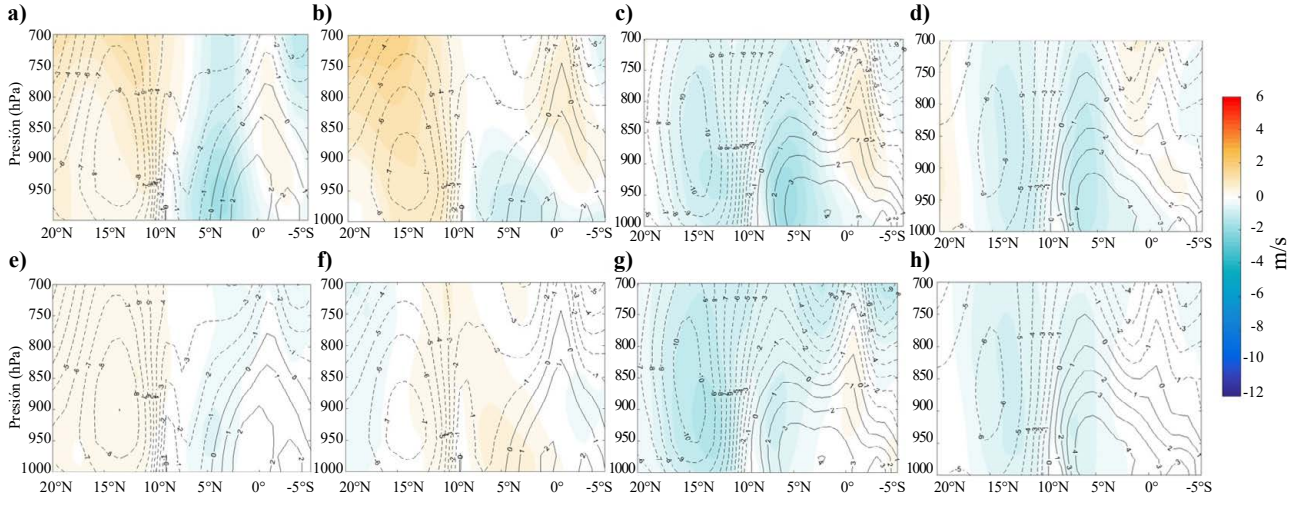


Figura 6. Anomalías de corte vertical de los vientos zonales en los 80°W durante los eventos de El Niño Canónico en los trimestres de: **a)** diciembre-enero-febrero, **b)** marzo-abril-mayo, **c)** junio-julio-agosto y **d)** septiembre-octubre-noviembre. Anomalías de corte vertical de los vientos zonales en los 80°W durante los eventos de El Niño Modoki en los trimestres de: **e)** diciembre-enero-febrero, **f)** marzo-abril-mayo, **g)** junio-julio-agosto y **h)** septiembre-octubre-noviembre. La climatología se presenta en contornos.

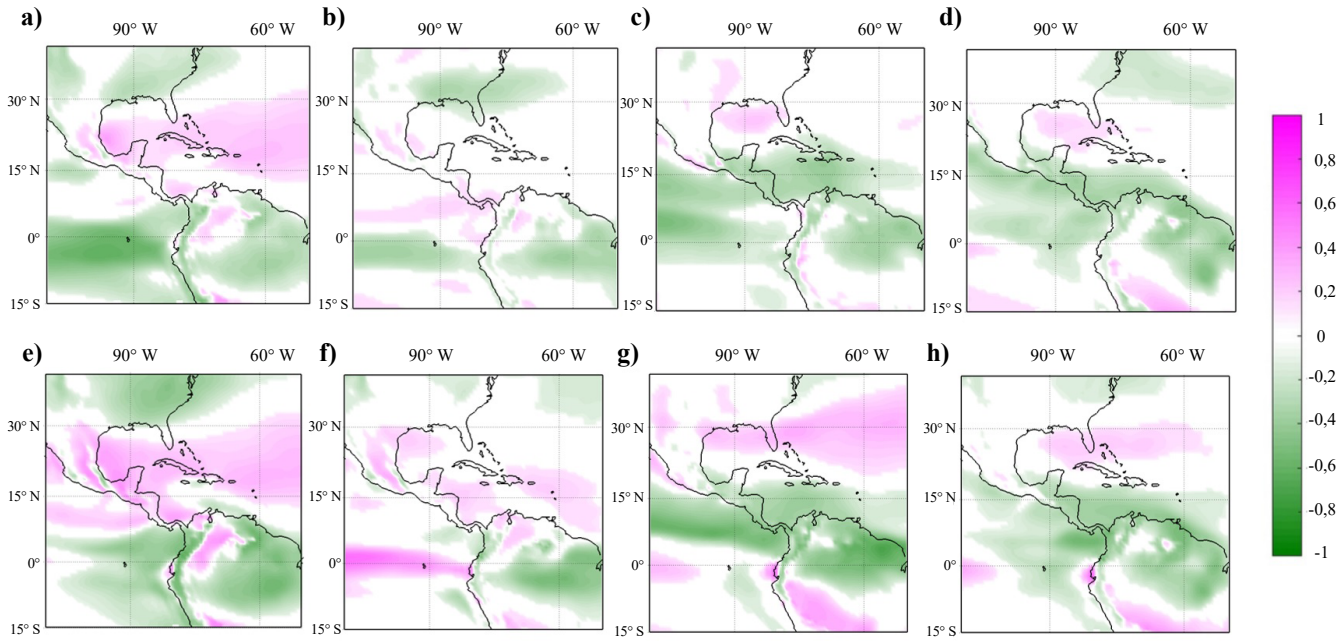


Figura 7. Mapas de correlación entre el componente zonal del viento a 925 hPa y el índice EMI en los trimestres de: **a)** diciembre-enero-febrero, **b)** marzo-abril-mayo, **c)** junio-julio-agosto y **d)** septiembre-octubre-noviembre. Mapas de correlación entre el componente zonal del viento a 925 hPa y el índice Niño 3 en los trimestres de: **e)** diciembre-enero-febrero, **f)** marzo-abril-mayo, **g)** junio-julio-agosto y **h)** septiembre-octubre-noviembre. Las correlaciones presentadas en los mapas fueron estadísticamente significativas según una prueba t de Student con un nivel de significación del 5 %.

coincide con lo reportado en estudios anteriores sobre cómo los campos de la TSM y la presión a nivel del mar presentan un comportamiento opuesto durante el invierno y el verano boreal en la fase positiva del fenómeno ENOS (**Wang**, 2007). Por su parte, el chorro del Chocó se ve debilitado durante estos eventos, excepto en el trimestre de marzo-abril-mayo, cuando se observa su fortalecimiento durante los eventos de El Niño Modoki. Estos resultados concuerdan con lo observado en la distribución espacial y vertical de estas corrientes (Figuras 5 y 6).

En general, nuestros resultados identificaron que los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki generaron impactos similares en las corrientes de chorro analizadas durante la mayoría de los trimestres, exceptuando el de marzo-abril-mayo, en el que se observaron impactos opuestos de los dos tipos de eventos. Sin embargo, durante los eventos de El Niño canónico se presentaron impactos de mayor magnitud en estas corrientes que durante los eventos de El Niño Modoki. El mayor impacto en estas corrientes de chorro durante El Niño Canónico puede radicar en que durante estos eventos los gradientes de temperatura y presión entre el este del Pacífico tropical y el occidente colombiano se reducen más en comparación con los observados durante El Niño Modoki, debido a un calentamiento más pronunciado en el este del Pacífico durante El Niño Canónico. Este gradiente es particularmente importante en la dinámica del chorro del Chocó (**Poveda & Mesa,** 1999; **Sierra, *et al.*,** 2018).

Lo anterior es de particular importancia en el pronóstico hidrometeorológico en Colombia, pues el tipo de calentamiento que se genera en el océano Pacífico tropical, como es el típico durante los eventos de El Niño Canónico (concentrado en el este) o durante los de El Niño Modoki (concentrado en el centro), influye en la intensidad que pueden tener las corrientes de chorro del Chocó y el Caribe, y a su vez, el transporte de humedad atmosférica desde los océanos Pacífico y Atlántico asociados con estas corrientes.

Conclusiones

En estudios anteriores se ha determinado que las corrientes de chorro de bajo nivel del Chocó y el Caribe son mecanismos importantes para el transporte de humedad y la generación de precipitación en el norte de Suramérica, y contribuyen a la advección de vapor de agua y calor hacia esta región, lo que los convierte en importantes modeladores del clima local (**Poveda & Mesa, 1999; Arias, *et al.*,** 2015; **Hoyos, *et al.*,** 2018). El chorro del Chocó sigue una trayectoria paralela a la costa oeste de Suramérica y al cruzar el ecuador se recurva, penetrando en las costas colombianas. Por su parte, el CLLJ circula desde el océano Atlántico tropical y llega al mar Caribe donde se divide en dos ramas en el verano boreal, una que cruza el Golfo de Yucatán y se une al GPLLJ en Estados Unidos, y otra que cruza Centroamérica y se une al chorro del Chocó. Cada uno de estos chorros posee diferentes regímenes de velocidad. El chorro del Chocó posee un ciclo anual con

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):410-421, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.705

picos en el trimestre de septiembre-octubre-noviembre, con un núcleo de velocidades que se desplaza hacia el norte a medida y se fortalece durante el verano y el otoño boreales. Por su parte, el CLLJ tiene un ciclo semianual, con picos en diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto, y su núcleo está ubicado a los 15°N sin presentar migraciones latitudinales significativas durante el año, como lo hace el chorro del Chocó.

En diversos estudios se ha establecido la relevancia del fenómeno de ENOS en la variabilidad interanual de la hidroclimatología del norte de Suramérica y el Caribe. Específicamente, se ha determinado que los eventos de El Niño se asocian a la reducción de la precipitación y los caudales en Colombia, en tanto que La Niña genera lo opuesto. Cada vez hay más investigación sobre los efectos que tienen las diversas formas de calentamiento o enfriamiento del Pacífico tropical asociadas con el ENOS. En este sentido, se ha encontrado que el calentamiento del océano Pacífico tropical observado durante los eventos de El Niño no siempre se localiza en la región este del océano (lo que se ha denominado El Niño Canónico), sino que, en algunos eventos, puede presentarse concentrado en el centro de este océano y con menor intensidad (lo que se ha denominado El Niño Modoki). Nuestro análisis de componentes principales permitió establecer los dos principales modos de variabilidad del campo de anomalías de la TSM en el Pacífico tropical, y evidenció que su primer modo de variabilidad se asocia con eventos de El Niño Canónico (caracterizados por un calentamiento pronunciado en el este del Pacífico tropical), lo que explicó el 26,8 % de la variabilidad de este campo espacial, en tanto que el segundo modo se asoció a eventos de El Niño Modoki, los cuales dieron cuenta de 10,58 % de la varianza. Además, se pudo determinar que estos últimos fueron más frecuentes que los de El Niño Canónico durante el periodo considerado en este estudio (1981-2016), presentándose principalmente en los trimestres de diciembre-enero-febrero y septiembre-octubre-noviembre, es decir, el invierno y el otoño boreales, respectivamente.

Como forma de determinar los posibles impactos de estos dos eventos en el clima de Colombia, en este estudio se profundizó en su influencia sobre las corrientes de chorro del Chocó y el Caribe. Los resultados sugieren que los dos eventos generaron impactos similares en las corrientes de chorro analizadas durante la mayoría de los trimestres. En este sentido, ambos tipos de eventos se asociaron con un fortalecimiento del CLLJ durante diciembre-enero-febrero y marzo-abril-mayo, y con un debilitamiento durante junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre, principalmente durante El Niño Canónico. Por su parte, el chorro del Chocó se vio debilitado durante estos eventos, excepto en el trimestre de marzo-abril-mayo, cuando se observó su fortalecimiento durante los eventos de El Niño Modoki.

En otros estudios se ha señalado que las anomalías en estas corrientes de chorro pueden estar relacionadas con anomalías en la precipitación en Colombia. Un ejemplo de ello lo constituye lo ocurrido en el país entre 2010 y 2012, cuando un evento de La Niña de gran magnitud generó dos de las temporadas lluviosas más fuertes de los últimos años (**Hoyos, *et al*.,** 2013). El enfriamiento generalizado del océano Pacífico tropical, sumado al calentamiento inusual del mar Caribe ocurrido durante este período, generó un fortalecimiento del chorro del Chocó y un debilitamiento del CLLJ, lo que permitió el transporte de mayores cantidades de vapor de agua hacia Colombia y el incremento generalizado de precipitación en todo el país (**Arias, *et al.,*** 2015). Esto concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación: durante los eventos de El Niño canónico se observó un debilitamiento del chorro del Chocó, principalmente en junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre, lo que se asoció con un menor transporte de humedad desde el océano Pacífico (**Arias, *et al.,*** 2015), contribuyendo a la reducción de la precipitación observada durante estos eventos en Colombia.

Esta investigación aporta nuevos elementos sobre la influencia del fenómeno ENOS en Colombia, profundizando en la importancia que tiene el patrón de calentamiento o enfriamiento del Pacífico tropical en la variabilidad interanual de la hidroclimatología del país. Nuestro aporte radica, especialmente, en que se pudo establecer que el comportamiento de las corrientes de chorro del Caribe y el Chocó, factores importantes en la determinación de los patrones de precipitación en Colombia, se ven modificados según la presencia de los eventos de El Niño Canónico y El Niño Modoki. Esto es fundamental en lo que a pronóstico de precipitación y caudales se refiere, pues la respuesta de la precipitación (y de los mecanismos asociados con ella, como las corrientes de chorro) exhibe una mayor variación durante los eventos canónicos de El Niño, en tanto que los eventos Modoki ejercen una influencia más atenuada. Lo anterior es importante para generar estrategias de adaptación y mitigación frente a las temporadas lluviosas o secas anómalas que se puedan presentar durante dichos eventos.

Información suplementaria

Figura 1S. Series de tiempo de los índices Niño3 y EMI durante el periodo 1980-2016. Vea la figura 1S en: https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/705/3142

Figura 2S. Ciclo anual de anomalías (colores) y climatología (contornos) de los vientos zonales en los 80°W y a 925 hPa durante los eventos de: **a)** El Niño Canónico y **b)** El Niño Modoki. Vea la figura 2S en: https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/705/3143

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la convocatoria CODI para Trabajos de Grado 2016/1 de la Universidad de Antioquia.

Contribución de los autores

Lina M. Serna procesó la información y realizó los análisis aquí presentados; Paola A. Arias y Sara C. Vieira diseñaron y dirigieron la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no presentar conflicto de intereses para este trabajo.

Referencias

Amador, J. (2008). The Intra-Americas Sea Low-level Jet Overview and Future Research. Trends and Directions in Climate Research: Ann. N.Y. Acad. Sci. **1146:** 153-188.

Arias, P. A, Martínez, J. A., Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010-2012 anomalous wet season in northern South America. Climate Dynamics. **45:** 2861-2884.

Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection, J. Geophys. Res. **112:** 1-27. Disponible en: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2006JC003798

Cook, K. H. & Vizy, E. K. (2010). Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation. J. Climate. **23:** 1477-1494.

Córdoba, S., Palomino, R., Gámiz, S., Castro, Y., Esteban, R. (2014). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. Global and Planetary Change. **124:** 41-61.

Córdoba, S., Palomino, R., Gámiz, S., Castro, Y., Esteban, R. (2015). Influence of tropical Pacific TSM on seasonal precipitation in Colombia: Prediction using El Niño and El Niño Modoki. Clim Dyn. **44:** 1293-1310.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Soc. **137:** 553-597.

Deser, C., Alexander, M., Xie, S., Phillips, A. (2010). Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. Annu. Rev. Mar. Sci. **2:** 115-143.

Durán Quesada, A. M., Gimeno, L., Amador, J. (2017). Role of moisture transport for Central American precipitation. Earth System Dynamics. **8:** 147-161.

Hoyos, I., F. Dominguez, J. Cañón-Barriga, J.A. Martínez, R. Nieto, L. Gimeno, and P. A. Dirmeyer (2018). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. Clim. Dyn. **50** (3-4): 971-990. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3653-6

Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. Applied Geography. **39:** 16-25.

Kao, H. & Yu, J. (2009). Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. J. Climate. **22:** 615-632.

Lian, T. & Chen, D. (2012). An Evaluation of Rotated EOF Analysis and Its Application to Tropical Pacific TSM Variability. J. Climate. **25:** 5361-5373.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **28:** 201-222.

Poveda, G. & Mesa, O. (1999). La corriente de Chorro Superficial del Oeste ("del Chocó") y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **23:** 517-528.

Poveda, G., Jaramillo, L., Vallejo, L.F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers, Water Resour. Res. **50:** 98-118.

Prabha TV, Goswami BN, Murthy BS, Kulkarni JR. (2011). Nocturnal low-level jet and atmospheric streams over the rain shadow region of Indian Western Ghats. Q. J. R. Meteorol. Soc. **137:** 1273-1287. Doi:10.1002/qj.818

Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., Poveda, G. (2012). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. Advances in Meteorology, **2011:** 1-11.

Sierra, J. P., Arias, P. A., Vieira, S. C., Agudelo, J. (2018). How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia? Climate Dynamics. **51** (5-6): 2247-2265.

Stensrud, D. (1996). Importance of Low-Level Jets to Climate: A Review. J.Climate. **9:** 1698-1709.

Tedeschi, R., Cavalcanti, I., Grimm, A. (2013). Influences of two types of ENSO on South American precipitation. Int. J. Climatol. Geophys. Res. Lett. **33:** 1382-1400.

Tedeschi, R. Grimm, A., Cavalcanti, I. (2016). Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral Autumn and Winter. Int. J. Climatol. **36:** 4797-4814

Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. Clim. Dyn. **29:** 411-422.

Wilks, D. (2011). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press. eBook ISBN: 9780123850232. p. 704.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):422-438, octubre-diciembre de 2018
doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

Artículo original

Ciencias de la Tierra

Evidencias macromorfológicas y micromorfológicas de paleosuelos en el desierto de La Tatacoa y su variación sincrónica

María Teresa Flórez-Molina[1,*], Luis Norberto Parra-Sánchez[1], Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo[2], José María Jaramillo-Mejía[3]

[1] Facultad de Ingenieria, Departamento de Materiales, Grupo GAIA, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
[2] Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
[3] Gmas, Bogotá, D. C., Colombia

Resumen

Se estudiaron los conjuntos de capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, con el fin de comprobar la presencia de paleosuelos en ellas y de establecer sus propiedades y variabilidad espacial, así como las condiciones ambientales bajo las cuales se formaron. Se comprobó la existencia de paleosuelos alcalinos en las capas rojas inferiores y en las ferruginosas con las siguientes características: horizontes iluviales Bt de color rojo, con estructura en bloques angulares, bajo contenido de materia orgánica, cútanes y espejos de falla (*slickensides*), que mostraban translocación de óxidos de hierro y manganeso y de carbonatos de calcio. Además, se observó una gran variabilidad espacial en el espesor y la posición de los paleosuelos con respecto a los lechos líticos.

Los procesos pedogenéticos responsables de la evolución de los paleosuelos fueron la iluviación y la lixiviación de arcilla, la mineralización de la materia orgánica, la solodización, la rubefacción, la fersialitización, la carbonatación, el adensamiento y la erosión hídrica. Estos procesos indican que la pedogénesis se llevó a cabo en un clima estacional contrastado en humedad, con una época muy seca seguida de otra muy lluviosa.

La presencia de paleosuelos intercalados con capas líticas de granulometría variable sin pedogénesis implica que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto.

Se concluyó que la liberación de hierro a partir de los minerales primarios y su difusión dentro de la matriz del material geológico, con su posterior oxidación, fue el mecanismo responsable del color dominante tanto de las capas rojas como de los paleosuelos del desierto de La Tatacoa. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Paleosuelos; Variación sincrónica; Pedogenesis; Macro y micromorfología; Capas rojas inferiores; Capas ferruginosas; Desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

Macromorphological and micromorphological evidence of the paleosols of La Tatacoa desert and its synchronic variation

Abstract

We studied the red layer assemblages of La Tatacoa desert in Huila, Colombia, in order to verify the presence of paleosols and to establish their properties and spatial variability, as well as the environmental conditions under which they were formed. We found alkaline paleosols in the lower red layers and in the ferruginous ones that had the following characteristics: illuvial horizons Bt of red color, with a structure in angular blocks, low content of organic matter, cutans and slickensides that showed translocation of iron and manganese oxides and calcium carbonates. In addition, there was a strong spatial variability in the thickness and the position of the paleosols with respect to the lithic beds.

The pedogenetic processes responsible for the evolution of the paleosols were clay illuviation and lessivage, mineralization of organic matter, solodization, flushing, fersialitization, carbonation, aeration, and water erosion. These processes indicate that the pedogenesis occurred in a seasonal climate contrasted in humidity with a very dry season followed by another very rainy one.

The presence of paleosols interspersed with lithic layers of variable granulometry without pedogenesis imply that there was significant instability in the climatic and geomorphological conditions in the region during the time when the sets of red layers in the desert were formed.

We concluded that the release of iron from the primary minerals and their diffusion within the matrix of the geological material and its subsequent oxidation was the mechanism responsible for the dominant color of both the red layers and the paleosols of La Tatacoa desert. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Paleosols; Synchronous variation; Pedogenesis; Macro and micromorphology; Lower red bed; Ferruginous bed; La Tatacoa desert, Huila, Colombia.

***Correspondencia:**
María Teresa Flórez-Molina; maria.florez@udea.edu.co; **Recibido:** 20 de julio de 2018; **Aceptado:** 27 de noviembre de 2018; **Editor:** Carlos Jaramillo

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

Introducción

En los depósitos sedimentarios superficiales de algunos paisajes terrestres de Colombia se han detectado paleosuelos que se han constituido en un valioso recurso para reconstruir ambientes de evolución geológico-geomorfológica de amplias regiones, especialmente en la tefroestratigrafía de sus cordilleras, debido a que conservan evidencias de los biomas del pasado y de las condiciones climáticas y de drenaje existentes en la época de su formación (**Herd,** 1982; **Thouret, *et al.,*** 1985; **Salomons,** 1989; **Pulido, *et al*.,** 1990; **González, *et al.,*** 1993; **Flórez**, 2000; **Mantilla, *et al.,*** 2011; **Parra,** 2016). En las rocas sedimentarias clásticas del Mioceno Superior del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, **Fields & Henao** (1949), **Henao** (1950) y **Fields** (1959) describieron y cartografiaron tres conjuntos de capas rojizas de diferentes edades: capas rojas superiores (*upper red beds*, capas rojas inferiores (*lower red beds*) y arenisca ferruginosa (*ferruginous sandstone*). Dentro de estas capas se han detectado paleosuelos formados en condiciones de climas estacionales muy contrastados en humedad, incluso áridos, en paleorrelieves colinados de baja altitud y en planicies aluviales (**Guerrero,** 1994; **Flórez, *et al*.,** 2013; **Parra,** 2016), aunque **Stirton** (1953) negó su existencia.

La transformación climática ocurrida hacia mediados del Mioceno es una de las más importantes que ha sufrido el planeta y consta de un lapso cálido, una transición y un enfriamiento. Las rocas terciarias del desierto de La Tatacoa albergan una rica variedad de paleosuelos que cubren dicha transición climática, especialmente los paleosuelos del área de La Venta, cuya importancia internacional radica en que son indicadores de los climas imperantes en ella.

La inestabilidad climática que se presentó en el Mioceno pudo generar una amplia variedad de condiciones ambientales y espaciales en los procesos pedo-geomorfológicos que se desarrollaron específicamente en la cuenca del desierto de La Tatacoa, los cuales pudieron haber quedado registrados en sus paleosuelos, por lo que el presente estudio contribuye a determinar esas variaciones espaciales, tanto pedogenéticas como geomorfológicas, mediante el análisis sincrónico de las capas rojas, así como a mejorar el conocimiento paleoambiental del desierto mediante la interpretación de los rasgos pedológicos que se han preservado en los suelos y los análisis fisicoquímicos y mineralógicos realizados.

Antecedentes

Salazar, *et al.* (2017) y **Sánchez, *et al.*** (2017) estudiaron los paleosuelos de las capas rojas superiores del Miembro Cerro Colorado y calcularon la precipitación media anual (1300.00±181.00 mm/año) y la temperatura media anual (20.00±0.60ºC) reinantes durante su formación utilizando funciones del clima. Estos autores señalaron que la arcilla predominante en estos paleosuelos es la esmectita, presente en 50 % de su área, seguida de la dickita y la caolinita, cada una con un 22 %, y la ilita con un 6 %.

Parra (2016) hizo una comparación litoestratigráfica de las propuestas de **Henao** (1950), **Fields** (1959) y **Guerrero** (1994) y concluyó que el Grupo La Venta, Formación Villavieja, donde se encuentran las capas rojas, era una secuencia de sedimentos continentales de origen fluvial que se conformaron como un monoclinal suavemente buzante hacia el sureste (SE). Localmente, en distancias cortas, el monoclinal se vuelve casi horizontal simulando anticlinales y sinclinales poco conspicuos tal como se presenta en la Tabla 1. Se han preservado los nombres locales y tradicionales para las unidades. Este autor solo estableció la existencia de paleosuelos en la capa roja superior (Tabla 1).

En las capas rojas del desierto de La Tatacoa **Flórez, *et al*.** (2013) reconocieron dos conjuntos de paleosuelos que llamaron secuencia superior y secuencia inferior. La secuencia superior tenía un espesor de 16,15 m y se componía de tres fragmentos de paleosuelos; la secuencia inferior, con 14,50 m, también incluía tres fragmentos. La característica más sobresaliente de los paleosuelos encontrados en la secuencia inferior fue la coloración parda rojiza y parda rojiza oscura, mucho más intensa que en los paleosuelos de la secuencia superior.

Materiales y métodos

La zona de interés se localiza en el desierto de La Tatacoa, en los municipios de Baraya y Villavieja, Huila (Figura 1). Según los registros de la **Universidad Surcolombiana - USCO** (2005), el clima es semiárido ecuatorial y corresponde a las zonas de vida de bosque seco tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms-T).

Trabajo de campo. En campo se hicieron recorridos a lo largo de las capas rojas detectadas y después de su observación cuidadosa, se seleccionaron varios sitios (Figura 1) y se describieron sus características morfológicas siguiendo los protocolos establecidos por **Schoeneberger, *et al.*** (2002), **Retallack** (1988, 2001), **Kraus** (1999) y **Nettleton, *et al.*** (2000). Los suelos y paleosuelos encontrados se clasificaron a nivel de subgrupo según el Sistema Taxonómico de Clasificación de Suelos del *U.S. Department of Agriculture* (USDA) (**Soil Survey Staff - SSS,** 2014). Se tomaron fotografías y se hicieron los diagramas estratigráficos de todo lo descrito. Por último, se estableció la sección tipo de cada conjunto de capas rojas, y en cada una se muestreó el suelo para su caracterización detallada mediante determinaciones fisicoquímicas, mineralogía y micromorfología.

Propiedades evaluadas. En cada muestra de material se hicieron los siguientes estudios específicos.

Procesamiento en seco. Se secó al aire una parte húmeda y previamente pesada de cada muestra sobre una superficie de porcelana en un ambiente limpio y sin exceder los 25 °C. En cada parte se determinaron las pérdidas de humedad, las pérdidas por calcinación a 550 °C, el contenido de carbono orgánico total y se caracterizaron sus macrocomponentes visualizados con el estereoscopio.

Mineralogía. Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) se evaluó la morfología de las partículas en

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

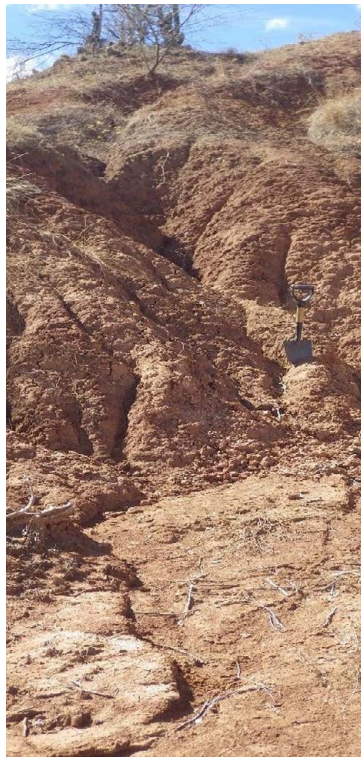
un equipo Jeol, modelo JSM-6300. Las muestras en polvo, previamente recubiertas con oro en un equipo previsto para ello (modelo Desk II), se colocaron en los portamuestras; se trabajó a 20 Kv, a igual distancia de trabajo y con acercamientos de 5.000, 2.500 y 1.000 X. La caracterización mineralógica de los paleosuelos muestreados se hizo en el Laboratorio GMAS SAS mediante difracción de rayos X con un difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance Serie I, tanto en la fracción de arcilla como en un preparado en polvo impalpable del suelo total, muestras a las que se les adicionó un 5 % en peso de espato de fluorita como estándar. A la fracción de arcilla se le aplicaron los tratamientos de glicolado y calentado, con lo cual se obtuvieron tres resultados por muestra (muestra secada al aire, muestra calentada a 550 °C y muestra tratada con glicol de etileno).

Análisis micromorfológico. Para el análisis micromorfológico se tomaron muestras en cada horizonte con un cilindro biselado de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, que luego se cubrió con parafina por ambos lados marcando previamente el techo y la base para que no perdieran humedad. Las muestras se guardaron en bolsas plásticas y se enviaron al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bogotá donde se cortaron las secciones delgadas de suelos. Las placas pulidas se observaron con un

Tabla 1. Litoestratigrafía informal del Neógeno en el área de La Tatacoa

<table>
<tr><th colspan="3">Parra (2016)</th><th colspan="2">Henao (1950)</th><th colspan="3">Guerrero (1993)</th></tr>
<tr><td colspan="3">Terrazas cuaternarias</td><td colspan="2">Terrazas</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="3">Mesetas pleistocenas</td><td colspan="2">Abanicos aluviales</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="15">Grupo La Venta</td><td colspan="2">Formación Gigante</td><td colspan="2">Formación Mesa</td><td colspan="3">Formación Neiva</td></tr>
<tr><td colspan="2">Formación Valla</td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Formación Mesitas</td><td colspan="2">Techo de la serie Honda, serie Brown, secuencia Brown</td><td rowspan="10">Formación Villavieja</td><td>Miembro Cerro Colorado El Cardón Red beds</td><td>Lecho rojo Polonia</td></tr>
<tr><td rowspan="9">Formación Villavieja</td><td>Paleosuelo El Cardón</td><td colspan="2">Lechos rojos superiores Upper Red Beds</td><td>Lechos de San Francisco</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Intermediate Clays and Sandstone</td><td rowspan="8">Miembro Baraya</td><td>Unit Between</td></tr>
<tr><td>Paleosuelos</td><td colspan="2">Lower Red Beds
A clay member”</td><td>La Venta Red Beds</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">La Venta clays and Sandstone”</td><td>Unit Between</td></tr>
<tr><td>Capa ferruginosa</td><td colspan="2">Ferruginous Sandstone”</td><td>Ferruginous beds</td></tr>
<tr><td></td><td rowspan="4">Secuencia Gray Colored Sandstone And Brown Clays</td><td>Unit Above The Fish Bed”</td><td>Unit Above</td></tr>
<tr><td>Capa de peces</td><td>“ish Bed”</td><td>Capa de peces</td></tr>
<tr><td></td><td>Unit Below Fish Bed</td><td>Unidad por encima</td></tr>
<tr><td>Capa de monos</td><td>Monkey Unit</td><td>Capas de monos</td></tr>
<tr><td>Formación Cerbatana</td><td></td><td>Miembro Cerbatana Gravels and Clays</td><td>San Nicolás Clays</td><td rowspan="8">Formación La Victoria</td><td colspan="2">Capas de conglomerados Cerbatana</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Formación Victoria</td><td>Arcilla con nocilas</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">Unit Between</td></tr>
<tr><td>Areniscas Tatacoa</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">Tatacoa Sandt. Beds</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2">Unit Between</td></tr>
<tr><td>Areniscas Chunchull</td><td colspan="2">Miembro Líbano Clays And Sandstone</td><td colspan="2">Chunchullo Sandst beds</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Formación San Alfonso</td><td rowspan="3"></td><td colspan="2" rowspan="3"></td><td colspan="2">Unit Between</td></tr>
<tr><td colspan="2">Cerro Gordo beds</td></tr>
<tr><td colspan="2">Unit Below</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Grupo La Arenosa</td><td colspan="2">Formación Igua</td><td rowspan="3">Secuencia Arenosa Sandstone and Siltstones”</td><td>Techo</td><td colspan="3" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Formación Los Hoyos</td><td>Medio</td></tr>
<tr><td colspan="2">Formación Borrega</td><td>Base</td></tr>
<tr><td>Formación Barzaloza o Espinaloza</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

Capas rojas superiores



Capas rojas inferiores

Capas Ferruginosas

Figura 1. Localización de las capas rojas en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, y aspecto general de los sitios donde se ubicaron las secciones tipo de los paleosuelos en cada una de ellas (Fotos de los autores)

microscopio óptico de luz polarizada Olympus y se fotografiaron barriendo su mayor área. Las descripciones comprendieron los componentes, la matriz y sus relaciones, los vacíos, el color y las características dominantes.

Análisis de pedocomponentes. Este análisis consiste en la detección y cuantificación de las asociaciones de los componentes microscópicos orgánicos, inorgánicos o biominerales presentes en el suelo, los cuales pueden emplearse en la interpretación de condiciones ambientales específicas. En su conjunto, estos componentes representan un registro integral de los diversos agentes y procesos climáticos, geológicos, edáficos y biológicos que intervienen en el contexto de evolución del suelo. Una porción de la muestra húmeda se dispersó y se fraccionó para obtener las partículas entre 100 y 10 micrómetros que fueron clasificadas y contadas en un microscopio petrográfico.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

Índices pedológicos. Se calcularon algunos índices que se relacionan con el grado de evolución de los suelos siguiendo la metodología planteada por **Sedov, *et al.*** (2001, 2009).

Índice de *meteorización.* A los paleosuelos de las secciones tipo se les calculó el índice de meteorización mediante la ecuación [1] de Parker (1970), en la que se considera la movilización de Na^+, K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}.

$$WIP = (Na^+/0,35 + Mg^{2+}/0,9 + K^+/0,25 + Ca^{2+}/0,7)\ \% \qquad [1]$$

El índice de meteorización de Parker (*Weathering Index of Parker,* WIP) refleja la probabilidad de que un elemento sea movilizado en el proceso de meteorización y tiene un rango que varía de 0 a 100: valores de WIP cercanos a 0 indican mayor meteorización y cercanos a 100, menor efecto de la meteorización.

Índice de la relación limo-*arcilla.* Este se basa en el supuesto de que la fracción de limo de los paleosuelos consiste principalmente de minerales intemperizables y la fracción de arcilla representa el material secundario derivado del intemperismo del limo. En esta relación, los valores menores de 0,15 caracterizan los paleosuelos altamente intemperizados, bien desarrollados y generalmente muy antiguos, formados bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje. En contraste, los valores mayores de 2 son indicativos de un reducido intemperismo y una escasa evolución del paleosuelo (**Young,** 1976; **Van Wambeke,** 1991).

Análisis sincrónico. Con todas las descripciones hechas en cada secuencia de capas rojas se hizo un análisis sincrónico considerando aspectos como la variación en el espesor de las capas líticas y los paleosuelos, en el desarrollo y la estabilidad pedogenética, el grado de intemperismo de los minerales primarios y las condiciones ambientales del sitio en las que se formaron.

Resultados

Pedoestratigrafía de los paleosuelos en la capa ferruginosa. La sección tipo de esta unidad se localiza a 500 metros de la vía que conduce del observatorio a "Los Pozos", en la margen izquierda, coordenadas X: 03°14´18.5" y Y: 075°10´33.6" (Figuras 1 y 2).

En la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa se pueden reconocer tres horizontes de un paleosuelo que subyace bajo una discordancia erosiva. El paleosuelo descansa sobre una capa lítica de limos, muy dura, de color amarillo pálido. Los horizontes del paleosuelo son fuertemente arcillosos y alcalinos, tienen muy bajo contenido de materia orgánica, alto contenido de bases y de fósforo, gran capacidad efectiva de intercambio catiónico, no son deficientes en elementos menores y son sódicos (Tabla 2).

A continuación, se presenta la descripción de la sección tipo de las capas ferruginosas.

C 0,0 – 0,94 m: capa lítica arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 20 % de color 5YR6/1 (gris) presente n forma de concentraciones filamentosas de arcilla que rellenaban grietas y fisuras. Sin estructura (masiva) y muy dura; plástica y pegajosa. Límite abrupto ondulado.

2C 0,94 – 1,07 m: capa lítica limo-arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 30 % de color 5YR6/1 (gris) presente en forma de concentraciones filamentosas de arcilla que rellenaban grietas y fisuras. Sin estructura (masiva); dura; plástica, ligeramente pegajosa, con muchos poros finos y medios y límite abrupto irregular.

3Btn 1,07 – 1,36 m: color rojo (2.5YR4/6); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; duro, plástico, pegajoso, con muchos argilanes continuos y prominentes, pocos poros y raíces finas; presentaba algunas grietas verticales. pH 8,5, débil reacción al HCl y al H_2O_2 y algunos carbonatos concentrados en placas delgadas de hasta 1 mm. Límite gradual plano.

$3Btknss_1$ 1,36 – 1,86 m: color pardo rojizo (2.5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; plástico y pegajoso; argilanes comunes continuos y definidos; pocos poros y raíces finas. Presencia de espejos de falla estriados, bien definidos, y de grietas verticales. pH de 8,0; fuerte reacción al HCl y al H_2O_2; abundantes recubrimientos de manganeso. Límite gradual plano.

$3Btknss_2$ 1,86 – 2,16 m: color pardo rojizo (5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; plástico y pegajoso; frecuentes manchas de óxidos de hierro y argilanes comunes continuos y definidos; pocos poros y raíces finas. Presencia de espejos de falla estriados, bien definidos, y grietas verticales. pH de 8,0; fuerte reacción al HCl y al H_2O_2. Límite abrupto plano.

4C 2,16 – 3,10 m: capa lítica limosa de color 10YR6/6 (amarillo parduzco). Sin estructura (masiva), muy dura, ligeramente plástica y pegajosa.

Las características más sobresalientes de este paleosuelo fueron la coloración roja marcada por colores entre el pardo rojizo y el pardo rojizo oscuro, la textura arcillosa con estructura en bloques angulares, la presencia de frecuentes manchas de óxidos de hierro y argilanes comunes continuos, así como de espejos de falla bien definidos y grietas verticales.

Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas. En la Tabla 3 se presentan los índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas descritas en el desierto de La Tatacoa. Los índices de las secuencias superior e inferior se establecieron con la información publicada por **Flórez, *et al.*** (2013).

Variación sincrónica de las capas rojas del desierto de La Tatacoa. *Variación sincrónica de las capas rojas inferiores.* Como ya se ha dicho, en las capas rojas se evidenciaron, por lo menos, seis paleosuelos, los cuales no se manifestaban en todos los perfiles a lo largo de la traza indicada en las Figuras 3a y 3b. La variación sincrónica de esta capa se estudió en detalle con el levantamiento de sus rasgos dominantes y su variación espacial y su agrupación en nueve perfiles pedoestratigráficos con base en la sección tipo denominada MT28-2ST ya descrita. A continuación, se describen los perfiles estudiados en los otros sitios.

Perfil 28-1. Con un espesor de 20,00 m, en él se evidenciaron tres paleosuelos que de techo a base se nombraron

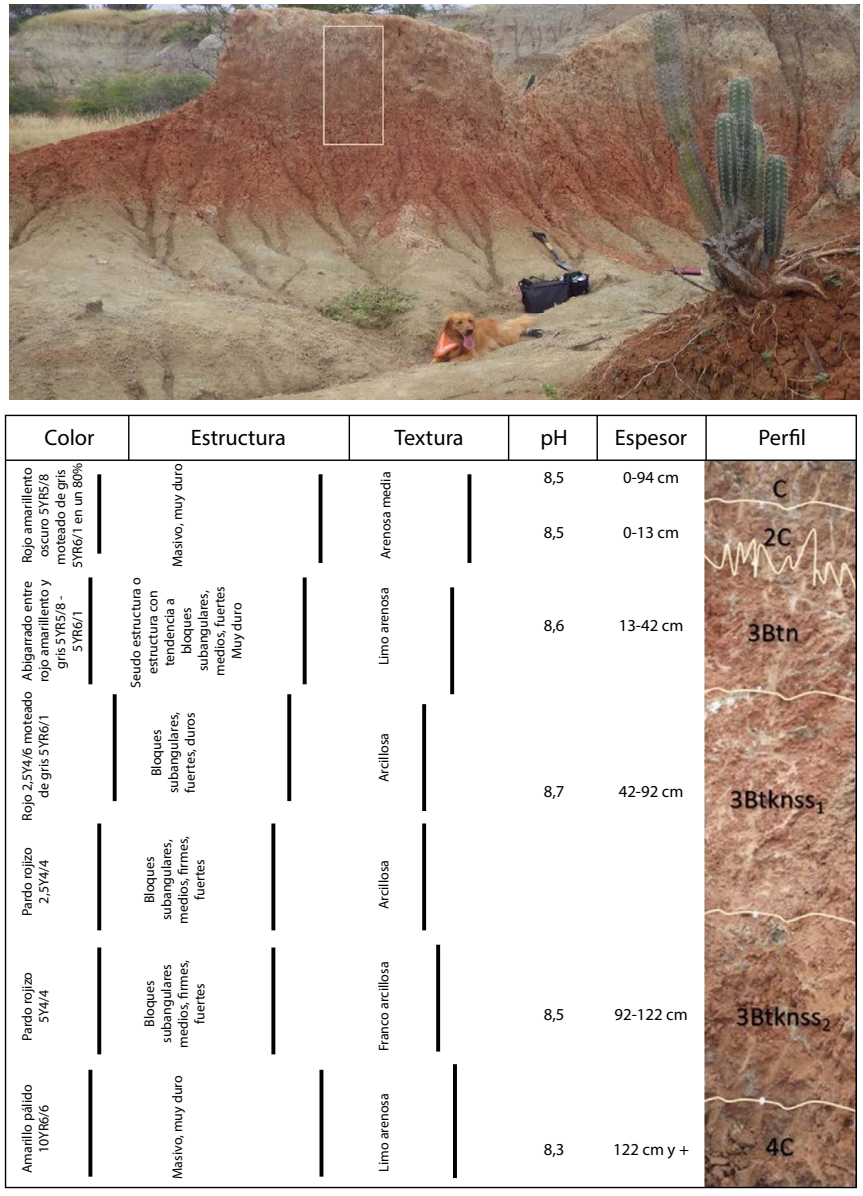


Figura 2. Sección tipo y pedoestratigrafía de la capa ferruginosa en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

como $3Btss_1$-$3Btss_2$, 5Bt y 7Btss. Todos presentaban argilanes, eran duros en seco y arcillosos. Los horizontes 3Btss y 7Btss presentaron condiciones redoximórficas y espejos de falla. El espesor de los horizontes fue de 1,25 m, 3,42 m, 1,57 m y 1,08 m, respectivamente. Solo los dos primeros eran consecutivos, los otros dos estaban separados por capas líticas.

Perfil 28-3. Su espesor fue de 19,00 m y en él se definieron dos paleosuelos Bt, el del techo con dos horizontes (4Bt-4Btss) y el de la base con un horizonte (5Bt). Todos presentaban argilanes, eran duros en seco y tenían textura limosa, arcillosa y limo-arcillosa, respectivamente. El 4Btss presentó una estructura con tendencia a bloques angulares fuertes y espejos de falla. El espesor de los paleosuelos fue de 2,50 m, 1,50 m y 5,00 m, en su orden. Los tres horizontes eran continuos, pero entre los dos primeros y el tercero había marcadas diferencias en textura, estructura y color. Tanto en el techo como en la base se encontraron capas líticas.

Perfil 28-4. Su espesor fue de 26,00 m. En él se encontraron tres paleosuelos, los cuales se nombraron de techo a base como 3Bt, 5Bt y 7Btss. Todos presentaban argilanes, eran muy duros en seco y tenían una textura limo-arcillosa y arcillosa. Los dos primeros presentaron tendencia a una estructura en bloques angulares en tanto que en el tercero era evidente la estructura, así como los espejos de falla. Su espesor fue de 4,00 m, 4,50 m y 1,50 m, respectivamente. Todos estaban separados entre sí por capas líticas.

Perfil 30-1. Su espesor fue de 15,00 m. En él se observaron cuatro paleosuelos que de techo a base se nombraron como 4Bt, 6Bt, 8Bt y 10Btss. Todos presentaban argilanes,

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas* y contenido mineralógico** del paleosuelo en la sección tipo de las capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

Propiedades fisicoquímicas																	
Horizonte	%				pH	meq/100 gr de suelo					%		mg/kg suelo				
	A	L	Ar	MO		Ca	Mg	K	Na	CICE	SB	PSI	P	S	Fe	Cu	B
3Btn	32	26	42	0,00	8,6	30,80	4,90	0,49	6,60	42,80	91,90	15,40	166,02	5,03	2,00	2,04	0,71
$3Btknss_1$	18	24	58	0,03	8,7	33,01	5,10	0,55	7,32	46,01	70,50	15,91	167,01	12,00	4,02	2,00	0,72
$3Btknss_2$	26	36	38	0,01	8,5	36,40	5,51	0,54	8,33	50,80	65,41	16,40	137,00	18,01	3,02	2,01	0,81

Contenido mineralógico (%)									
	Minerales de arcilla				Otros minerales				
	Illita/mica	I/S	Esmectita	Caolinita	Cuarzo	Fp	Pl	Anatasa	Hematita
3Btn	45,96	3	5,11	48,93	38,36	3	2	3	2
$3Btknss_1$	33,86	2	3,76	62,38	43,77	5	3	2	3
$3Btknss_2$	52,05	2	5,78	42,16	36,15	4	4	1	2

* A, L, Ar: contenidos de arena, limo y arcilla, respectivamente. MO: contenido de materia orgánica. CICE: CIC efectiva. CIC: capacidad de intercambio catiónico. SB: saturación de bases. PSI: porcentaje de sodio intercambiable. CICE = (Ca + Mg + K + Na). SB = [(Ca + Mg + K + Na) / CIC] * 100. PSI = (Na / CIC) * 100

** I/S: integrado illita-esmectita. Fp: feldespato potásico. Pl: plagioclasas

Tabla 3. Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

Unidad		Horizonte	%		meq/100 gr suelo				%					
			L*	Ar*	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Na/0,35	Mg/0,9	K/0,25	Ca/0,7	WIP*	L/Ar
Capas rojas superiores	Secuencia superior	3Btnss	28	60	16,61	3,41	0,28	10,20	29,10	3,79	1,12	23,70	57,80	0,47
		$5Btn_1$	28	62	21,50	2,89	0,31	6,70	19,10	3,21	1,24	30,71	54,30	0,45
		$5Btn_2$	30	68	14,70	2,04	0,24	6,06	17,31	2,27	0,96	21,00	41,50	0,44
		7Btn	24	72	21,10	2,66	0,31	12,80	36,60	2,96	1,24	30,10	70,91	0,33
	Secuencia inferior	10Bt	46	36	17,03	3,75	0,21	3,98	11,40	4,17	0,84	24,31	40,71	1,28
		12Btss	28	68	25,70	2,14	0,31	4,75	13,60	2,38	1,24	36,72	53,90	0,41
		14Bt	32	62	27,91	2,36	0,34	4,16	11,90	2,62	1,36	39,90	55,70	0,52
Capas ferruginosas		3Btn	26	42	30,80	4,90	0,49	6,61	18,71	5,44	1,96	44,00	70,32	0,62
		$3Btknss_1$	24	58	33,01	5,10	0,55	7,32	20,90	5,67	2,20	47,10	75,90	0,41
		$3Btknss_2$	36	38	36,41	5,51	0,54	8,33	23,80	6,11	2,16	52,00	84,11	0,95

* L, Ar: contenidos de limo y arcilla, respectivamente. WIP: índice de meteorización de Parker

eran muy duros en seco, tenían texturas limosas, limo-arcillosas y arcillosas, así como tendencia a presentar una estructura en bloques angulares medios y fuertes, mejor definida en el 10Btss, el cual presentaba, además, espejos de falla. Su espesor desde el techo fue de 0,72 m, 4,30 m, 0,50 m y 0,40 m, respectivamente, y estaban separados por capas líticas. Resultó interesante observar cómo por encima del 4Bt se encontró una capa lítica limosa con características redoximórficas y, por debajo, otra capa de limos pardo-amarillentos que se 'gradaban' discordantemente en arcillas grises.

Perfil 30-2. Registró un espesor de 8,00 m. En él sólo se encontró un paleosuelo muy duro nombrado como 2Bt, con argilanes, textura arcillosa y tendencia a presentar una estructura en bloques angulares. Su espesor fue de 5,50 m y su color, el rojo (2.5Y4/6).

Perfil 30-3. Presentó un espesor de 9,00 m y seis paleosuelos que de techo a base se nombraron como 4Bt, 6Bt, 8Bt, 10Bt, 12Bt y 14Btknss. Todos presentaban argilanes, eran extremadamente duros en seco, tenían texturas limosas y una estructura con tendencia a presentar bloques angulares, gruesos y fuertes. El 14Btnss tenía espejos de falla y

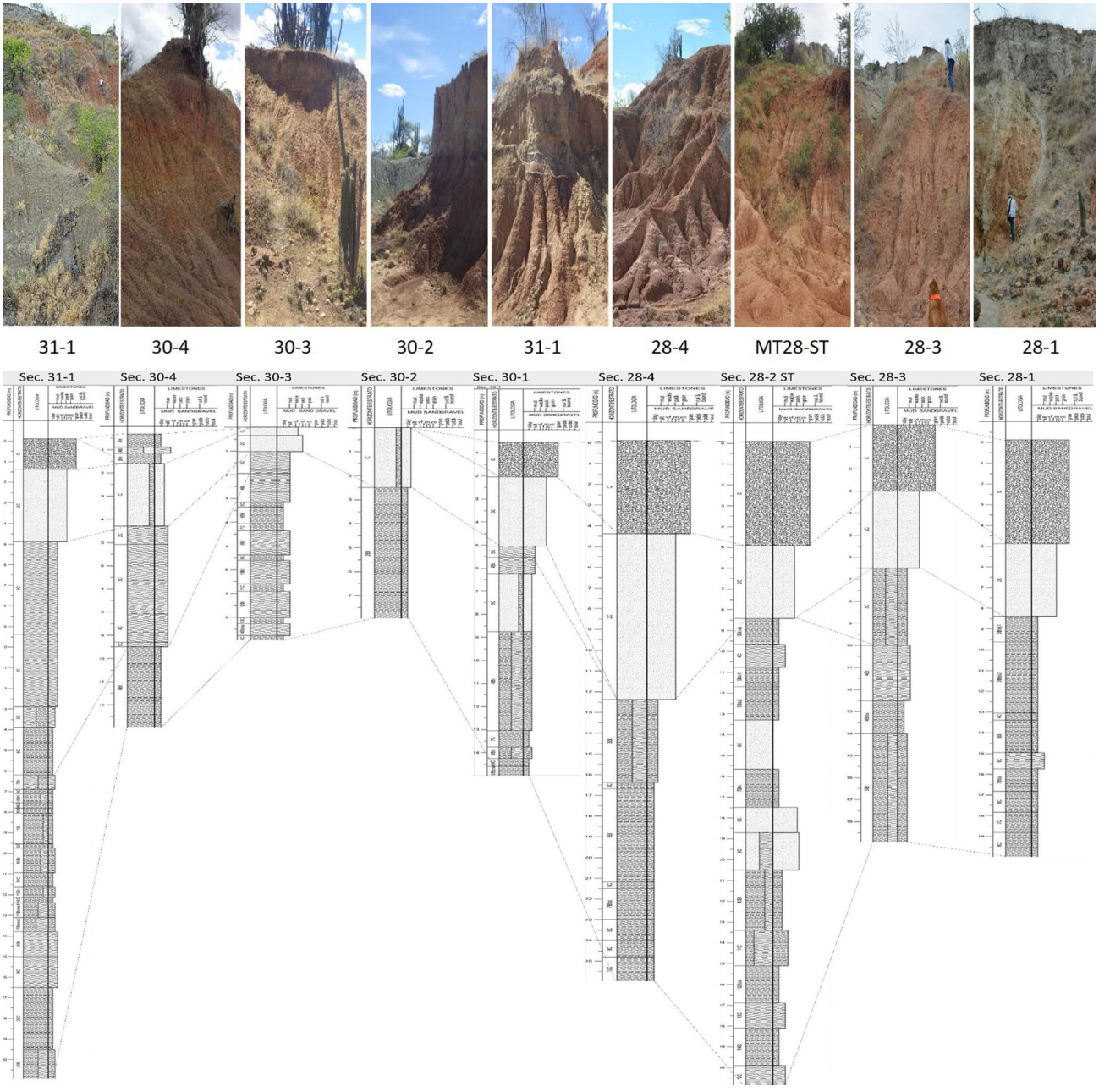


Figura 3. a. Perfiles levantados en las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **b.** Variación sincrónica de las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

reaccionó de manera notable al HCl. Su espesor de techo a base fue de 1,22 m, 0,70 m, 1,00 m, 1,00 m, 1,10 m y 0,50 m, respectivamente. Todos estaban separados por capas líticas arcillosas, algunas laminadas y de colores grises y pardo oliva.

Perfil 30-4. Su espesor fue de 13,00 m. Solo en este sitio se ha preservado un suelo moderno de 1,50 m. El perfil estaba constituido por una serie de capas líticas limosas de color gris, pardo-rojizo, rosa y amarillo pálido. El único paleosuelo encontrado se nombró como 6Btss, con presencia de argilanes, extremadamente duro en seco, con textura arcillosa y una estructura con tendencia a presentar bloques angulares; su espesor fue de 3,5 m y en él se observaron abundantes grietas abiertas. Las capas líticas superiores presentaban características redoximórficas.

Perfil 31-1. Su espesor fue de 31.00 m, y en él se encontraron ocho paleosuelos nombrados de techo a base como 7Bt, $9Bt_1$-$9Bt_2$, 11Bt, 13Bt, 15Bt, $17Btknss_1$-$17Btknss_2$, 18Bt y 21Bt. Todos presentaban argilanes, eran extremadamente duros en seco y tenían una tendencia a presentar una estructura en bloques angulares, fuertes, así como texturas limo-arcillosas, y estaban separados por capas

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

líticas arcillosas de color pardo grisáceo. En los horizontes 17Btnss$_1$-17Btnss$_2$ la estructura presentó bloques angulares gruesos y fuertes y con espejos de falla, abundantes grietas abiertas y marcada reacción al HCl. El espesor de los horizontes de los paleosuelos desde el techo fue de 0,70 m, 0,45 m, 0,25 m, 1,50 m, 1,20 m, 0,50 m, 0,70 m, 0,70 m, 1,20 m y 1,50 m, respectivamente. Todos presentaban colores que variaban entre el rojo, el rojo-amarillento y el pardo-rojizo. El aporte detrítico de la cuenca presentó una gran monotonía, pues se trataba de un sedimento inmaduro de limos, lodolitas y arcillolitas de colores pardos, pardo rojizo, gris claro y gris oliva, con abundante cuarzo y sedimentos siliciclásticos, lo que hace que la composición mineralógica en todos los paleosuelos sea bastante similar y solo cambie la cantidad y su estado de alteración.

Variación sincrónica en las capas ferruginosas. Para este estudio se levantaron cuatro perfiles pedoestratigráficos a partir de la sección tipo nombrada como MT-21ST, la cual ya se describió (Figura 4a). Esta capa presentó variaciones importantes tanto en los espesores como en las características del paleosuelo encontrado; es de resaltar que este solo se presentó en los perfiles descritos en el sector ubicado hacía el extremo sur del transecto estudiado (MT21ST, 31-2) (Figuras 4a y 4b), y estaba ausente en el resto del transecto, lo que dificultó el establecimiento de una correlación local entre los perfiles observados dentro de la capa ferruginosa.

En la parte superior de casi todos los perfiles se presentó una secuencia de una capa de arenas gruesas seguida de otra de arenas finas de color gris claro (5Y7/1), con un espesor promedio de 1,50 m y 1,30 m, respectivamente, las cuales presentaban costras muy delgadas de carbonatos. Estas capas se encontraron subyacidas por una alternancia de limos rojos y arcillas grises muy endurecidas, algunas de ellas con rasgos redoximórficos y, en algunos perfiles, hasta dos paleosuelos. Los perfiles estudiados se describen a continuación.

El perfil 1-1 tenía un espesor de 8,18 m; su techo estaba definido por una capa lítica de arena fina de color gris subyacida por capas líticas de arcillas, limos y limos arcillosos extremadamente duros sin evidencias pedogenéticas. Hacia la base se encontró una capa lítica con características redoximórficas con un espesor de 1,25 m, situada entre dos capas arcillosas, la superior de color verde manzana y la inferior de color lila.

El perfil 31-2 presentó un espesor de 43,09 m. En él se delimitaron dos paleosuelos que se nombraron de techo a base como 6Btss y 8Bt. Ambos presentaban argilanes, eran extremadamente duros, con textura arcillosa y tendencia a presentar una estructura en bloques angulares gruesos y fuertes, de los cuales el superior presentaba espejos de falla. El espesor de los paleosuelos fue de 1,10 m y 1,30 m, respectivamente, y estaban separados por capas líticas de limolitas rojas y arcillolitas grises. Entre estos dos paleo-suelos se observó una capa de 1,80 m de espesor con características redoximórficas y, por debajo de ella, una capa lila de 0,80 m. Ambas capas se presentaban en toda esta unidad, pero, a nivel local, en algunos perfiles los colores eran más fuertes o más tenues y sus espesores variaban notablemente.

El perfil 1-2 tenía un espesor de 10,21 m. Su techo estaba definido por una capa lítica de arena media a gruesa, de color gris, subyacida por capas líticas arcillosas, las cuales variaban en color y espesor desde el gris verdoso, el pardo amarillento, el amarillo, el pardo rojizo oscuro, el naranja y, hacia la base, el gris. Hacia la parte media se observó una capa con características redoximórficas de 0,96 m, seguida hacia abajo por una capa lila.

Discusión

Pedoestratigrafía de los paleosuelos en la capa ferruginosa. Por tratarse de sedimentos, las capas de este depósito pueden considerarse como un continuo geo-genético y la similitud morfológica, fisicoquímica y mineralógica entre los horizontes del paleosuelo (Tabla 1) hace pensar en un solo suelo con tres horizontes. No se observaron diferencias marcadas que puedan sugerir diferentes pedogénesis en cada horizonte. Las diferencias anotadas para el segundo horizonte (3Btknss$_1$) pueden estar relacionadas con un mayor tiempo de exposición de este a las condiciones ambientales. Si se considera un solo paleosuelo con tres horizontes, su clasificación correspondería a la de *sodic haplotorrerts* por los muy bajos contenidos de materia orgánica y los altos contenidos de bases (ambiente más seco que ústico).

Los tres horizontes de la secuencia 3Btn-3Btknss$_1$-3Btknss$_2$ tuvieron un mismo material parental, de origen sedimentario, rico en micas y feldespatos, que produjo arcilla esmectítica por meteorización y pedogénesis, característica de un clima cálido y seco muy contrastante en humedad.

Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas. Los mayores valores de WIP se dieron en el paleosuelo de la capa ferruginosa, cuyos suelos registraron el menor grado de evolución, lo que evidenciaría que la exposición al ambiente entre los tiempos de depositación de las capas de sedimentos que los originaron fue muy breve y no permitió una meteorización intensa de los sedimentos y, asimismo, que el ambiente durante su sedimentación fue demasiado seco (régimen de humedad tórrico), lo cual habría inhibido su alteración.

La variación de la meteorización en los tres primeros horizontes de la secuencia superior fue normal y se observó una inconsistencia en su grado de meteorización con respecto al del horizonte 7Btn, menos meteorizado, lo que podría implicar que entre el 5Btn y el 7Btn hubo una discordancia erosiva o que el 7Btn fue sepultado rápidamente, lo que impidió su evolución pedológica. En los paleosuelos de la secuencia inferior, así como en los de la capa ferruginosa, se observó que el grado de meteorización era inverso al orden observado en la secuencia superior, lo que podría indicar que los tiempos de exposición de los suelos al ambiente fueron menores en los horizontes más profundos.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

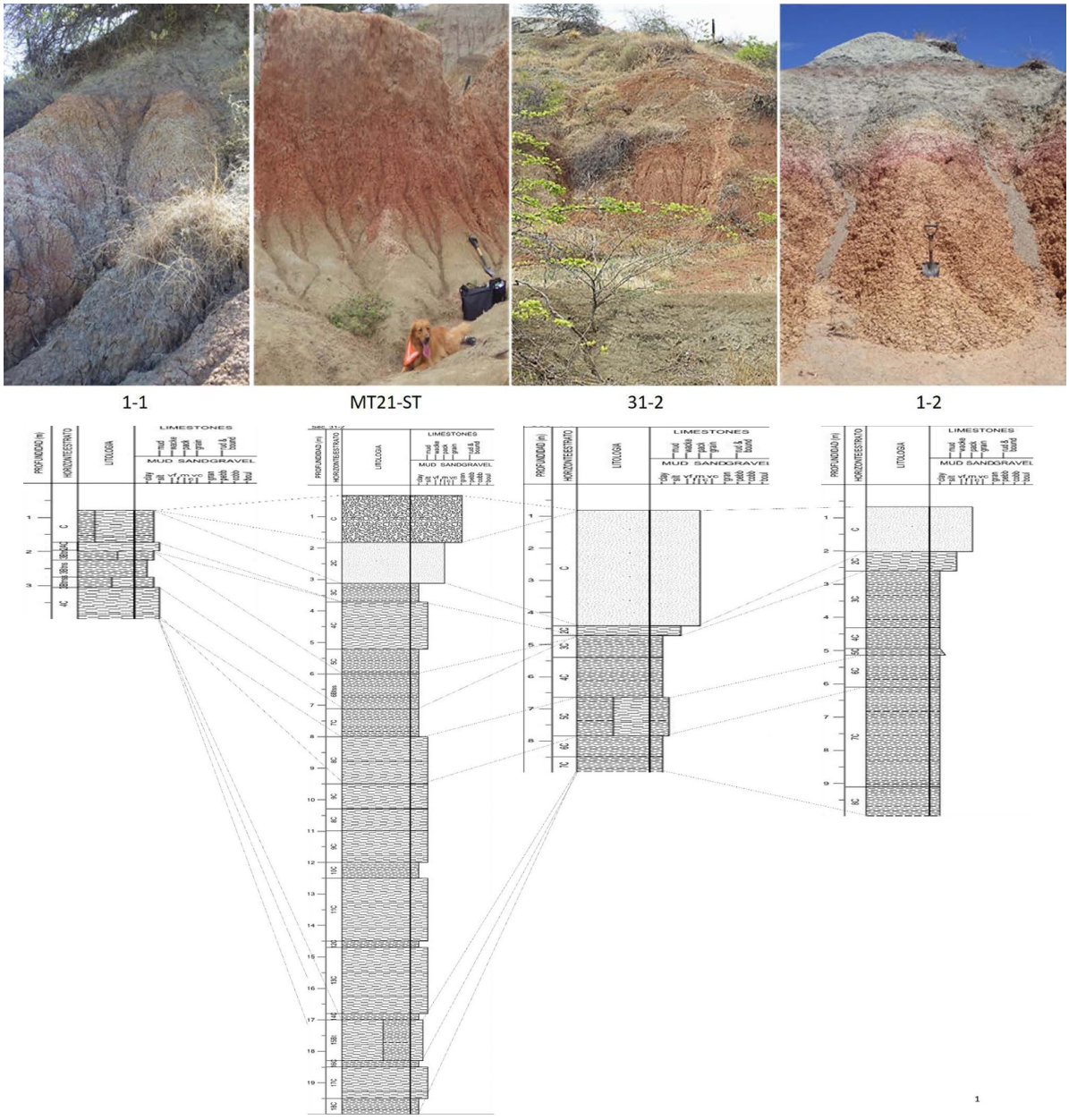


Figura 4. a. Perfiles levantados en la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **b.** Variación sincrónica de la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila Colombia

Con base en las observaciones realizadas en campo y en los resultados obtenidos en laboratorio pueden plantearse las siguientes conclusiones.

1. Todos los paleosuelos se desarrollaron de materiales parentales arcillosos o, por lo menos, de materiales que produjeron grandes cantidades de arcilla por meteorización y pedogénesis.
2. El clima dominante en la evolución de estos suelos correspondió a uno seco y muy contrastado en humedad: épocas lluviosas muy húmedas y las menos lluviosas muy secas, ya que presentaban argilanes, conservaban un alto contenido de bases y uno muy bajo de materia orgánica.
3. Todos los paleosuelos estaban separados entre sí por capas de arena o de limo, lo que implica alteraciones en el comportamiento hídrico en la cuenca y, por ende, en la dinámica sedimentaria en el sitio. Estas alteraciones pudieron originarse por cambios climáticos regionales o por cambios en el nivel de base de la cuenca, y también podrían ser responsables, por lo menos en parte, de la intensa erosión que siempre se ha dado en la zona.
4. Todos los paleosuelos presentaban horizontes argílicos (Bt), cuya formación requiere contrastes de humedad, estabilidad geomorfológica y condiciones de dispersión

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

de coloides que permitan su movilización y precipitación dentro del suelo (**Pulido, *et al.,*** 1990; **Malagón, *et al.,*** 1995; **Buol, *et al.*.** 1997; **SSS,** 1999).

5. La abundancia de horizontes argílicos y su espesor, así como el espesor que se consigue sumando todos los horizontes argílicos descritos (20,36 m), implica que se necesitaron varios milenios (más de 20, teniendo en cuenta los cálculos y presunciones de **Alexandrovskiy,** 2007) para la formación de las secuencias analizadas. A ello debe añadirse la parte de los suelos y de otros materiales que se perdieron por erosión y que no pueden cuantificarse hoy.
6. En todos los paleosuelos se presentó una fuerte erosión que los decapitó a todos, eliminando los horizontes A y, muy probablemente, parte de otros horizontes subsuperficiales, la cual se garantiza por efecto de un clima seco con épocas lluviosas muy húmedas y torrenciales.
7. La abundante cantidad de cuarzo, la escasez de feldespatos y otros minerales meteorizables y la abundancia en esmectitas y caolinita indican una meteorización intensa del material parental producto de un ambiente netamente oxidante, típico de los climas estacionales contrastantes en humedad que se han mencionado antes.
8. Los procesos pedogenéticos dominantes en la formación de los paleosuelos han sido la mineralización de la materia orgánica, la rubefacción, la braunificación o la pardificación generalizada en el suelo por acumulación de hierro oxidado, con o sin materia orgánica, la argiluviación y la lixiviación de arcilla, la fersialitización, que conlleva la formación de las esmectitas, la alcalinización, la carbonatación, el adensamiento, la vertisolización o argiloturbación y la erosión hídrica. Esta línea evolutiva ha evitado la lixiviación de bases y ha generado suelos decapitados, poco meteorizados, con limitadas propiedades físicas y calco-sódicas. El color rojo de los paleosuelos se debe a la intensa oxidación del hierro liberado por meteorización y a la rápida mineralización de la materia orgánica. Esta pedogénesis es característica de un ambiente cálido, seco y muy contrastado en humedad.
9. Los valores de los índices L/Ar confirman un mediano grado de evolución en los paleosuelos evaluados. A pesar de esto, se pudo establecer que en ellos se han dado procesos de alteración mineralógica, con destrucción de micas y feldespatos que ha producido, por una parte, modificaciones en la mineralogía detrítica y, por otra, neoformación de especies arcillosas.
10. En las granulometrías más finas se impregnó todo el plasma con compuestos de hierro cuya fuente es, muy posiblemente, la desestabilización de las biotitas y de las cloritas que no han desaparecido por completo en la actualidad.
11. Durante el periodo de menor drenaje se produjo la formación de esmectitas, probablemente a partir de la alteración de piroxenos y olivinos (**Craigh & Loughnan**, 1964; **Loughnan,** 1969). Posteriormente, con el aumento del drenaje, el suelo perdió los cationes básicos solubles y aumentó la actividad del aluminio, lo que provocó una progresiva aluminización de los minerales esmectíticos y la formación de caolinita mediante el interestratificado de illita y esmectita. La depositación de arenas intercaladas con limolitas protegió el suelo original de los agentes de alteración y explica que se mantenga todavía en la actualidad el interestratificado de illita y esmectita.

Variación sincrónica de las capas rojas del desierto de La Tatacoa. *Variación sincrónica de las capas rojas inferiores.* Las descripciones anteriores permiten señalar que las capas rojas inferiores presentan variaciones importantes en todo el transecto de su expresión en el desierto, tanto en los espesores como en las características de sus capas líticas y de los paleosuelos (Figura 3b). Solo en el perfil 30-4 se observó un suelo moderno bien definido con un *solum* formado por los horizontes A-AB-Bw, bien estructurados y con un espesor de 0,55 m, 0,28 m y 0,42 m, respectivamente. Subyacente a este suelo se encuentra una capa lítica de arenas finas y medias de color pardo amarillento (10YR5/6).

En casi todos los perfiles se presentó, en la parte superior, una secuencia de dos capas líticas conformadas por conglomerados de matriz soportados, heterométricos y heterogéneos, con una matriz arenosa gruesa de color gris claro (5Y7/1) y un espesor promedio de 2,98 m subyacida por una capa arenosa media que varió entre un color pardo amarillento y uno gris claro, con un espesor promedio de 2,88 m.

Las dos capas superiores mencionadas pueden coincidir con lo que **Henao** (1950) denominó "*intermediate clays and sandstone*", constituidas por areniscas grises y arcillolitas arenosas de coloraciones grises, de 38,00 m de espesor, ubicadas estratigráficamente entre las capas rojas superiores e inferiores. Por debajo de estas dos capas líticas se encuentran otras que pueden variar entre limos, limos arenosos, limos arcillosos y arcillolitas de colores pardo, pardo rojizo, gris claro y gris verdoso de diversos espesores, las cuales alternan con los paleosuelos.

Las diferencias en los espesores y la ubicación, tanto de los paleosuelos como de las capas líticas, sugieren diferencias locales importantes en la dinámica fluvial de la cuenca que aportó los sedimentos para conformar estas unidades estratigráficas. En el perfil 30-3, por ejemplo, fue notoria la cantidad de horizontes Bt (seis) intercalados y separados por capas delgadas de sedimentos, lo que podría relacionarse con su localización fisiográfica vecina a la quebrada La Venta que podría haberlo afectado con suaves desbordamientos periódicos que no alcanzaron a tener impacto en otros sitios muestreados.

Contrastan con lo anterior los grandes espesores de materiales líticos que se encontraron sobre los paleosuelos de los perfiles 28-1, 28-3, 28-2 ST, 28-4, 30-4 y 31-1, más aislados de la influencia fluvial y, por lo tanto, limitados en su pedogénesis. En la gráfica de correlación de la Figura 3b

se configura, asimismo, la presencia de paleorrelieves que pudieron haber incidido en el desarrollo de los paleosuelos debido a su carácter denudativo, lo que se confirma con las variaciones en los espesores de los horizontes descritos.

La mayoría de los horizontes que presentaban espejos de falla u horizontes nátricos se presentaron en la secuencia inferior de paleosuelos. Cuando aparecieron en los paleosuelos de la secuencia superior, se presentaron en los perfiles localizados hacia el sector más occidental del transecto. El contenido y el tipo de arcilla de estos horizontes se diferenciaron del resto de los horizontes iluviales descritos y su presencia puede indicar cambios puntuales en la dinámica fluvial de la cuenca, que aportó sedimentos más finos o registró cambios en el régimen de humedad de los suelos hacia condiciones más secas.

Variación sincrónica en las capas ferruginosas. En los perfiles levantados y en las observaciones de esta unidad realizadas en campo, se detectaron en los horizontes de los paleosuelos evidencias pedogenéticas como el color, la presencia de argilanes, la estructura y los espejos de falla. En todos los casos estos paleosuelos alternaron con capas líticas. En todos los perfiles se encontraron condiciones redoximórficas en las capas líticas limosas o limo-arcillosas encontradas encima de los paleosuelos o subyacentes a ellos.

Las descripciones hechas en los dos conjuntos de capas rojas estudiados permiten establecer que en ambos hubo diferencias en los espesores y en la ubicación tanto de los paleosuelos como de las capas líticas, lo que sugiere diferencias locales importantes en la dinámica fluvial de la cuenca que aportó los sedimentos para conformar estas unidades estratigráficas.

Asimismo, en los paleosuelos diferenciados en todos los perfiles levantados hubo variación espacial en el color, el espesor y la textura. Además, en todos hubo evidencias de pedogénesis, como la presencia de argilanes y el desarrollo de la estructura, que son rasgos dominantes, en tanto que la presencia de espejos de falla y la expresión de condiciones redoximórficas lo son menos.

En todos los paleosuelos se presentaron horizontes de iluviación de arcilla (Bt), aunque con amplias variaciones en su espesor y en su localización dentro del perfil. Estos procesos de iluviación de arcilla requieren de un clima de periodos secos con grandes déficits de humedad seguidos por periodos con alta pluviosidad.

La presencia de horizontes argílicos en todo el espesor de todos los conjuntos de capas rojas indica que a lo largo de toda su formación el clima dominante en la región fue el cálido seco con contrastes de humedad estacionales importantes.

El carácter alcalino de todos los suelos también corrobora que se formaron bajo la influencia de un clima relativamente seco que no aportó suficiente humedad para lixiviar las bases que se iban liberando por la meteorización.

Las condiciones climáticas netamente oxidantes que genera el clima seco estacionalmente contrastado en humedad también explican, en buena parte, el enrojecimiento generalizado de las capas rojas formadas por la oxidación del hierro liberado, por la meteorización o la pedogénesis de los minerales.

La presencia de los paleosuelos intercalados con capas líticas de granulometría variable y sin pedogénesis indica que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto, alternando épocas de periodos estables suficientemente largos como para permitir la formación de suelos iluviales y otros periodos cortos de condiciones climáticas más torrenciales que no dieron tiempo a la formación de un suelo.

Análisis macromorfológico y micromorfológico de los paleosuelos de las capas rojas. A manera de complemento, se presentan en esta sección las evidencias macromorfológicas y micromorfológicas que confirman la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las capas rojas inferiores y la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa.

Evidencias pedogenéticas macroscópicas. En los paleosuelos de las dos capas estudiadas se encontró el desarrollo de color, estructura, cutanes y espejos de falla en los suelos, así como la movilización de arcilla, óxidos de hierro, manganeso y carbonatos de calcio, lo cual evidenció procesos pedogenéticos como la iluviación, la lixiviación, la carbonatación y la fersialitización. Los pH alcalinos observados indican procesos de solodización y las arcillas expansibles produjeron una intensa vertisolización.

Como características dominantes se encontraron la coloración roja con los matices 5YR y 7,5YR y valores y crominancias menores de 6, las texturas arcillosas, el desarrollo estructural, la reacción alcalina y la presencia de argilanes, espejos de falla y horizontes nátricos o cálcicos.

A nivel de campo se encontraron evidencias de pedogénesis, como el desarrollo de la estructura de suelos, aunque no muy avanzado dadas las condiciones climáticas secas en que han evolucionado (Figuras 5a, 5b).

El color rojo de los suelos puede haberse generado mediante procesos simultáneos de meteorización y pedogénesis. La meteorización alteró los minerales primarios de los sedimentos del material parental, lo que liberó hierro de ellos, el cual pasó a la matriz y fue redistribuido en ella por translocación pedogenética. En una etapa posterior el hierro se oxidó generando el color característico que inicialmente se presenta en forma de masas como las que se observan en las Figuras 5c y 5e y que, finalmente, le imprimen el color rojo homogéneo a todo el suelo, como se aprecia en las Figuras 5a, 5b, 5j y 5l. Los procesos de liberación por meteorización, y la posterior transformación, translocación, depositación y acumulación en la matriz del suelo, como los descritos antes para el hierro, también se produjeron con el manganeso y el calcio, como puede verse en las Figuras 5d, 5f, 5g y 5k.

En una pedogénesis más avanzada se generaron procesos de iluviación y lixiviación que dieron origen a los argilanes (Figuras 5e y 5j), a los manganes (Figuras 5f y

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

5k), y a los recubrimientos calcáreos (Figuras 5d y 5g). En algún momento de la historia genética de estos paleosuelos estos debieron estar bajo condiciones redoximórficas, las cuales generaron los colores variegados que se presentan en los suelos de las Figuras 5c y 5e, así como la formación de nódulos (Figura 5h) y de concreciones (Figura 5i).

Debido al carácter expansivo de las arcillas predominantes en estos suelos, se dio un proceso intenso de vertisolización que se manifiesta en una gran cantidad de espejos de falla bien desarrollados (Figuras 5d, 5j y 5k), además de una estructura cuneiforme típica como la que se observa en la Figura 5l. Nótese que, en ocasiones, los

Figura 5. Rasgos pedológicos macromorfológicos en paleosuelos del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **a.** Desarrollo de estructura en bloques angulares, gruesos, moderados. **b.** Horizonte oscuro, estructura en bloques, presencia de raíces y nódulos arcillosos. **c.** Masas de hierro en la matriz. **d.** Movilización y depositación de compuestos de hierro (rojos), manganeso (negros) y calcio (blancos). **e.** Argilanes. **f.** Manganes. **g.** Recubrimientos con carbonato de calcio. **h.** Nódulo de arcillas y óxidos de hierro. **i.** Concreciones de hierro y manganeso. **j. - k.** Espejos de falla pedológicos sobre argilanes, manganes y nódulos calcáreos. **l.** Desarrollo de estructura cuneiforme en paleosuelos del desierto de La Tatacoa.

espejos de falla (Figuras 5d y 5k) se han desarrollado sobre superficies que ya tenían cutanes de diferentes composiciones (arcillas, óxidos de hierro o manganeso). En algunos sitios las condiciones fuertemente alcalinas han llevado a los suelos a desarrollar estructuras con tendencia columnar (Figura 5c).

Es notable la acción de los procesos generadores de pérdidas netas en el suelo, como la mineralización de la materia orgánica y la erosión hídrica, los cuales no han permitido el desarrollo o la conservación de horizontes A en los paleosuelos encontrados.

Evidencias pedogenéticas microscópicas. Se pudieron detectar procesos de difusión de óxidos de hierro o manganeso en la matriz del suelo que le imprimieron el color rojo o negro característico. Además, se detectaron movilizaciones y acumulaciones de arcilla y de óxidos de hierro y manganeso en poros, así como la formación de microagregados en bloques angulares.

En el examen micromorfológico de los paleosuelos de las capas rojas inferiores y de la capa ferruginosa se pudieron visualizar minerales como el cuarzo, los feldespatos, las plagioclasas, los piroxenos y los anfíboles, algunos de procedencia volcánica, así como micas, circones, esfenas y minerales de neoformación como caolinitas, la mayoría de ellos altamente meteorizados. Además, son evidentes los óxidos de hierro y manganeso de forma irregular, tales como las concreciones, las masas, los opacos y los coágulos, así como componentes de origen orgánico: polen, esporas, restos de tejido vegetal, silicofósiles, tecamebas y diatomeas, estas dos últimas indicativas de que en algún momento el suelo estuvo inundado. En las secciones delgadas de los paleosuelos de la Figura 6 se pueden observar los siguientes rasgos sobresalientes.

1. La impregnación de todos los materiales con óxidos de hierro, lo que determina la coloración rojiza de los suelos (Figura 6a), así como la segregación de óxidos de manganeso cerca de los poros que forma recubrimientos muy oscuros en sus paredes y en el material edáfico aledaño (Figura 6b).
2. Aunque en las secciones delgadas no se puede definir claramente la iluviación de arcilla, sí es evidente la movilización y la acumulación de este material en los poros de los suelos (Figura 6c). Por la forma en que se presentan estas acumulaciones puede pensarse en un movimiento masivo de la arcilla suspendida en agua que entró de forma casi torrencial a los poros, pero cuyo flujo se suspendió intempestivamente sin dar tiempo a la orientación de las láminas de la arcilla a lo largo de la pared del poro (Figura 6d).
3. En la mayoría de los suelos analizados es notable el poco desarrollo estructural que presentaban: había poca porosidad y ésta era básicamente planar-tabular. Sin embargo, en varios suelos se apreció la formación de microagregados, preferencialmente en forma de bloques angulares (Figura 6d).
4. Se observaron concreciones de hierro y manganeso y se evidenció la movilización y la acumulación de óxidos de hierro y manganeso a la manera de cutanes rellenando los poros o como concreciones en los paleosuelos (Figura 6e).
5. Aunque limitado, se evidenció un desarrollo estructural con algunos microagregados angulares (Figura 6f).
6. Se encontraron pocos componentes orgánicos en los paleosuelos, pero fue posible observar algunos, aunque su identificación fue difícil por las formas que presentaban; además, se encontraron semillas, tecamebas, polen y algunos fragmentos vegetales (Figura 6g).
7. En cuanto a los minerales, en algunos suelos fue posible diferenciar sus agregados formando un mosaico marcadamente pleocroico, o como minerales individuales bien conservados y sin rastros de meteorización, tales como circones, piroxenos o anfíboles (Figura 6f). También se detectaron líticos que hacen parte del material parental, como algunos granos de areniscas medias y gruesas. Las arcillas se caracterizaron física y químicamente mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) como montmorillonita, caolinitas, esmectitas e illitas (Figura 6j).

Conclusiones

Se confirmó la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las capas rojas inferiores y de las capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, en el Huila, Colombia. Macromorfológicamente y micromorfológicamente se observaron rasgos pedológicos como cutanes, espejos de falla, translocación de óxidos de hierro y manganeso y de carbonatos de calcio. Se observó la formación de estructuras de suelo y la generación de color a partir de procesos de transformación de minerales primarios y de translocación de sus productos a través de la matriz del suelo.

Se presentó una alta variabilidad espacial en las capas rojas del desierto estudiadas a lo largo de los transectos en los que se hicieron observaciones locales de perfiles tanto en el contenido, el espesor y la ubicación de los paleosuelos como de las capas líticas con las que estaban intercalados.

En la evolución de los paleosuelos se presentó un fuerte control climático (seco y estacional contrastado en humedad) y litológico (material parental sedimentario con minerales portadores de bases y de hierro). Estos controles generaron procesos pedogenéticos de iluviación, lixiviación, mineralización de la materia orgánica, solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica.

La intercalación de los paleosuelos con capas líticas de granulometría variable, sin pedogénesis, evidencia que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto.

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.702

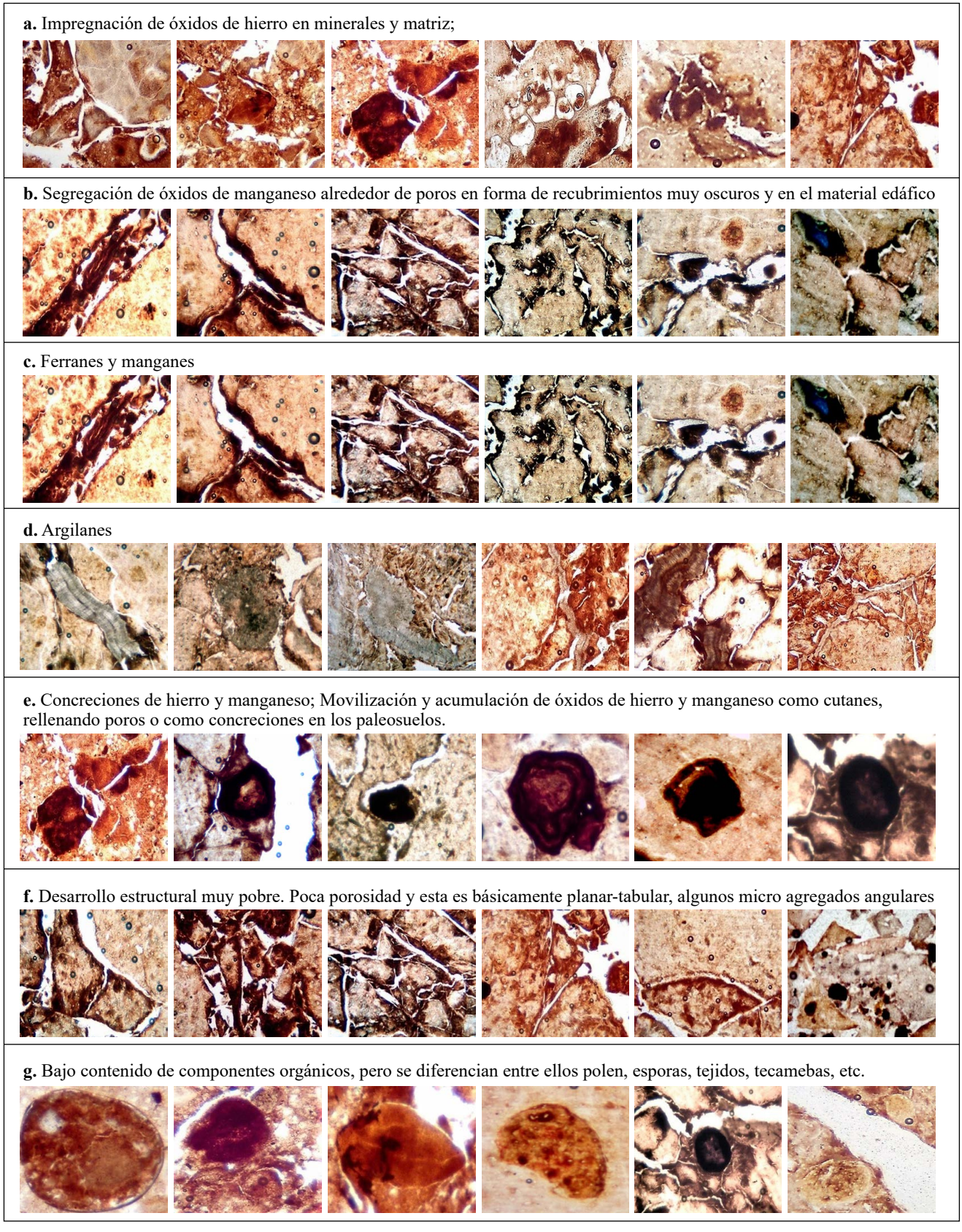


Figura 6. (Leyenda de la figura en la siguiente página)

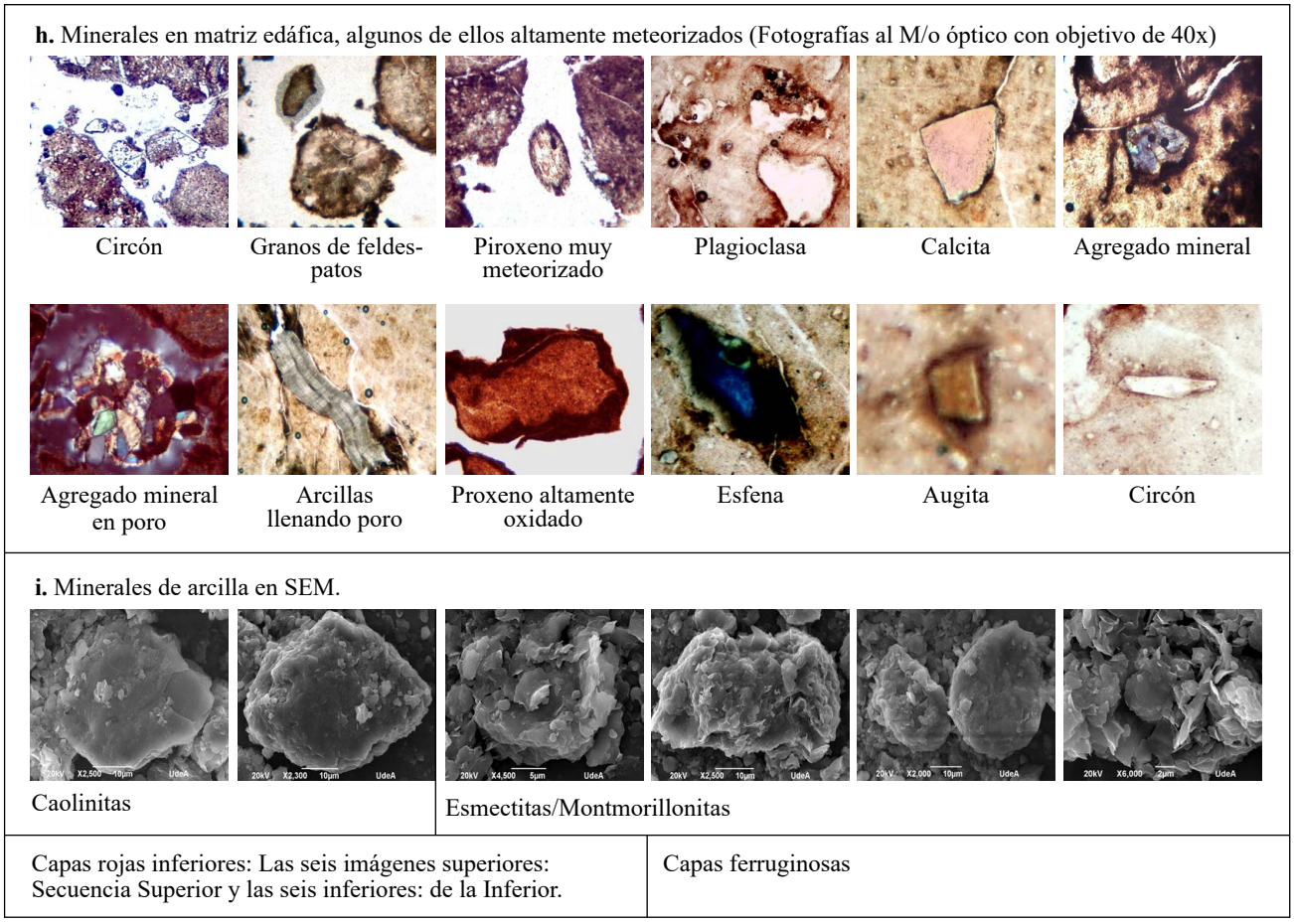


Figura 6. a. Impregnación de óxidos de hierro en minerales y matriz. **b.** Segregación de óxidos de manganeso alrededor de poros en forma de recubrimientos muy oscuros y en el material edáfico. **c.** Ferranes y manganes. **d.** Argilanes. **e.** Concreciones de hierro y manganeso; movilización y acumulación de óxidos de hierro y manganeso en forma de cutanes que rellenan poros, o como concreciones en los paleosuelos. **f.** Desarrollo estructural muy limitado, poca porosidad, básicamente planar-tabular, y algunos microagregados angulares. **g.** Bajo contenido de componentes orgánicos, aunque se detectaron entre ellos polen, esporas, tejidos, tecamebas, etc. **h.** Minerales en matriz edáfica, algunos de ellos altamente meteorizados (fotografías: microscopio óptico, 40x). **i.** Minerales de arcilla visualizados con microscopía electrónica de barrido (MEB).

Como mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa, se propone la liberación de hierro de los minerales primarios por meteorización o pedogénesis, su difusión dentro de la matriz del suelo y su posterior oxidación.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, en especial del Señor Decano, Arley Zapata, por el apoyo logístico; al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA, de la Universidad de Antioquia; al laboratorio GMAS$^{(+)}$ y al Sr. Jorge Arcila por su valioso acompañamiento durante el trabajo de campo.

Contribución de los autores

La base geológica y litoestratigráfica la realizó Luis Norberto Parra, el levantamiento de los suelos y paleosuelos y sus descripciones estuvo a cargo de María Teresa Flórez y Daniel Francisco Jaramillo. Los análisis de difracción de arcillas los realizó José María Jaramillo, la mineralogía de granos y en SEM la trabajaron María Teresa Flórez y Luis Norberto Parra, finalmente, la micro morfología en su conjunto la describió María Teresa Flórez. El análisis final de los resultados obtenidos de los levantamientos de campo, físico químicos, mineralógicos, micro morfológicos y de difracción de rayos X, fue discutida por todo el equipo de trabajo.

Conflicto de intereses

El articulo no tiene conflicto de intereses en su totalidad en autoría propia de los autores.

Referencias

Alexandrovskiy, A.L. 2007. Rates of soil-forming processes in three main models of pedogenesis. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. **24** (2): 283-292.

Buol, S.W. (2010). Evolution of the text Soil Genesis and Classification. Soil Survey Horizons. **51:** 116-117.

Craigh, D.C. & Loughnan, F.C. (1964). Chemical and mineralogical transformations accompanying the weathering of basic volcanic rocks form New South Wales. Aust. J. Soil Res. **2:** 218-234.

Fields, R.W. & Henao, L.D. (1949). Honda formation of the upper Magdalena river basin, Colombia, S.A. [abs.]: Geological Society of America Bulletin. **60:** 1894.

Fields, R W. (1959). Geology of the La Venta Badlands Colombia, South America. U. California, Publ. Geol. Scienc. **32** (6): 405-444.

Flórez M. T. (2000). Génesis de paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría, Medellín. p. 260.

Flórez, M.T., Parra, L.N., Jaramillo, D.F., Jaramillo, J.M. (2013). Paleosuelos del mioceno en el desierto de la Tatacoa. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **37** (143): 229-244.

González, L. H., Parra, L. N., Flórez, M. T. (1993). Andisoles fósiles en el Norte de Colombia. Suelos Ecuatoriales. **23** (1-2): 31-44.

Guerrero J. (1994). Stratigraphy, sedimentary environments, and the Miocene Uplift of the Colombian Andes. En: R.F. Kay, R.H. Madden, R.L. Cifelli, J.J. Flynn (editores). Vertebrate paleontology in the Neotropics: The vertebrate fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press. Washington D.C., USA. p. 15-43.

Henao, D. (1950). Geology of La Venta District: The fossiliferous area of the Upper Magdalena Valley. Informe No. 718, Ministerio de Minas y Petróleos, Sección 5a, Servicio Geológico Nacional, Bogotá, Colombia. 49 p, + 6 mapas, + 2 columna estratigráfica. Informe técnico, 13 de septiembre, 1950.

Herd, D. G. (1982). Glacial and volcanic geology of the Ruiz, Tolima volcanic complex, Cordillera Central. Colombia: Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas, No. 8. p. 48.

Kraus M. J. (1999). Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geo-logic applications. Earth Science Reviews. **47** Ž1999: 41-70.

Loughnan, F.C. (1969). Chemical weathering of the silicate minerals. American Elsevier Publ. Co. New York, p. 27-66.

Malagón, D., Pulido, C., Llinás, R., Chamorro, C. (1995). Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.

Malucelli, F., Terribile, F., Colombo, C. (1999). Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of Andosols on the Island of São Miguel (Azores). Geoderma. **88:** 73-98.

Mantilla G., De La Torre S., Gómez C., Ordóñez N., Ceballos J., Euscátegui C., Pérez P., Martínez N., Sánchez R., Maldonado N., Pérez S., Gaitán J., Chamorro C. & Flórez A. (2011). Los suelos: estabilidad, producción y degradación. Consultado en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/medioambiente/cap6.pdf

Morrison R. (1978). Quaternary Soil Stratigraphy. Concepts, Methods, and Problems. En: Cuaternary soil. Third York Quaternary Simposium. Geo Abstracts, Norwich, England.

Nettleton, W.D., Olson, C.G., Wysocki, D.A. (2000). Paleosols classification: Problems and solutions. Catena. **41:** 61-92.

Parra, L.N. (2016). Litoestratigrafía del Neógeno de La Tatacoa, Huila, Colombia. Informe de Año Sabático, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Inédito. 41 p.

Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. Geological Magazine. **107:** 501-504.

Pulido, C., Malagón, D., Llinás, R. (1990). Paleosuelos del piso alto andino en la región montañosa circundante a Bogotá. Investigaciones. V. 2, N° 2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 198 p.

Retallack, G. J. (1998). Core concepts of paleopedology. Quaternary International. **51-52:** 203-212.

Retallack, G. J. (2001). Soils of the Past. An introduction to paleopedology, Second edition. Blackwell, USA, 391 pp.

Sánchez, C., Salazar, J., Bonilla A. (2017). Estudio de las unidades pedogenéticas del Mioceno Medio en el desierto de la Tatacoa. En: Memorias XVI Congreso colombiano de Geología, Santa Marta, Colombia, agosto 28 - septiembre 01 de 2017, Bogotá, p. 1455-1456 pp.

Salazar-Jaramillo, S., Ochoa, A., Cadena, A., Guerrero, J. (2017). Geoquímica y climo-funciones aplicadas a paleosuelos del Mioceno Medio en el desierto de la Tatacoa. En: Memorias XVI Congreso colombiano de Geología, Santa Marta, Colombia, agosto 28 - septiembre 01 de 2017, Bogotá, p. 1455-1456.

Salomons J. (1989). Paleoecology of volcanic soils in the Colombian Central Cordillera (Parque Nacional Natural de los Nevados. In: Studies on tropical Andean ecosystems. Berlin. **3:** 15-217.

Schoeneberger, P.J. Wysocki, D.A. Benham, E.C., Broderson, W.D. (2002). Field book for describing and sampling soils. Version 2.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. Lincoln, NE. USA.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J.E., Vallejo-Gómez, E., González-Velázquez, A. (2001). Buried paleosols of Nevado de Toluca: An alternative record of Late Quaternary environmental change in Central México: Journal of Quaternary Science. **16:** 375-389.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, M.L., Werner, G., Poetsch, T. (2009). The Tlaxcala basin paleosol sequence: A multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. **26:** 448-465.

Shoji, S., Nanzyo M., Dahlgren, R. (1993). Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization, Elsevier, Science Publishers, Soil Survey Staff. 1999.

Soil Survey Staff (SSS). (1999). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, Second edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, p. 869.

Soil Survey Staff (SSS). (2014). Keys to Soil Taxonomy. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. 338 p.

Stirton, R. A. (1953). Vertebrate paleontology and continental stratigraphy in Colombia. Geol. Soc. Am. Bull. **64:** 603-622.

Thouret, J.C., A. Murcia, N. Vatin-Perignon, Salinas, R. (1985). Cronoestratigrafía mediante dataciones K/Ar y C-14 de los volcanes compuestos del Complejo Ruiz-Tolima y aspectos volcano-estructurales del Nevado del Ruiz, p. 292-452. Ingeominas y University of Grenoble, Sexto Congreso Latinoamericano de Geología, Medellín, Colombia, octubre 1985.

Universidad Surcolombiana (USCO). (2005). Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila-CAM-USCO.

Van Wambeke. (1991). Soils of the Tropics: Properties and appraisal, McGraw Hill, Inc., USA.

Young A. (1976). Tropical soils and soil survey, Cambridge University Press, Cambridge.

Carlos Enrique Ruiz

El viernes 23 de noviembre de 2018 se realizó la sesión solemne de posesión del Dr. Carlos Enrique Ruiz como Miembro Honorario de la Academia. La ceremonia tuvo lugar en el Óculo del Centro Cultural Universitario Rogelio Salmona de la Universidad de Caldas. La presentación del nuevo Académico Honorario estuvo a cargo del Académico y Rector de la Universidad Autónoma de Manizales, doctor Gabriel Cadena. El nuevo Académico Honorario dictó la conferencia "Lo que va y viene en el saber, el hacer y el esperar".

Lo que va y viene en el saber, el hacer y el esperar

Palabras al recibir la exaltación de "Miembro Honorario" de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; Manizales, "Centro de Ciencia F.J. de Caldas" (en el "Centro Cultural Universitario Rogelio Salmona", viernes 23 de noviembre de 2018).

Tomo en el título los tres elementos fundamentales de las preguntas formuladas por Kant al final de la "Crítica de la razón pura".

El entomólogo, estudioso de las hormigas y pionero de la sociobiología, Edward O. Wilson (n. 1929), expresó en libro suyo de 1999 que "la mayor empresa de la mente siempre ha sido y siempre será el intento de conectar las ciencias y las humanidades", en el sentido de una búsqueda incesante por la unidad del conocimiento. Apasionada pesquisa que tuvo como antecedente más notable, por las realizaciones científicas, a Alexander von Humboldt (1769-1859), quien en su monumental obra *Kosmos*, juicioso examen del mundo como una totalidad orgánica, se propuso el comprender la Naturaleza en sus conexiones e interdependencias desde el pensamiento, y llega a referirse a la poderosa unidad de sus fuerzas que induce desarrollo de la inteligencia con la necesidad de embellecer la vida, en simultaneidad con el crecimiento de las ideas y en sus maneras de generalizarlas. Incluso el sabio prusiano fue más allá, al avizorar relaciones entre *conocimiento, ciencia, poesía y sentimiento artístico*.

Quizá bajo esas premisas pueda ser de provecho estimar la idea de "puente", en tanto enlaces o nexos que faciliten el establecimiento de diálogos entre las cosas o las situaciones, entre los saberes y los sentires. Puente es palabra para explorar sentidos, con lugar en lo simbólico, sin caer en la superstición.

Puente puede ser la idea de un desempeño en la vida académica y cotidiana, con intentos no siempre fructuosos de acercar manos, mentes y voluntades entre ciencia-arte-humanismo. Pero no faltan las personalidades emblemáticas en ese acercamiento. En los presocráticos y en la Grecia Clásica hay ejemplos. En tiempos más recientes, Albert Einstein y Bertrand Russell son paradigmas, visibles ejercitantes en aquella anhelada convergencia, con expresión de sociedad. Con sucesores de la talla de David Bohm, Rita Levi-Montalcini, Stephen Hawking, Roger Penrose, Edward O. Wilson, Richard Dawkins… con antecesores hispánicos como Miguel Servet y Santiago Ramón y Cajal.

Entre nosotros y en los tiempos que corren hay académicos ejercitantes en esa congregación. Baste citar los nombres de Rodolfo Llinás, José-Félix Patiño, Jorge Arias de Greiff, Julio Carrizosa, Fernando Sánchez Torres, Moisés Wasserman, Darío Valencia-Restrepo, Manuel Elkin Patarroyo, Antanas Mockus, José Fernando Isaza, Guillermo Páramo, Fernando Zalamea Traba, Carlos-Augusto Hernández. Guillermo Rendón García, Gustavo Wilches Chaux… cito tan solo a quienes he sentido en más cercanía.

Los medios más propicios en esa conexión suelen ser la literatura y la filosofía.

De recordar en Platón que, al regresar Ion de Epidauro con el primer premio en la confrontación de rapsodas de los juegos de Asclepio, Sócrates lo somete a un examen de reflexión acerca de su singularidad en el conocimiento casi exclusivo de la obra de Homero y le pregunta por la naturaleza de las varias artes, la pintura, la escultura, la música, y por las razones que tuvo para tratar de modo diferente a los poetas Hesíodo y Arquíloco, en especie de subvaloración. La manera de proceder de Sócrates, al ir hilando en motivos y razones, le lleva a estimar que en el arte de la poesía la inspiración y el entusiasmo permiten componer los bellos poemas a los poetas épicos y a los líricos, sobrecogidos por la armonía y el ritmo. Pero, además, parece dar privilegio al conocimiento especializado, para el caso el dominio de la obra de Homero por parte de Ion (cf. Platón: *Ion o de la poesía*).

Hay un poema de Marta Traba (1930-1983), con la inspiración y el entusiasmo anotado por Sócrates, perteneciente a su libro *Historia natural de la alegría* (1952) que me ha inquietado como ingeniero de caminos y como encadenador de palabras, que lleva por título "Los puentes", en el cual explora las maneras de percibirlos por las ciudades que tienen sus ríos, en coronación celebrada de "azogue y piedra". Pero que también en su nervadura se asoman a la copa del aire, que juegan con husos fantásticos y arpas de la noche.

Especie de cinturones para cuidar la castidad de las aguas en su estrechez, con el gozo de los días. Y, es más, las aguas se orientan hacia los puentes, y estos no son sus salvadores, y en ese fluir manifiestan desde lo hondo luces entre rojas y amarillas, para competir con la forma de aquellos.

Pero lo más llamativo del poema es cuando se refiere a ese tender, de manera curva, un brazo frágil en mitad del agua, en los contrastes del día entre sol y sombra, con realce de especie de castillos de espejos, con vista de las riberas entre la piedra, el limo y lo verde. Y al pasar por el puente, quienes lo hacen parecen arrojar lo sombrío de consignas que la noche despeja. Y si es en la ciudad, el puente resulta ser confluencia de las calles, aún las del sombrío padecimiento.

El misterio del poema parece resolverse al final, cuando aflora la música, la proyección sobre el agua de construcciones catedralicias, en ciudades herederas del medioevo, signo de frustración, en contraste con el renacer de la alegría y de la esperanza, de la ternura sin comunicarse, y de aquella luz recogida en las manos.

Los puentes de Marta Traba engloban el mundo del acontecer diario, con sentido del pasar, también del detenerse en percibir, dolerse y disfrutar. Percibir lo que ocurre, y desentrañar sensibilidades en los entornos. Es decir, los puentes son ocasión de diálogo, incluso en el silencio, o en el bullicio de la tragicomedia cotidiana.

Simplista sería entender el puente como mera conexión de un lugar a otro, con sentidos opuestos. Lo trascendente es la comunicación compleja y ramificada en ese transitar, y de manera continua. Un mundo de sucesiones en medio del oscilar del día en sus factores, y en el transcurrir del río como la vida, como la historia.

Podría pensar que es una manera simbólica de referir conexiones entre el mundo real y la fantasía, entre lo explicable por razones científicas y técnicas, y lo articulado con la palabra en las múltiples maneras de interpretación imaginaria. Aparece el pensamiento en las formas de manifestarse con razones y con metáforas. Los sentidos compiten, de por medio con la música, el musitar del agua, la canción del viento. La naturaleza cobra expresiones de diversidad, motivo del trabajo de unos y otros, en la ciencia, el arte, las ideas... el humanismo.

La idea de "puente" que he tratado de desentrañar a partir de un hecho poético, tiene conexidad con la metáfora del "anfibio cultural" creada por Antanas Mockus en 1994, en tanto se alude a la persona idónea en varias tradiciones culturales, con capacidad de interpretarlas y de favorecer la comunicación entre ellas, es decir, la interculturalidad, y, de una manera más general a propiciar la circulación del conocimiento, una vez seleccionado, jerarquizado y adaptado. Una formación de esa naturaleza facilita el comprender aspectos de la realidad social. El mismo Antanas asigna como deseo esa cualidad de "anfibio cultural" al educador, en todos los niveles.

El biólogo evolucionista Richard Dawkins, de prolífica, calificada obra, con "sobrecogedora destreza literaria", como la calificó el *Wall Street Journal*, dedicó su libro *Destejiendo el arcoíris* (2000) a desentrañar relaciones entre la ciencia y la poesía, en términos de la ilusión y del deseo de asombro. En ella escudriña con detalle aspectos de la expresión de baluartes de la poesía, con la tesis de los poetas poder ser mejor si echaran mano de la inspiración y del espíritu que alienta a los científicos, en la condición de la ciencia permitir el misterio, pero no la magia. E incluso favorece la estima de 'ciencia poética' con base en los logros maravillosos de la ciencia, que dan para la emoción y para la elaboración expresiva en términos afines con la sensibilidad poética, de los artistas en general.

Dawkins aprovecha la expresión de Keats quien se refirió con desdén a Newton por supuestamente haber destruido la poesía del arcoíris al reducirlo a un prisma en un cuarto oscuro para demostrar que la luz blanca corresponde a una combinación de colores distintos, como también haber llegado a comprender el efecto de la refracción de la luz en las gotas de lluvia. Dawkins, con ese motivo, hace disertación didáctica con recurso de la teoría ondulatoria de la luz, y en su evolución con la teoría cuántica, que conduce a entender el tejido del arcoíris como integración de componentes de diferente longitud de onda. Y, en consecuencia, a conocer que "la luz blanca es una mezcla desordenada de longitudes de onda, una cacofonía visual", en su expresión.

Apela a versos también de Wordsworth y de Coleridge, con la misma referencia del arcoíris, para exponer que quizá sus expresiones hubiesen sido mejores de conocer ellos algo de la ciencia que permite comprender ese fenómeno, sin detrimento de la bella ilusión que da soporte a los versos. Por supuesto que Dawkins es en extremo ambicioso en esa consideración.

También Dawkins incursiona en el trabajo de filósofos en sus observaciones sobre las estrellas, como en el caso de Auguste Comte al declarar este la imposibilidad de conocer la composición de las estrellas. Dawkins acude a la teoría de las "líneas de Fraunhofer", o código de barras, de más refinada explicación por la teoría cuántica. Y al asumir estos desarrollos, Dawkins confiesa ser atraído por la poesía de la teoría cuántica.

Pero Dawkins en su obra da pasos para distinguir la "poesía buena" de la "mala poesía", y alude a la "ciencia poética", con los mismos apelativos de buena y mala. Su enfoque se encamina a mostrar lo funesto que es que escritores científicos o seudocientíficos apelen a escrituras literarias seductoras, para atraer incautos hacia la aceptación de teorías endebles o erróneas. Escudriña con acierto en autores que le permiten corroborar su saludable intención, con algunos seducidos por la "magia homeopática" que llama James Frazer, con ramificación en teologías como ocurre en el caso de Teilhard de Chardin en su obra *El fenómeno humano* que Dawkins califica, con Peter Medawar, de "quintaesencia poética mala".

Es necesario diferenciar lo que es la poesía en la ciencia y lo que corresponde a la literatura. En esta el dominio corresponde a lo simbólico, a lo alusivo y metafórico que, aunque parte de la ineludible realidad es motivo de recreaciones de fantasía y crípticas. No resulta válido exigirle a la poesía literaria ser fiel a los postulados y teorías científicas, o de estar apegada a la realidad tal como es, o como es interpretada y descrita por los científicos. Aun cuando cabe estimar la poesía realista que con belleza formal y rítmica alude aspectos del mundo real. Una cosa es la poesía en sí y otra, muy distinta, la ciencia con su estructura lógica, secuencial en la búsqueda de la verdad. La poesía literaria no tiene por qué ajustarse a esos patrones.

Dawkins lo ha señalado muy bien, cuando estudia casos de veleidades literarias en la ciencia, con escape a las razones válidas para la afirmación en conocimientos comprobados, o en procesos de encontrarse. Y ahí resulta válida la figura de "ciencia poética mala".

En tema de esta naturaleza es de recordar el estudio de una personalidad de la ciencia y el humanismo como lo fue Pedro Laín-Entralgo (1908-2001). En su ensayo *Poesía, ciencia y realidad* (1952), asume con sentido de equilibrio la exposición donde delimita campos de la ciencia y la poesía literaria, con ejemplos de escritores connotados como Federico García-Lorca y Fray Luis de León, con parangón entre ellos. Lo de rescatar de ese ensayo es su especulación sobre la "verdad objetiva y exacta" y las "verdades subjetivas y metafóricas", en especie de confrontación de experiencias de la realidad. Invoca, no sin utopía, la colaboración del "conocimiento científico" y del "conocimiento poético", para una mejor comprensión de la realidad.

No trato de seguir este hilo interminable en la fascinación del científico con sus hallazgos, sino de mostrar que en la ciencia misma hay frecuentes motivos para avivar la sensibilidad que lleve a la alegría, pero no a la satisfacción plena, puesto que el camino de la ciencia es arduo, siempre hay motivos para la duda y para desentrañar pasos adelante, con aprendizaje del error. Esa sensibilidad es colindante con la poesía, pero con clara diferenciación. Mientras por un lado está el dominio de la razón, por el otro está lo fascinante en lo creativo, como recurso de expresión en el lenguaje. Un caso representativo de bella poesía, en general críptica, desapegada de cualquier forma de lógica, es *Residencia en la tierra* (1933) de Pablo Neruda.

Trato de significar que la sensibilidad de un lado y de otro lo que permite es establecer el puente, aquella idea de la interconexión de ciencia y humanismo, con expresividad creativa en ambos campos, en singularidad en cada caso, pero sin identificar lo poético como causal o efecto en la ciencia, sino como dechado del logro.

La noción de puente es de precisar y de ejercer, en su difusa existencia, puesto que no basta con unir dos riberas, en medio o por encima de lo que fluye. Es indispensable aceptar lo etérea y heterogénea de esa noción, así en lo físico podamos apreciar geometrías estructurales, en algunos casos de gran belleza, puestas ahí. Por ejemplo, lo poético de la ciencia podría hacer puente con lo poético literario, y aún lo poético filosófico, en tanto el uso de expresiones o figuras metafóricas, meramente alusivas, o en los logros de impactante belleza, o de conmovedora realidad.

Ciencia y humanismo tienen más posibilidades de interconexión, de diálogo, por los canales de comunicación que les resulta ser propios, con los artificios de la palabra y el pensamiento. Es natural, por ejemplo, que científicos al avanzar en sus desarrollos tengan que apelar a la filosofía, en conocimiento de la historia, incluso en técnicas de comunicación de hallazgos, y por las dudas y los fracasos. Einstein es el más protagónico en esos encuentros, de gran convergencia. La formulación incesante de preguntas, como método en la detección de problemas, conduce a la proximidad con las formas del pensamiento, en su pasado y presente. Por esa vía hay camino a lo que Goethe de manera intuitiva concebía como unidad que subyace en la Naturaleza, además de considerar que la mente humana tiene la disposición de abordar la esencia de todos los fenómenos. Y fue de igual modo protagónico en la alianza –incluso "fusión"- de ciencia y arte, lo que se demuestra en obras como el *Fausto*, en *Las afinidades electivas* o en su poema *La metamorfosis de las plantas*.

Humboldt y Goethe leyeron juntos, en su momento, el poema *The loves of the plants*, del médico y científico Erasmus Darwin, abuelo de Charles, con versos de "violetas enamoradas, primaveras celosas y rosas ruborizadas", que acogían la teoría de Linneo sobre la clasificación sexual de las plantas. Otra evidencia de ese acercamiento, incluso "fusión", resaltado por Goethe en términos de simultaneidad admirable de naturaleza e imaginación, "poderosa y profunda" (cf. Andrea Wulf, *La invención de la Naturaleza – El nuevo mundo de Alexander von Humboldt*, 2015).

Asimismo, la figura de puente podría conducirnos, quizá, a la idea de unidad del conocimiento o consiliencia, expuesta por Edward O. Wilson, en obra fundamental de nuestro tiempo (cf. *Consilience – La unidad del conocimiento*, 1999), como ambición de dar salto en la conexión de todo lo basado en varias disciplinas, con base en hechos y teorías, para llegar a un campo común de comprensiones, bajo la misma señal de Einstein de alcanzar la unificación del conocimiento, como cuestión fundamental.

Para terminar, volvamos a Marta Traba en su poema "Los puentes", donde expresó:

> "Los he visto, paisajes, puentes, música, capiteles del día, iniciando el inacabable renacimiento de la alegría"

Nota: una versión preliminar de este discurso fue publicada por la *Revista Aleph* en http://www.revistaaleph.com.co/desde-aleph/595-palabras-en-la-posesion-de-cer-miembro-honorario-en-accefyn.html

Fernando Zalamea Traba

El martes 4 de diciembre de 2018 se realizó en la sede de la Academia la sesión solemne de posesión del doctor Fernando Zalamea Traba como Miembro Honorario de la institución. La presentación del nuevo Académico Honorario estuvo a cargo del Académico doctor Andrés Villaveces. Hicieron uso de la palabra además el Académico de Número doctor Carlos E. Vasco y el Profesor Titular de la Universidad del Rosario doctor Carlos Alberto Cardona.

El nuevo Académico Honorario dictó la conferencia **"Nuevos caminos para la filosofía a partir de la obra matemática de Grothendieck".**

Me permito agradecer en primer lugar a los doctores Enrique Forero, por imaginar mi eventual entrada a la Academia, Luis Carlos Arboleda, por apoyar mi candidatura, Andrés Villaveces, por su extremadamente fina presentación de mi obra, Carlos Vasco, por su incisivo y divertido diálogo con mis trabajos, Carlos Cardona, por su extraordinaria generosidad de siempre. Es para mí un alto honor acompañarles en esta prestigiosa Institución, y agradezco sinceramente su gesto de reconocimiento. En segundo lugar, presento mis excusas a los Miembros de la Academia por tomar posesión con el título de Académico Honorario, sin haber recorrido previamente una escala de méritos intermedios. En mi vergüenza, me escudo en una *unicidad* de la que me puedo sentir orgulloso: soy el único profesor en la historia de la Universidad Nacional de Colombia en haber publicado seis libros en la Facultad de Ciencias, tres en la Facultad de Ciencias Humanas, uno en la Facultad de Artes, dos a nivel central de la Editorial de la Universidad y dos a nivel de Rectoría. Es posible que esa *cantidad diversificada* sea única también en la Academia Colombiana, y amparo entonces mi vergüenza en esa peculiar circunstancia.

En cuanto a la *calidad*, como todos los científicos, pensadores y escritores lo sabemos, solo el curso del tiempo, unas cuantas décadas después de nuestras muertes, medirá la relevancia, o más bien la irrelevancia, de nuestras obras. La fragilidad de la condición humana nos pone a cada uno de los aquí presentes ante un ventanal estructural de tiempos largos, donde los vientos huracanados de la historia, en la imagen de Walter Benjamin, asolarán sin duda la coyuntura de nuestras vanas alegrías actuales. Entre los grandes Maestros que en cambio vivirán por siempre, la figura de Alexander Grothendieck (Berlín 1928 - Saint-Girons 2014) es aquella del matemático más cercano a nosotros que ha ya saltado a la estirpe de los inmortales. En esta breve alocución, presentaré, en una *primera parte*, los rasgos esenciales de la obra matemática de Grothendieck, y, en una *segunda parte*, argumentaré cómo algunos de sus aportes matemáticos mayores pueden llegar a tener una honda influencia en la filosofía y en la cultura del siglo XXI.

Primera parte

Entre abril 20 de 1987 y abril 2 de 1988, acercándose a sus 60 años, en Mormoiron, un pueblo miserable en la oscura provincia francesa, Alexander Grothendieck escribe su *Llave de los sueños*, uno de los últimos grandes tratados del alma en nuestros tiempos y una extraordinaria requisitoria de mil páginas en contra de la degradación de los valores en el mundo occidental. Activista radical, fundador de los primeros movimientos ecologistas en los años 70, líder de proyectos comunitarios, agricultor en su propio jardín, Grothendieck combina el aprecio de las cosas más sencillas y materiales, con la ambición de encontrar un soplo espiritual universal detrás de la diversidad. Explorador profundo de la psiquis, Grothendieck registra más de mil sueños, y efectúa un análisis detallado de cerca de trescientos de ellos. La riqueza multiplicativa de sus ideas cubre la historia, la fenomenología, la metafísica, así como el psicoanálisis, la sociología, la mística, mientras se sumerge en una suerte de conciencia cósmica y busca una armonía universal general detrás de las concreciones particulares más extremas. Un diálogo natural ocurre con las *Hojas de hierba* de Whitman y con el *Moby-Dick* de Melville. Muchos de los pasajes de la *Llave de los sueños* alcanzan un lirismo sobrecogedor, donde la fragilidad de la condición humana se acopla con la inmensa riqueza creativa de la humanidad.

Todo Grothendieck puede resumirse en ese vaivén pendular entre lo particular y lo universal, lo concreto y lo abstracto, lo obstruido y lo transitable, lo singular y lo suave, lo diabólico y lo angélico. Su vida puede dar lugar a varias novelas, entre las cuales contamos ya con la notable *Coronel Lágrimas* (2015) del joven escritor costarricense Carlos Fonseca. Hijo de padres anarquistas, Grothendieck es recluido de niño con su madre en un campo de concentración, y, a los 20 años, termina su carrera de matemáticas en Montpellier, sin saber entonces, según su testimonio en *Cosechas y siembras* (1983-1986), lo que eran un grupo o un espacio topológico. Por otro lado, en los años de Montpellier, mientras trabaja de labriego en los campos, reconstruye por su cuenta la medida de Lebesgue, de la cual desconocía su existencia, lo que demuestra un talento matemático innegable que por suerte detecta un inspector de matemáticas en provincia, quien le ofrece una beca de estudios para París. En toda su ingenuidad e ignorancia, Grothendieck desembarca en el *Seminario Cartan* de la Escuela Normal Superior, y muy pronto, en un año (1948-1949), se pone a la par de sus maestros,

quienes en ese momento formaban el corazón de Bourbaki. Grothendieck pregunta demasiado, Cartan se cansa del alumno indisciplinado y lo envía a Nancy, a hacer su tesis doctoral bajo el férreo régimen de Laurent Schwartz y Jean Dieudonné. La increíble historia posterior es bien conocida: para calmar el frenesí de su discípulo, Schwartz y Dieudonné le asignan una lista de catorce problemas abiertos que Schwartz (Medallista Fields el año siguiente) no había podido resolver. Al año, Grothendieck los ha resuelto todos y tiene a su haber, según el testimonio de Schwartz, numerosas investigaciones que podrían valerle por varias tesis doctorales. Así, en tres años, Grothendieck pasa de no saber qué era un espacio topológico a convertirse en el mayor especialista mundial de los espacios vectoriales topológicos. Según Dieudonné, Grothendieck solo resulta ser comparable con Banach. La medida de su talento fuera de lo común es ya incontestable a sus 25 años.

Pero todo está aún por venir. En su primer postdoctorado, en Sao Paulo, escribe su *Resumen de la teoría métrica de los productos tensoriales topológicos* (1953), donde inventa la teoría fina de los espacios de Banach, caracteriza a los espacios de Hilbert como espacios reflexivos que son además *L*-subespacios y *C*-cocientes, y descubre la constante de Grothendieck que gobierna el retículo de las 14 normas naturales posibles en los productos tensoriales de espacios de Banach. Dos años más tarde, en su segundo postdoctorado, en Kansas, escribe el gran artículo *Sobre algunos puntos del álgebra homológica* (1955-56) y sienta las bases de su *prueba generalizada de Riemann-Roch* (1955-1957). El artículo sobre el álgebra homológica explora el uso efectivo de la teoría de categorías en la matemática, y, según Mac Lane, el fundador de la teoría, emerge entonces "la noción de teoría de categorías como un tema propio de estudio" bajo la influencia de Grothendieck. El artículo (de 100 páginas, Grothendieck siempre se entregará al máximo) es aún hoy en día una de las mejores introducciones al tema. Allí presenta las nociones de equivalencia y adjunción, inventa las categorías abelianas, unifica la cohomología y la serie de funtores derivados de funtores de módulos, y resuelve en abstracto la existencia de suficientes inyectivos mediante la primera aparición de generadores y axiomas infinitarios en teoría de categorías. Por otro lado, el teorema de Riemann-Roch (1857) aseguraba un enlace entre un invariante geométrico natural de una superficie (el género, asociado al número de cortes que tornan disconexa la superficie) y un invariante armónico diferencial de la misma (la resta de dimensiones entre el espacio vectorial de meromorfas definibles sobre la superficie y el espacio de holomorfas), es decir, ofrecía un enlace profundo entre la magnitud (ámbito de la geometría) y el número (ámbito de la aritmética y el álgebra). En su prueba generalizada de Riemann-Roch, Grothendieck encuentra un invariante superior, del que se derivan tanto el género como la armonía diferencial. La *K*-teoría engloba ambos aspectos y se convierte en el corazón de la geometría algebraica.

Para precisar un poco más la fuerza técnica de las matemáticas en juego, debemos ahora abordar la noción de *haz*, sobre la cual Grothendieck se refiere así en *Cosechas y siembras*: "(...) la idea novadora esencial fue aquella de *haz* (...). Fue esa la idea maestra de una transformación profunda en nuestra aproximación de los espacios de todo tipo, y con seguridad una de las ideas más cruciales aparecidas a lo largo del siglo". Los haces, inventados por Jean Leray en un campo de concentración, en 1942, constituyen de hecho la noción matemática más simple posible para poder hablar de transferencias y obstrucciones entre lo local y lo global. Un haz consiste de dos espacios topológicos, un espacio alto que se proyecta sobre un espacio bajo, de tal manera que el alto se vea *desplegado* sobre el bajo, o el bajo se encuentre *plegado* desde el alto (esto se asegura postulando que la proyección es un homeomorfismo local). El entendimiento del haz se reduce a comprender su comportamiento *vertical* (estudio de las preimágenes de un punto en el espacio bajo, denominadas *fibras*) y su comportamiento *horizontal* (estudio de las preimágenes de una *vecindad* en el espacio bajo, denominadas *secciones*). El problema básico consiste entonces en preguntarse cuándo es posible (o imposible) pegar distintas secciones *locales* (sobre vecindades acotadas) para llegar a una sección *global* (sobre todo el espacio, o, al menos, una parte amplia del mismo). Los haces ocurren por doquier: en variable compleja, geometría diferencial, topología, grupos y anillos, conjuntos ordenados, categorías. Los *haces coherentes* de Serre (1955) fueron en particular una gran inspiración para Grothendieck: la idea consiste en iterar la noción de haz, y tomar un haz de módulos sobre un haz de anillos, donde todas las conexiones son lo más *suaves* posibles (módulos de tipo finito sobre las fibras, núcleos de tipo finito para los morfismos entre las fibras). El *grupo de la K-teoría* se define como el grupo libre generado por los haces coherentes sobre una variedad, y con ello Grothendieck demuestra que el género y la armonía diferencial compleja no son más que instancias particulares de una *K*-teoría general que las recubre. Yendo aún más allá, la emergencia de los haces en lógica, gracias al trabajo *Lógica de los haces de estructuras* (1995) de nuestro Maestro y Honorable Miembro de la Academia, Xavier Caicedo, constituye en mi parecer el aporte más alto de la historia de las matemáticas en Colombia.

Uno de los principios metodológicos fundamentales de Grothendieck se resume en una *doble iteración*, en el tránsito del "en-sí" al "en-múltiple". Dos tradiciones se contraponen en el pensamiento occidental: por un lado, el *análisis*, que pretende entender por descomposición, explora el interior de un objeto y busca sus elementos constitutivos, y, por otro lado, la *síntesis*, que espera entender por composición, explora el exterior de un objeto y busca sus relaciones constituyentes. En los fundamentos de las matemáticas, el análisis –"en-sí"– ha dado lugar a la *teoría de conjuntos*, la síntesis –"en-múltiple"– ha dado lugar a la *teoría de categorías*. En categorías, un objeto se entiende entonces

por sus correlaciones con el medio ambiente, por su "aura" (lo que llamamos un funtor representable); pero yendo aún más allá, el objeto debe entenderse por su inmersión en una categoría de objetos similares. El "en-sí" se rompe dos veces, al pasar de lo analítico singular a lo sintético plural (funtor representable) y a lo sintético general (categoría de prehaces). En el caso de las *categorías de haces*, Grothendieck encuentra una fascinante polaridad (y en realidad una ortogonalidad), dependiendo de la estructura que se admita en las *fibras* de los haces. Si nos situamos en haces cuyas fibras son grupos abelianos, obtenemos las *categorías abelianas*. Si nos situamos en haces cuyas fibras son conjuntos, obtenemos los *topos*. Si nos situamos en haces sobre modelos de Kripke cuyas fibras son estructuras arbitrarias de tipo fijo, obtenemos la lógica de los haces de Caicedo.

Nos acercamos así a la que es posiblemente la mayor invención de Grothendieck: *la teoría de topos*. En su conferencia del Congreso Internacional de Matemáticos de Edimburgo (1958), Grothendieck vislumbra una idea genial que le mantendrá ocupado en la siguiente década de su vida. Uno de los problemas centrales de las matemáticas había sido expresado una década antes en las conjeturas de Weil (1949), que pretendían contar el número de puntos de curvas sobre cuerpos finitos, mediante una extensión abstracta de la función Zeta de Riemann. Los trabajos pioneros de Lefschetz (1926) habían encontrado una conexión entre cálculos de puntos fijos (aplicables a posteriori a las conjeturas de Weil) y cálculos homológicos. En la época de Grothendieck se requería entonces la construcción de una cohomología adecuada para resolver las conjeturas de Weil, y he aquí cómo la presenta Grothendieck en su conferencia de Edimburgo: "una tal aproximación recientemente se me reveló por las *conexiones entre la cohomología de haces y la cohomología de grupos de Galois, por un lado, y por la clasificación de los cubrimientos no ramificados de una variedad, por otro lado*". De repente, en tres líneas, seguramente las tres líneas más visionarias de la matemática del siglo XX, Grothendieck descubre una *conexión esencial entre Galois y Riemann*, origen de la *teoría de esquemas* y de la *teoría de topos*, que renovarán enteramente la geometría algebraica, y la matemática, hasta nuestros días. De hecho, adentrándose en los más profundos problemas de la aritmética, mediante la noción de *topos étale de un esquema* (Grothendieck, 1962) se resolverán las conjeturas de Weil quince años después, y mediante la noción de *topos aritmético* (Connes, 2014) se tiene hoy en día, por vez primera en la historia de las matemáticas, una aproximación estructural seria y esperanzadora para resolver la hipótesis de Riemann.

En 1958, Dieudonné es invitado a iniciar un Instituto de Altos Estudios Científicos en París, pero este condiciona su entrada, con su generosidad habitual, a que el Instituto le ofrezca a Grothendieck un contrato paralelo. *El IHES* se convierte entonces, en la década de los años sesenta, en la Meca de las matemáticas a nivel mundial. Será el espacio de la detenida y muy extensa construcción (cerca de 7500 páginas) de los esquemas (*EGA*, 1959-1964, junto con Dieudonné) y de los topos (*SGA*, 1960-1969, junto con una escuela de brillantes alumnos). Los *esquemas* surgen directamente de conectar los anillos de holomorfas y meromorfas según Riemann con los anillos de enteros algebraicos según Galois y Dedekind, bajo la perspectiva universal de los haces. Generalizando la situación y partiendo de un *anillo conmutativo unitario arbitrario*, Grothendieck considera el espectro de sus ideales primos, convertido en espacio topológico con la topología de Zariski, y despliega sus fibras a lo largo de los *anillos locales* asociados con cada primo. Con ello, se obtiene el haz de representación de un anillo, denominado *esquema afín* por Grothendieck. Un esquema resulta ser entonces un haz que localmente se comporta como un esquema afín, o, dicho de otra manera, un haz que se consigue como adecuado *pegamiento* de esquemas afines. Yendo aún más allá y siguiendo las técnicas de Grothendieck, los esquemas deben ser entendidos "en-múltiple", a través de *categorías* de esquemas similares; los morfismos entre esquemas pueden ser muy variados, pero si estos se restringen a unas *mínimas condiciones de suavidad* (fibras constituidas por puntos aislados cuyos cuerpos residuales son extensiones finitas y separables) se obtienen los morfismos étales (*"étale"* proveniente de "liso", sin arrugas, en referencia a un verso de Víctor Hugo sobre el mar étale, liso después de una tempestad).

Por otro lado, los *topos* surgen de otra generalización directa, tan sencilla como profunda, allende la noción analítica de espacio topológico. En vez de considerar cubrimientos conjuntistas del espacio mediante abiertos, Grothendieck considera cubrimientos sintéticos del espacio mediante morfismos. En una categoría arbitraria, una *topología de Grothendieck* consiste en darse localmente colecciones de flechas sobre los objetos, que satisfagan las más simples condiciones imaginables de cubrimiento: (*i*) una identidad cubre un objeto, (*ii*) un cubrimiento de cubrimientos es cubrimiento, (*iii*) un cubrimiento halado hacia atrás proporciona un cubrimiento. Una categoría dotada con una topología de Grothendieck se denomina un *sitio*, y pueden pensarse todos los haces sobre ese sitio. De la misma manera como un espacio topológico "en-sí" se entiende mejor gracias a la categoría "en-múltiple" de todos los haces sobre él, un sitio se entiende mejor gracias a la categoría de todos los haces posibles sobre él. Por definición, *un topos de Grothendieck* es una categoría equivalente a una categoría de haces sobre un sitio. Partiendo de un esquema dado, la colección de todos los morfismos étales sobre el esquema forma una topología de Grothendieck, lo que da lugar *al topos étale del esquema.* Con la topología *étale* se obtienen finas herramientas cohomológicas, que permiten desglosar cálculos diferenciales con nilpotentes y que permiten resolver las conjeturas de Weil. Los *topos* de Grothendieck poseen una estructura elemental (es decir, expresable en primer orden) detectada por Lawvere en los años setenta,

pero Olivia Caramello ha demostrado en años recientes cómo un regreso a los *topos* originales de Grothendieck provee una teoría de modelos mucho más rica que aquella codificada en los topos elementales de Lawvere.

En 1970, a los 42 años, un Grothendieck *estallado* –exhausto después de dos décadas de trabajo sin igual, desencantado de la comunidad matemática, necesitado de una honda vida espiritual– protesta contra el presupuesto del *IHES,* que resulta estar apoyado por fondos militares, y se retira abruptamente del Instituto. Su ecologismo radical, alrededor del movimiento *Sobrevivir y vivir* (1970-1975), ocupa mucho de su tiempo, pero continúa aún muy presente en matemáticas, con largas giras de conferencias donde combina técnica y activismo. A partir de 1973, vuelve a Montpellier, ahora como profesor, donde ejerce una influencia considerable (9 tesis doctorales dirigidas en el supuesto periodo "obscuro" 1971-1976, versus 7 en el periodo "de gloria" 1961-1969). En la provincia, crece su necesidad de una vivencia espiritual profunda, y se retira progresivamente de la comunidad. No obstante, en condiciones casi paupérrimas, la década 1981-1991 ofrece un inesperado renacimiento en la vitalidad inventiva de Grothendieck, con algunas de sus creaciones más originales. Después de sus aportes en *geometría algebraica,* donde las herramientas algebraicas se ponían a disposición de la geometría, Grothendieck *invierte* las perspectivas, e inventa un arsenal de nuevos conceptos y técnicas para el álgebra topológica, donde las herramientas topológicas se ponen ahora a disposición del álgebra. De esta manera, el espacio y el número entran en un *back-and-forth* completo, donde confluyen las técnicas más sofisticadas de la matemática contemporánea.

Detrás de la profusión de topologías y de cohomologías, en los años sesenta, Grothendieck había postulado la existencia de una suerte de arquetipos integrales, los *motivos*, de los cuales pudiese derivarse la multitud diferenciada de los tipos cohomológicos. *Las conjeturas estándar* (1968) proponían un marco técnico preciso para controlar parte del programa motívico. El objetivo consistía en construir una suerte de aritmética universal, que explicara en parte la enorme riqueza de la aritmética usual, gracias a un entendimiento categórico del grupo de Galois absoluto $Gal\ (\bar{Q} : Q)$. En *La larga marcha a través de la teoría de Galois* (1981), Grothendieck se adentra en el estudio concreto de los espacios *moduli* (clases de equivalencia de superficies de Riemann) e intenta capturar la acción del grupo de Galois absoluto sobre la torre compleja de los espacios *moduli*. Un estudio algebraico de la torre le lleva a introducir el *grupo fundamental algebraico* de una variedad, definido como compleción profinita del grupo topológico fundamental de la variedad, y le hace preguntarse cuáles variedades pueden ser enteramente caracterizadas por el conocimiento de su grupo fundamental algebraico. Las variedades que pueden serlo son denominadas variedades *anabelianas*, y Grothendieck conjetura que las variedades *anabelianas* sobre los racionales son esencialmente los espacios *moduli*. El caso particular de las curvas hiperbólicas sobre campos de números es resuelto por Mochizuki (1996) y, a partir de allí, emergen algunos de los problemas aritméticos abiertos más arduos de las matemáticas actuales. Por otro lado, en el *Esbozo de un programa* (1984), Grothendieck introduce nuevas herramientas de *suavización abstracta*: por un lado, los *dibujos de niños*, con cuya adición las superficies topológicas coinciden con las superficies de Riemann, y, por otro lado, la *topología moderada*, cuyos axiomas permiten eliminar muchos contraejemplos artificiales en topología. Finalmente, en *Pursuing stacks* (1983) y en los *Derivadores* (1991), Grothendieck inventa las *n-categorías*, los *stacks* y los *localizadores* en la categoría de todas las categorías, con los que propone una unificación universal de la homotopía y la homología.

Segunda parte

En las *tres décadas* 1949-1957, 1958-1970, 1981-1991, se sitúan los tres grandes periodos de la producción *conocida* de Grothendieck, donde sus estudios de la conexión *espacio-número* superan de lejos todo lo conseguido previamente en la historia de la matemática. En particular, el *espacio-tiempo* de Einstein, cuya influencia en el siglo XX ha sido tan notable, no es más que un muy reducido caso particular de las consideraciones multidimensionales de Grothendieck sobre el *espacio-número*. En esas tres décadas, Grothendieck construye una apabullante diversidad de técnicas en los ámbitos más contrastantes –análisis funcional, geometría algebraica, aritmética, álgebra abstracta, categorías, álgebra topológica–, diversidad reflejada en una contribución de *más de mil definiciones*, algo del todo excepcional si se piensa que un matemático común puede considerarse contento al haber introducido una o dos definiciones en su vida. La riqueza de la obra matemática de Grothendieck, tanto técnica, como conceptual y metodológica, no tiene parangón en el último siglo. Al margen, debe observarse que, entre 1991 y 2014, Grothendieck dejó cerca de 50.000 páginas manuscritas adicionales, cuyo contenido aún se desconoce (se sabe de miles de páginas sobre matemáticas y, sorpresa, sobre física, así como de una larguísima "historia del mal", a la cual dedica treinta mil páginas), páginas interminables que seguramente ofrecerán un abundante fermento a las jóvenes generaciones.

La enorme potencia de la obra grothendieckiana radica en su combinación de experticias técnicas en múltiples regiones *localizadas* de la matemática (espacios vectoriales topológicos, variable compleja, homología, haces, geometría algebraica, álgebra topológica) y de grandes visiones unitarias *globales* sobre toda la matemática, gracias a la teoría de categorías. En esa combinación, los procesos de *ascenso y descenso* (ejemplificados en el ascenso al *topos étale* de un esquema y el descenso a las conjeturas de Weil), así como los procesos de *abstracción y concreción,* son imprescindibles. La abstracción nunca es gratuita en Grothendieck:

por un lado, la abstracción corresponde a una *suavización* fundamental, pues en la generalidad consiguen a menudo obviarse las obstrucciones de lo particular, y, por otro lado, la abstracción siempre está dirigida hacia su posterior concreción, a través de la verdadera multitud de ejemplos que recorre su obra. En su capacidad de manejar las mayores especializaciones técnicas (Lawvere lo calificaba como un "calculista virtuoso") y, a la vez, de superarlas con profundas conceptualizaciones universales, Grothendieck combina los dos rasgos centrales de un matemático de raza. El vaivén entre lo universal y lo particular adquiere una peculiar brillantez técnica gracias a la *proyectividad de arquetipos* suaves sobre una diversidad de tipos, o, dualmente, gracias a la *inyectividad* de esos tipos en arquetipos que los gobiernan: espacios nucleares, constante de Grothendieck, suficien-cia de inyectivos, grupo de la *K*-teoría, esquemas, topos, motivos, grupo de Galois absoluto, grupo fundamental alge-braico, *stacks*, derivadores, etcétera.

De esta manera, la obra de Grothendieck revive de manera extraordinaria aquella *metafísica* que la filosofía analítica pretendía haber erradicado del pensamiento. Todo en Grothendieck busca lo invisible detrás de lo visible, lo profundo detrás de lo superficial, lo estructural detrás de lo coyuntural, lo espiritual detrás de lo accidental, el alma detrás de las apariencias. Y no podemos *seccionar* tan fácilmente como desearíamos al excelso calculista, al matemático visionario, al estudioso de la creatividad, al ecologista comprometido, al explorador de los sueños, al profeta en los tiempos del cólera, al místico en busca de un soplo divino. La unidad del pensamiento grothendieckiano se consigue justamente al entender la *integralidad* de sus múltiples facetas, dejando de lado nuestros pobres y erráticos juicios de valor. Hay que decir que el *maltrato* que ha recibido el Grothendieck no estrictamente matemático por parte de sus congéneres ha sido miserable, por decir lo menos. Las 2500 páginas de sus dos magníficos tratados reflexivos –*Cosechas y siembras* (1983-1986) y *La llave de los sueños* (1987-1988)– han sido tratadas con una vulgaridad pasmosa, solo digna de la crasa ineptitud de aquellos que emiten juicios sin conocer, los *Zoilos de la vejación y la ignorancia*, como había dicho Évariste Galois en su momento. Por el contrario, el mismo Grothendieck se define como "un múltiple en busca de unidad", lo que le convierte en un verdadero paradigma de la humanidad, con todas las contrastantes y contradictorias vertientes que encarnan en nosotros. Una matemática de la *no separación* reverbera en un pensamiento no separado. El todo y la parte se conjugan admirablemente en sus investigaciones, así como los procesos de emergencia creativa (el *volcán*) lo hacen con las suavizaciones definicionales-teoremáticas (el *mar*).

Novalis decía que la poesía requiere exactitud, así como la matemática requiere plasticidad. En efecto, siguiendo al joven genio alemán, una honda composición poética necesita exactitud, de la misma manera en que un gran teorema matemático necesita plasticidad. La combinación de ambas vertientes resulta ser esencial en los momentos álgidos de la creatividad. En su lista de razones para hacer matemáticas, Saharon Shelah sitúa a la *belleza* (nivel 9) muy por encima de los demás incentivos para trabajar en la disciplina (generalidad, nivel 6; prueba, nivel 5; desarrollo, nivel 4; etc.) Tal vez la mejor manera de definir el don elusivo de la "belleza" sea a través del *summum bonum* de la estética según Peirce: la belleza consiste en el "*crecimiento continuo de la razonabilidad*". Si, con Carlos Vaz Ferreira, entendemos la "razonabilidad" como pegamiento de los términos "razón" y "sensibilidad", vemos cómo el crecimiento continuo de la razonabilidad gobierna toda la obra grothendieckiana, tanto matemática, como filosófica, activista o mística. Grothendieck amplía poco a poco el panorama de su razón, desde lo técnico hasta lo espiritual, pasando por una *razón sensible extendida*, donde intenta integrar los múltiples afluentes de un Gran Río universal.

"Somos lo que somos" y los ríos nos gobiernan con fuerzas que trascienden nuestra voluntad misma. En tiempos de desorientación como el nuestro, la obra plena de Grothendieck, sensible a la vez a lo multifacético y a lo universal, guiada por una rectitud ética ejemplar, puede ayudar a reconstruir un tejido intelectual y social completamente fragmentado. Los *millennials* cuentan ahora con la fabulosa multiplicidad de la Red, y han expandido sus mentes de una manera asombrosa, cuya variedad de miras nos supera ya de lejos a los Honorables Académicos aquí presentes. Sin embargo, se trata de una riqueza *horizontal,* superficial, a la cual le falta su contraparte *vertical*, aquella que pretende sumergirse en lo más hondo. No en vano la novela de cabecera de Grothendieck era *Moby-Dick*, con su sondeo incesante de las profundidades del alma. No es difícil predecir que los *millennials* más sobresalientes serán aquellos que conjugarán su fácil ductilidad horizontal, con esforzados, sacrificados y dolorosos descensos verticales a los fondos escondidos del saber. Así como Pip, el grumete de *Moby-Dick,* al caer al océano, observa cómo "en portentosas profundidades se deslizan extrañas formas del desenhebrado mundo primario, y el avaro tritón, la Sabiduría, revela sus tesoros apilados", las jóvenes generaciones podrán servirse de Grothendieck para captar las desenhebradas formas de nuestra época y construir con ellas un reticulado de acciones que les ayuden a navegar en tiempos difíciles.

En el campo más restringido de la *filosofía matemática*, la obra de Grothendieck provee una enorme cantidad de pistas para renovar muchas ideas ya obsoletas. Lejos de una *filosofía analítica* de las matemáticas –orientada a los fundamentos, determinada por descomposiciones, guiada por el árbol de Hilbert, gobernada por un control lingüístico, atenta a unas supuestas aguas claras–, el siglo XXI requiere la contraparte de una *filosofía sintética* de las matemáticas –donde se resalten en cambio correspondencias, composiciones, nubes (Gromov), liberaciones visuales, contaminaciones–. Allende

el prefijo básico (IN), ligado a la teoría de conjuntos y a la lógica clásica de primer orden, bases de la *filosofía analítica* en el siglo XX, se requiere pensar ahora gracias al prefijo (TRANS), ligado a la teoría de categorías y a la lógica de los haces, bases para una eventual *filosofía sintética* en el siglo XXI. El planteamiento preciso de una tal problemática ha sido efectuado en mi *Filosofía sintética de las matemáticas contemporáneas* (2009), donde la influencia de Grothendieck puede leerse en casi todas sus páginas. El mérito del volumen, traducido al inglés y al francés, consiste sencillamente en revelar un diagnóstico filosófico, producido por las matemáticas del periodo 1950-2000, donde Grothendieck campea con toda su fuerza, y en proponer algunos caminos de exploración para las nuevas preguntas encontradas. En particular, se revelan (*i*) la emergencia de una noción esencial de "universal relativo", aparente contradicción en términos, pero perfectamente comprensible gracias a los tránsitos entre categorías abstractas (con definiciones universales gracias al cuantificador ∃!) y categorías concretas (donde encarnan relativamente los universales), (*ii*) la necesidad de una "ontología transitoria", donde, junto con Alain Badiou, se observa que los conceptos matemáticos se encuentran siempre en devenir, y, junto con Jean Petitot, se captan sus características *bimodales*, es decir, fijas y en tránsito a la vez, (*iii*) la posibilidad de integrar la especificidad eminentemente dinámica de la matemática con rasgos similares de flujo en la cultura. Puedo decir que la mayoría de mis libros de ensayo responden en parte a esos rasgos (*i*)-(*iii*), profundamente influenciados por el pensamiento de Charles Sanders Peirce y de Alexander Grothendieck.

Yendo aún más allá, he podido desarrollar en los últimos tres años de mi *Seminario de filosofía matemática* (2016-2018), un nuevo modelo para pensar la filosofía matemática, donde se integran admirablemente la historia, la fenomenología y la metafísica. El calificativo "admirable" no se debe por supuesto a mi visión, sino a aquella de Xavier Caicedo, con su estudio de la *lógica de los haces de estructuras sobre modelos de Kripke*, visión elevada a su vez en parte sobre las contribuciones de Grothendieck. "Enanos a hombros de gigantes", en la imagen de Bernardo de Chartres, el enano Caicedo se alza sobre el gigante Grothendieck, y mi microscópica talla de insecto se alza sobre Caicedo. La idea de mi construcción es de una sencillez extrema. Considere un modelo de Kripke para el intuicionismo como una representación no lineal del tiempo; encima de cada instante sitúe un haz parcial cuyo espacio plegado son los teoremas, definiciones y ejemplos de la matemática en ese instante, y cuyas fibras, en el espacio desplegado, son las ideas y conceptos que se proyectan sobre cada entorno técnico reducido; finalmente, considere el *topos formado por todos esos haces parciales sobre el transcurso del tiempo* (THK). En el primer nivel (modelos de Kripke) ocurre la historia, en el segundo (haces) ocurre la fenomenología, en el tercero (topos) ocurre la metafísica. En el nivel 2, los tránsitos y las obstrucciones entre secciones locales ayudan a esclarecer una historia *interna* de las matemáticas; en el nivel 3, los pegamientos ayudan a conformar una historia *externa* de la disciplina. Un ejemplo de uso analógico del THK es lo que he llamado el "haz de la existencia": tomamos en la base el tiempo de nuestra vida, y situamos sobre cada instante la fibra de nuestras creencias en ese momento. Nuestras vivencias dan lugar a secciones locales a lo largo de nuestra existencia; a menudo, las secciones locales no son compatibles entre sí, y entramos en incesantes contradicciones que desconfiguran nuestra personalidad. Ya cuando contamos con un poco de perspectiva, nos preguntamos si nuestra constante agitación, en la niñez, en la adolescencia, en la edad madura, o en la vejez, ha tenido algún sentido. En suma, nos preguntamos si las distintas secciones locales de nuestra vida se pegan coherentemente en una sección global. Una respuesta positiva o negativa puede forzar en nosotros una razonable satisfacción o una inquietante crisis.

El modelo THK integra completamente las fuerzas fundamentales de la filosofía matemática, acepta su rica multiplicidad, y lucha contra cualquier reduccionismo dogmático. Por supuesto, el THK es aplicable a fragmentos diacrónicos de una obra, a una obra completa, o, aún, a épocas enteras de la matemática. Su elasticidad se deriva directamente de la plasticidad del pensamiento de Grothendieck. En el año 2019, espero concluir un par de monografías que terminen de expresar mi tributo personal a mis Maestros: (1) *Grothendieck. Una guía a la obra matemática y filosófica*, un extenso volumen de 600 páginas donde se recorre en detalle, por vez primera en el ámbito internacional, toda la obra publicada y distribuida de Grothendieck, (2) *Modelos en haces para el pensamiento matemático. De Galois a Connes. 1830-2020*, donde detallaré la construcción del modelo THK y sus usos para la filosofía matemática y para la cultura.

El lugar de Grothendieck para el pensamiento del siglo XXI no hace más que crecer. Basta con mirar el panorama de los Medallistas Fields desde los años setenta hasta hoy, para confirmar su enorme influencia en las matemáticas. Nombres como Atiyah, Deligne, Connes, Drinfeld, Voevodsky o Kontsevich están asociados directamente a fragmentos de los programas de Grothendieck; y en la lista de los últimos Medallistas Fields, en Rio de Janeiro (2018), tres de los cuatro galardonados siguen desarrollando varias de las técnicas centrales inventadas por Grothendieck en la geometría algebraica. Numerosas conjeturas de Grothendieck impulsan a las nuevas generaciones, con trabajos de largo aliento como los de Lafforgue, Mochizuki o Lurie.

Por otro lado, su influencia en la filosofía y en la cultura es, por el momento, escasa. Esto se debe seguramente al lastre natural de la disciplina, que siempre tarda en salir de su cascarón, pero lo cierto es que se necesitan nuevas mentes esponjosas que atrapen el legado, y que sepan *transfigurarlo* fuera de las matemáticas, así como un Russell y un Wittgenstein se apropiaron de Frege, Cantor y Peano

para fomentar la filosofía analítica. Solo el muy venerable Alain Badiou, en *Lógicas de los mundos* (2006), ha tenido el coraje de intentar leer fragmentos de la teoría de *topos* para extrapolarlos hacia la filosofía; desafortunadamente, los errores matemáticos del texto son legión, lo que debilita los argumentos, aunque subsiste un intento de apertura filosófica que no merece ser menospreciado. Crece entonces el clamor por la aparición de disruptivos jóvenes que, como Russell y Wittgenstein hace un siglo, sepan extraer todo tipo de metales preciosos de las minas grothendieckianas. ¡Debe crecer la audiencia! En el fondo, de lo que se trata es saber recorrer, en nuevas y altas cumbres, el camino de Novalis, ese otro jovencísimo que, mientras ejercía como inspector de minas en Friburgo, construía el *Borrador general* (1798-1799), esa joya única que ha guiado toda la modernidad. Esperando la emergencia de las inteligencias frescas que cambien nuestra época, y alzándome sobre la inagotable inventividad de Grothendieck, mi labor como Académico Honorario de esta prestigiosa Institución se reduce a la de ser un lector de los Maestros –eso sí, lector meticuloso e infatigable– y, gracias a ellos, servir de guía parcial en tiempos de oscuridad.

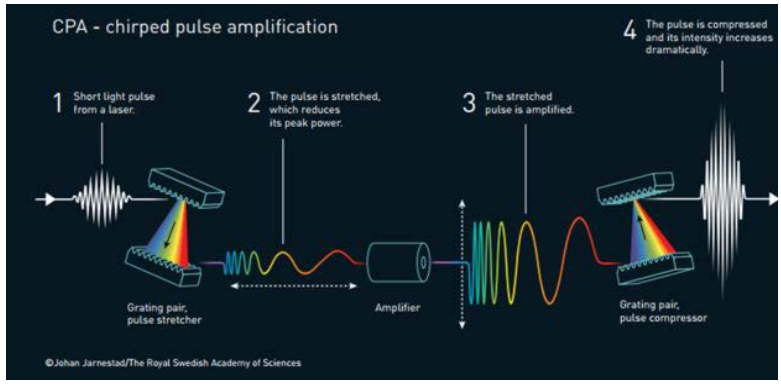
Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):449-455, octubre-diciembre de 2018

Donna Strickland y la fascinación por los colores

Donna Strickland es la tercera mujer a quien se le otorga el premio Nobel de Física entre los 206 hombres que lo han recibido hasta hoy. Compartió el galardón del 2018 con Gérard Mourou y con Arthur Ashkin. Donna nació en Ontario, Canadá, el 27 de mayo de 1959. Desde muy niña se fascinó con los colores y cuando terminó el bachillerato decidió entender lo que eran. Con ese fin se matriculó en la Universidad Mc Master donde estudió Ingeniería Física y obtuvo su título en 1981. Su interés por controlar la luz la llevó a hacer un posgrado en Física y luego un doctorado en Óptica en la Universidad de Rochester.

Donna Strickland recuerda que en su primera visita a un laboratorio de investigación en láseres pensó que "los colores se asemejaban a un árbol de Navidad". En declaraciones suyas recogidas en el sitio web de la Universidad de Waterloo, Donna afirma que: "Una parte de mí siempre se fascina con la posibilidad de jugar con láseres coloridos."

Su director de tesis de doctorado, Gérard Mourou, trabajaba con pulsos de láser y Donna empezó su investigación en esta área con un interés especial por controlar los pulsos para hacerlos muy cortos y muy intensos. Dicho de forma simplista, su trabajo consistió en estirar una onda de luz para separar los colores, y en agrandarla o amplificarla con el fin de comprimirla de nuevo y lograr pulsos de femtosegundos. "Para lograr un pulso breve necesitas muchos colores", ha explicado Strickland. En 1989 publicó los resultados de esta investigación en su tesis titulada *Development of an ultra-bright laser and an application to multi-photon ionization,* con la cual optó al título de doctorado en el Instituto de Óptica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad de Rochester. Donna ha resumido así los resultados de su labor: "Los amplificadores convencionales no habían podido amplificar los pulsos cortos para alcanzar altos niveles de energía porque la energía almacenada a partir del medio de ganancia era demasiado baja, o las potencias máximas en el amplificador podrían causar efectos no lineales y, eventualmente, producir daños. El radar de chirrido (*chirped*) se desarrolló hace más de 40 años para resolver un problema similar en el campo del radar. Hemos estudiado el análogo óptico del radar de chirrido, la amplificación de pulso gorjeado (*Chirped Pulse Amplification*, CPA) y hemos logrado desarrollar un prototipo de sistema láser".



En conclusión, Strickland fue más allá: logró estirar la onda de luz, con lo cual se separaron los colores, para luego agrandarla o amplificarla y, por último, comprimirla de nuevo. Además de comprimirlo temporalmente, dicho pulso alcanzó una intensidad elevadísima, con lo cual su campo de aplicación se amplió considerablemente. La brevedad de los pulsos de femtosegundos alcanza a medirse en milmillonésimas de segundo, lo que significa que se pueden observar eventos de interacción entre las moléculas y los átomos que antes aparecían como instantáneos. Por otro lado, como su intensidad es tan alta, se puede usar la luz para cambiar las propiedades de la materia, por ejemplo, convirtiendo aislantes en conductores o utilizando rayos ultrafinos para taladrar agujeros precisos, incluso en la materia viva, como sucede con las cirugías oculares correctivas que hoy se hacen de rutina. Los pulsos también se pueden utilizar para fabricar endoprótesis quirúrgicas en forma de cilindros diminutos que ensanchan y refuerzan los vasos sanguíneos, el tracto urinario y otros conductos dentro del cuerpo. Asimismo, permiten un más eficiente almacenamiento de datos y, seguramente, otros usos más novedosos aún por explorar innegablemente beneficiosos para la humanidad, lo cual es parte de la filosofía del Nobel.

Desde 1997 Donna es profesora asociada de la Universidad de Waterloo donde dirige un grupo de investigación en láser ultrarrápido centrado en el desarrollo de sistemas láser para investigaciones en el campo de la óptica. Sus trabajos más recientes se enfocan en el desarrollo de aplicaciones de óptica ultrarrápida mediante el uso de nuevos rangos de longitud de onda, como el infrarrojo, el medio infrarrojo y el ultravioleta. Su grupo también estudia el papel de los láseres de alta potencia en el tratamiento de condiciones médicas oculares, como la presbicia, aunque su campo de aplicación abarca desde la cirugía de los ojos hasta la fusión nuclear, con el fin de explorar fenómenos de altísima energía como las que se encuentran en las estrellas.

Como ya lo mencioné, después de María Curie en 1903 y de María Goepert-Mayer en 1963, Donna Strickland es la tercera mujer en recibir el Nobel de Física. «Necesitamos celebrar a las mujeres físicas porque están allí afuera... Me siento honrada de ser una de esas mujeres», ha dicho la galardonada después de 55 años en que ninguna mujer había vuelto a ser escogida. “Pensé que sería más fácil premiar a las mujeres físicas, (...) espero que con el tiempo las cosas vayan más rápido”.

A manera de curiosidad, vale la pena mencionar que, a pesar de las posiciones de Strickland y de su investigación innovadora, no se aceptó la publicación de un artículo con su biografía en la versión en inglés de Wikipedia, y solamente hace unos días, después de que se le concediera el premio Nobel, finalmente se incluyó la reseña en esta enciclopedia en línea. Donna tampoco había sido ascendida a profesora titular, porque nunca aplicó para cambiar su categoría, y recibió el premio Nobel como profesora asociada con la promesa de que para su nombramiento como profesora titular solamente necesitaría poner una frase en su hoja de vida: ”premio Nobel de Física de 2018”.

Angela Stella Camacho Beltrán, Académica de número,
Punto Focal, Women in Science, IANAS

Referencias

Strickland DT. Thesis (Ph.D.), University of Rochester. College of Engineering and Applied Science. Institute of Optics, (1989), Development of an ultrabright laser and an application to multi-photon

ionization (1989). Consulta: Noviembre 2018. Disponible en: https://urresearch.rochester.edu/institutionalPublicationPublicView.action?institutionalItemId=31779

ABC Ciencia. (2018). Nobel de Física 2018 para las herramientas hechas de luz, consultado: octubre 2018. Disponible en: https://www.abc.es/ciencia/abci-arthur-ashkin-gerard-mourou-y-donna-strickland-ganan-nobel-fisica-2018-201810021155_noticia.html

BBC News/ Mundo. (2018). Quién es Donna Strickland, la primera mujer en ganar el Nobel de Física en 55 años, Consultado: octubre 2018. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias-45718940

University of Waterloo, Physics and Astronomy. (2018). Donna Strickland, Consulta: octubre 2018. Disponible en: https://uwaterloo.ca/physics-astronomy/people-profiles/donna-strickland

The optical society of America. (2018). Donna T. Strickland, Consulta: octubre 2018. Disponible en: The optical Society of America, https: //www.osa.org/en-us/history/biographies/donna-t-strickland

The guardian. 0ctubre 20. (2018). Saturday Interview: Nobel Laureate Donna Strickland, ¨I see myself as a scientists, not as a woman in science¨ Fecha de consulta: noviembre 2018. Disponible en: https://www.theguardian.com/science/2018/oct/20/nobel-laureate-donna-strickland-i-see-myself-as-a-scientist-not-a-woman-in-science

El hombre detrás del Premio Nobel de Medicina

El 10 de diciembre de este año se realizó en Suecia la entrega anual de los premios Nobel para reconocer a las personas o instituciones que han contribuido notablemente a la humanidad en diferentes áreas. El galardón en Fisiología o Medicina fue otorgado a los inmunólogos James P. Allison, Ph. D., y Tasuku Honjo, M.D., Ph.D, por el desarrollo de una nueva forma de tratar pacientes con cáncer utilizando el propio sistema inmunitario de la persona como arma de defensa. Las medicinas desarrolladas por estos dos investigadores han alargado la supervivencia de miles de personas con cáncer avanzado y han abierto las puertas a una nueva y prometedora revolución en el tratamiento contra esta enfermedad. Tengo el honor de trabajar para uno de los galardonados y con profundo respeto escribo estas líneas acerca del hombre detrás de ese reconocimiento.

Siendo apenas un niño, el Dr. James P. Allison, director del Departamento de Inmunología y de la Plataforma de Inmunoterapia de la Universidad de Texas MD Anderson Cancer Center en Houston y del Parker Institute for Cancer Immunotherapy, perdió primero a su madre a causa de un cáncer del sistema linfático y, posteriormente, a otros miembros de su familia víctimas de la enfermedad. Además, él mismo ha sufrido sus rigores, pues sobrevivió a un cáncer de páncreas, a un melanoma y a un cáncer de vejiga. El tener que enfrentar de cerca la enfermedad, y el interés por la ciencia que heredó de su padre médico, influyeron dramáticamente en su carrera.

Allison se convirtió en un investigador fascinado con el sistema de defensa del cuerpo humano, el sistema inmunitario, y ha dedicado su vida a entender cómo responden las células T, verdaderos soldados de esa defensa que viajan por todo el organismo buscando y destruyendo atacantes externos. Su entrega y su pasión por la ciencia a lo largo de más de 30 años, le permitieron responder a preguntas fundamentales sobre el funcionamiento y la regulación de estas células: fue el primero en aislar el receptor del antígeno TCR, el receptor de activación CD28 y el receptor de inhibición CTLA-4. Asimismo, su talento y su creatividad lo llevaron a preguntarse cómo dichos descubrimientos básicos en inmunología podían usarse para combatir el cáncer. Así, logró identificar uno de los frenos de las células T, la proteína CTLA-4, y demostró que al bloquear este freno, dichas células eran capaces de destruir tumores en ratones. Sus estudios en modelos animales permitieron el desarrollo del primer anticuerpo inhibidor del punto de control, un medicamento que bloquea la CTLA-4 y libera el potencial destructor y de memoria de las células T contra células cancerígenas, el cual ha tenido resultados favorables sin precedentes. El medicamento fue probado inicialmente en pacientes con melanoma metastásico que no habían respondido a las terapias convencionales y su uso permitió que 20 a 25 % de los pacientes siguieran con vida después de varios años de tratamiento. El bloqueo de puntos de control fue la primera droga en la historia que representó una ventaja para la supervivencia de pacientes con cáncer avanzado.

El Dr. Allison se convirtió, así, en el pionero de la inmunoterapia: un nuevo grupo de tratamientos que entrenan el sistema inmune para atacar tumores y que ha permitido convertir cánceres terminales en condiciones no letales. En los últimos años se han probado más inhibidores y se han obtenido resultados promisorios en otras ramas novedosas de la inmunoterapia. Gracias a ello, un número cada vez mayor de compañías farmacéuticas, políticos, activistas y filántropos se ha unido a la carrera multibillonaria para desarrollar nuevas y mejores terapias contra el cáncer. Además de ser un científico brillante, el Dr. Allison es un ejemplo de perseverancia. Fue capaz de enfrentar a los detractores de sus propuestas cuando nadie creía en la eficacia de estos nuevos tratamientos. Logró romper paradigmas y convencer al mundo científico de aceptar la inmunoterapia como el cuarto pilar del tratamiento para el cáncer, junto con la cirugía, la radiación y la quimioterapia.

James Allison también es un apasionado por la música y miembro de una banda de blues cuyos integrantes son famosos inmunólogos y oncólogos de Estados Unidos. Es un ser humano que disfruta esquiar, tomar vino, pasar tiempo con su esposa y con sus amigos y que llora al recibir el agradecimiento de los pacientes que se han salvado gracias a sus descubrimientos. A sus 70 años sigue dedicando su vida a buscar nuevas opciones de tratamiento para pacientes con cáncer que contribuyan a que la cura contra esta enfermedad sea una realidad en el futuro. Un ser humano que escribió un nuevo y promisorio capítulo en la historia de esta enfermedad. El reconocimiento de la Real Academia Sueca de Ciencias es un premio más que merecido a una trayectoria científica inspiradora y al poder de una mente brillante para romper paradigmas del conocimiento convencional e iniciar una nueva revolución contra el cáncer.

Diana L. Bonilla Escobar
Senior Research Scientist
Immunotherapy Platform
MD Anderson Cancer Center
Houston, Texas, Estados Unidos

Referencias

Ribas A. (2007). Anti-CTLA4 Antibody Clinical Trials in Melanoma. Update Cancer Ther. **2** (3): 133-139.

Leach DR, Krummel MF, Allison JP. (1996). Enhancement of antitumor immunity by CTLA-4 blockade. Science. **271** (5256): 1734-6.

Allison JP. (2015). Checkpoints. Cell. **162** (6):1202-5. Doi: 10.1016/j.cell.2015.08.047

Sharma P, Allison JP. (2015). Immune checkpoint targeting in cancer therapy: Toward combination strategies with curative potential. Cell. **161** (2): 205-14. Doi: 10.1016/j.cell.2015.03.030

Wei SC, Duffy CR, Allison JP. (2018). Fundamental Mechanisms of Immune Checkpoint Blockade Therapy. Cancer Discov. **8** (9): 1069-1086.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):449-455, octubre-diciembre de 2018

El Nobel de Química de 2018 y la evolución dirigida de proteínas

La Real Academia de Ciencias de Suecia otorgó este año el Premio Nobel de Química a tres notables investigadores que con sus trabajos han permitido "*aprovechar el poder de la evolución con el propósito de proporcionar el mayor beneficio a la humanidad* ", como lo anunció el respectivo comité seleccionador. Los galardonados fueron los profesores Frances Arnold, del Instituto Caltech en California, George P. Smith, de la Universidad de Missouri, y Sir Gregory P. Winter, de la Universidad de Cambridge. Basándose en los principios de la bioquímica y la biología molecular que rigen la expresión génica y combinando diferentes estrategias de la ingeniería genética, los tres investigadores lograron dirigir la expresión de proteínas con el propósito de alcanzar mejores e, incluso, novedosas actividades biológicas, las cuales pueden tener un amplio espectro de aplicaciones en varios campos.

Frances Arnold, la quinta mujer en recibir el Nobel de Química desde que fue creado en 1901, fue galardonada por su trabajo sobre la evolución dirigida de enzimas. Con la premisa de que la evolución es el algoritmo que le permite a los seres vivos sobrevivir en el tiempo y que las enzimas que encontramos en la naturaleza son el resultado de la evolución, Arnold centró sus investigaciones en tratar de encontrar la forma de adaptar los mecanismos biológicos de la evolución a la resolución de problemas de la química y la ingeniería. Mediante la bioingeniería de enzimas, diseñó un método de mutagénesis acumulativa en genes bacterianos de enzimas de interés simulando en el laboratorio un proceso evolutivo acelerado, con el propósito de mejorar características funcionales como una mayor eficiencia, o encontrar nuevas propiedades catalíticas. Con el método de Arnold hoy es posible obtener enzimas que desencadenan reacciones químicas que no se habían explorado previamente en la naturaleza. En los estudios que ha adelantado en su laboratorio con la proteína P450 y con otras hemoproteínas (**Arnold,** 2018), ha podido demostrar que la evolución dirigida permite crear nuevas enzimas codificadas genéticamente, altamente estereoselectivas y enantioselectivas, para reacciones de síntesis química difíciles o imposibles de llevar a cabo con catalizadores químicos (**Brandenberg, *et al.*,** 2017). Con la enzima alostérica triptófano sintasa, por ejemplo, encontró que la evolución dirigida causa un cambio gradual en el paso limitante del ciclo catalítico, y evidenció que las mutaciones producen cambios estructurales menores en la enzima, pero más importante, estabilizan la conformación del estado de transición (**Buller, *et al.*,** 2018). Las enzimas obtenidas con el método de Arnold tienen, además, la ventaja de permitir la síntesis química en condiciones más amigables con el medio ambiente al reemplazar el uso de catalizadores tóxicos.

George Smith y Gregory Winter fueron premiados por sus trabajos en la evolución dirigida de proteínas de unión y anticuerpos, en los cuales han utilizado la presentación sobre fagos (virus de bacterias), tecnología desarrollada por George P. Smith (**Smith,** 1985). En ella, el ADN que codifica para la proteína o péptido de interés se empaca dentro del fago de manera que este la expresa y la presenta en su superficie, y queda disponible para su reconocimiento por parte de receptores o proteínas de unión. La infección con fagos de *Escherichia coli*, su multiplicación en la célula huésped y la selección mediante varios ciclos de afinidad, produce una librería de fagos enriquecida en clones caracterizados por su alta capacidad de unión a su correspondiente antígeno.

En 1990 Sir Gregory Winter logró la presentación de un fragmento de anticuerpo correctamente plegado, funcionalmente activo y muy específico (**McCafferty, *et al*.,** 1990) empleando la tecnología desarrollada por Smith. Este hallazgo demostró la eficacia de la presentación de anticuerpos en la superficie de bacteriófagos, con la ventaja de que no requirieron la humanización, como es el caso de los anticuerpos monoclonales obtenidos en hibridomas. En la actualidad son numerosos los laboratorios de investigación en el mundo que aplican la evolución dirigida de proteínas para la obtención de anticuerpos dada su gran afinidad, en el rango de 10^{-12} – 10^{-15} M^{-1}, y la conservación de la especificidad. Así mismo, la industria farmacéutica trabaja en su desarrollo y aplicación en el tratamiento de enfermedades tales como la artritis reumatoide, el lupus y ciertas formas de cáncer metastásico.

Myriam Sánchez de Gómez
Profesora Emérita
Departamento de Química
Universidad Nacional de Colombia

Referencias

Arnold, FH. (2018). Directed Evolution: Bringing new chemistry into life. Angew. Chem. Int. Ed. **57:** 4143-4148. Doi: doi.wiley.com/10.1002/anie.v57.16

Brandenberg O., Fasan R., Arnold, F.H. (2017). Exploiting and engineering hemoproteins for abiological carbene and nitrene transfer reactions. Curr. Opin. Biotechnol. **47:** 102-111. Doi:10.1016/j.copbio.2017.06.005

Buller A.R., van Royer P., Cahn J.K.B., Scheele R.A., Herger M., Arnold F.H. (2018). Directed evolution mimics allostery activation by stepwise tuning of conformational ensemble. J Am Chem Soc. **140** (23): 7256-7266. doi:10.1016/j.copbio.2017.06.005

McCafferty J., Griffiths A.D., Winter G., Chiswell D.J. (1990). Phage antibodies: Filamentous phage displaying antibody variable domains. Nature. **348:** 552-554.

Smith G.P. (1985). Filamentous fusion phage: novel expression vectors that display cloned antigens on the virion surface. Science. **228:** 1315-1317.

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):456-460, octubre-diciembre de 2018

Henry Mauricio Martínez Gómez

1991-2018

Foto por Carlos Armando Rosero

Un chico con un liderazgo extraordinario que fue asesinado por hacer su trabajo.

Conocí a Henry hace ya un poco más de tres años en mi curso de sismología en la Universidad de los Andes, era un estudiante juicioso, siempre sonriente e interesado por aprender más, mucho más. Sus compañeros y compañeras de curso lo apreciaban mucho.

Cuando terminamos el curso en diciembre se me acercó con Juliana Ayala y me preguntaron si los podía acompañar en el concurso del Barril Imperial, el cual convoca a estudiantes de Geociencias y es organizado por la *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG). Con gusto les dije que sí, con una condición, que fueran a mi oficina. Ellos aceptaron y en enero del siguiente año comenzamos la preparación; les enseñé lo que sabía y… en pocas horas estaban volando, el caso de estudio era un prospecto en el mar del Norte. Se repartieron los temas, Henry escogió la evaluación regional de la cuenca y la geoquímica. Hizo un excelente trabajo, al igual que sus compañeros. Los acompañé a Trinidad, donde quedaron en el segundo lugar entre los participantes de Latinoamérica.

Henry, como siempre, sonreía. Hizo muchos amigos entre los concursantes de otras universidades. Yo regresé temprano, pero él se quedó; después me contaría del paseo que hicieron, del ferry que los dejó por andar de rumba hasta tarde y del vuelo de regreso que perdieron. Henry seguía sonriendo. Él era solo alegría, veía el lado bueno y divertido de todo.

Cuando regresó de Trinidad, vino a mi oficina y me pidió que lo acompañara en una nueva aventura: participar en el concurso *Challenge Bowl* de la *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) de ese año, el 2015. Otra vez le dije que sí. Esta vez el concurso era solo en parejas, así que se alió con un compañero del curso inferior y pasaron la primera selección a nivel de Colombia. Infortunadamente, su compañero tenía un compromiso en Alemania y tuvo que marcharse, pero Henry no se amilanó, sonriente vino a mi oficina con Luis Pizano, con quien finalmente participó. Se ganaron la segunda eliminatoria a nivel latinoamericano y los acompañé a la final en Nueva Orleans, en octubre del 2015, donde ocuparon el tercer lugar a nivel mundial. Perdieron en franca lid con estudiantes de doctorado, cuando ellos todavía no habían terminado su pregrado.

La siguiente vez que vi a Henry fue cuando me pidió que lo acompañara en la fundación del capítulo estudiantil de la AAPG. Nunca le faltaba ánimo para colaborar, dar lo mejor de sí para los demás. Siempre sonriendo y dispuesto a medírsele a lo que fuera.

En el 2016 me pidió que lo asesorara en su tesis de grado en Geociencias. Le propuse un tema que era un verdadero desafío, pero no se arrugó, trabajó todo el año en los laboratorios de la compañía GMAS, hizo mucho más de lo necesario para una tesis de pregrado y se graduó a finales de 2016. En el 2017 se ganó el segundo puesto del premio "Michel Hermelin", geólogo y profesor de la Universidad Nacional y la EAFIT, a la mejor tesis de pregrado en Geología o Geociencias, y comenzó a trabajar en GMAS organizando el laboratorio de petrofísica para lo cual hizo todas las calibraciones y escribió un manual de laboratorio. Un día poco después me dijo que quería volar… su plan era ser un científico planetario, un astronauta. Yo lo animé, le dije que no perdiera tiempo y se dedicara a obtener una beca para cumplir su sueño. Él se dedicó a su sueño y yo escribí una carta para la Universidad de Stanford en California. Tenía todas las posibilidades de ingresar: estudió para el TOEFL y para el GRE y aunque no alcanzó a pasar, siguió sonriendo.

En enero del 2018 vino a la oficina a despedirse, pues había aceptado un puesto con una compañía minera en Antioquia. No pasó mucho tiempo antes de que volviera a visitarme, me contó de su trabajo y de lo mucho que estaba aprendiendo. Cada mes venía a visitarme, a contarme lo que estaba aprendiendo y un día me dijo que definitivamente iba a devolver un apartamento que tenía alquilado en Medellín e iba a regresar a Bogotá a casa de sus padres. Un mes más tarde me preguntó si podía volver al laboratorio, le quedaban varios días libres cada mes y quería estar ocupado. Me dijo que un compañero suyo estaba buscando un tema para su trabajo de grado y le propuse la evaluación de unos núcleos que él me había conseguido hacía un par de años. Le encantó la idea, montó un puesto de observación en el laboratorio, compró una lupa, una punta para rayar minerales, una escala de dureza y preparó al chico para hacer una descripción de cada núcleo según lo que había aprendido. Hizo una plataforma para desplegar los núcleos, instaló luz y listo. Ese viernes me dijo, "el lunes empezamos con la descripción de núcleos", así que hizo una macro en Excel para registrar todos los datos y desplegar la información adquirida en forma de gráficos.

El lunes siguiente Henry me dio la triste noticia de que el chico de la tesis estaba incapacitado por un mes: se había accidentado en su bicicleta, camino de su casa el vienes en la tarde. Sin embargo me dijo que había aplazado su regreso a campo en Yarumal y que tenía una semana o más para seguir en el laboratorio. El viernes siguiente había un seminario organizado por la AAPG en el Laboratorio de GMAS para líderes geocientíficos de Latinoamérica y como era yo quien prestaba el auditorio le dije a Henry que asistiera, que yo arreglaba con los organizadores para que lo dejaran entrar. Henry me insistió que tenía que trabajar y me costó trabajo convencerlo de que no "tenía que trabajar" y de que asistiera al evento. Bueno, sin proponérmelo, Henry resultó asistiendo a todas las sesiones que pudo. Salió a bailar todas las noches y el lunes me confesó: "Profesor, no he dormido casi". Como solía suceder, su amabilidad y su cariño por todos se habían ganado los corazones de los chicos y, sobre todo, de las chicas que asistieron al seminario. El martes se despidió,

iba de regreso para Yarumal, Antioquia. El jueves en la madrugada se encontró con su destino, cruel, despiadado, insolente y definitivamente inesperado. Lo asesinaron cobardemente.

Creo que en todos los grupos, asociaciones y demás agrupaciones en las que Henry Martinez se involucró, participó o simplemente opinó, sembró una semilla que seguramente dejará muchos frutos y recuerdos. Su inquietud permanente, sus ganas de saber cada día más, de no "tragar entero", pero ante todo de gozarse la vida, una vida tristemente corta, dejarán su impronta. Aún tenía mucho por hacer, descubrir, explorar, por VIVIR.

Todavía lo lloro. Mi corazón estará triste hasta la muerte…

José María Jaramillo
GMAS

Henry Mauricio Martínez Gómez fue asesinado por un grupo terrorista en Ochalí, Antioquia, la noche del miércoles 19 de septiembre de 2018. Tenía 27 años y llevaba apenas siete meses trabajando para la minera Continental Gold. Con él fueron asesinados dos jóvenes geólogos más, Laura Alejandra Flórez Aguirre y Camilo Andrés Tirado Farak.

Henry nació el 18 de abril de 1991. Tenía otros dos hermanos, y él era el del medio. Estudió su bachillerato en el Liceo Colombia del Ejército en Bogotá, donde estuvo becado por excelencia académica y se graduó con honores. Ocupó el primer puesto en el Icfes de su colegio y estudió Geología en la Universidad de los Andes, donde se graduó en el 2016. Durante su pregrado fue presidente y fundador del capítulo estudiantil de *The European Association of Geoscientists and Engineers* y de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (EAGE-ACGGP). Fue semifinalista en el concurso global "Imperial Barrel" de la *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG), y ganó el premio "Challenge Bowl Latin America" otorgado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG) en el 2015, en Río de Janeiro.

Una vez graduado, dictó clases de petrofísica en la Universidad ELITE (Escuela Latinoamericana de Ingenieros Tecnólogos y Empresarios). Tenía una gran pasión por la ciencia y estaba próximo a continuar sus estudios de posgrado, pero prefirió tomarse unos años para experimentar la geología en un plano más práctico y con esa intención se vinculó a la empresa minera Continental Gold.

En su tesis de pregrado, que se tradujo en una publicación (**Martínez-Gómez & Jaramillo,** 2017), Henry exploró un método para la prospección rápida y económica de hidrocarburos. En algunos casos, los depósitos profundos de hidrocarburos pueden presentar escapes en los cuales pequeñas cantidades de hidrocarburo manan hacia la superficie donde producen una serie de reacciones de oxidación y reducción en la química de los minerales que componen el suelo. El método utilizado por Henry pretendía detectar estos cambios en el suelo y así poder predecir la existencia de hidrocarburos en profundidad. Henry utilizó varias herramientas que incluían la medición en muestras de suelo del campo magnético y de la radiación gamma, así como la determinación de la composición de los minerales arcillosos del suelo usando difracción de rayos X. La interpretación de los datos recolectados, sin embargo, no es sencilla, ya que se requería diferenciar la composición original del suelo y confrontarla con los cambios originados por el goteo de los hidrocarburos. Henry aplicó este método en el Tolima en dos sitios que tienen manaderos de hidrocarburos, y mediante un análisis metódico y elegante logró entender la génesis de los suelos y demostrar los efectos que el hidrocarburo mismo tuvo sobre los suelos. Su tesis es excelente, está casi al nivel de maestría y abarca una serie compleja de tópicos que van más allá de la Geología. Henry discute las dos herramientas en detalle (radiación gama y magnetismo), luego analiza la dinámica de los suelos y el papel que juegan los microbios en su evolución, y finaliza discutiendo los complejos cambios a nivel geoquímico que producen los hidrocarburos en el hierro y el uranio del suelo.

La gran calidad de su tesis le mereció la mención de honor para el Premio Michel Hermelin Arbaux del 2017, el cual es otorgado cada año por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales a las mejores tesis de Geología de Colombia.

Henry era brillante, calmado, y de los pocos geólogos con capacidad para programar y con pasión por los números. Tenía, además, una visión amplia de las ciencias de la tierra y combinaba aspectos que usualmente no se encuentran asociados, desde el mapeo de estratos geológicos en el campo hasta la actividad microbiana de bacterias en un suelo. En resumen, tenía un futuro promisorio.

De sueños enormes, Henry sabía cómo los iba a cumplir y tenía ideas claras y determinación para emprender las acciones que lo ayudarían a cumplir sus metas. Un hombre del futuro en el presente, así es como lo recuerdan los compañeros y los colegas que lo acompañaron en el camino a lo largo de su carrera. La calidez, la solidaridad y la motivación de Henry contagiaban a cualquiera que lo conociera y lo convirtieron en un líder natural en organizaciones estudiantiles y profesionales. Siempre proactivo, constantemente organizaba eventos y ayudaba a otros a construir sus propios proyectos.

Su ausencia deja un vacío en un país que necesita desesperadamente a científicos que aspiren a servir a Colombia a través de la ciencia y la investigación puestas al servicio de la construcción de la paz. Henry nació con el espíritu de servir a los demás, y quería hacer ciencia bien hecha que pudiera dejar una huella no solo en el ámbito académico sino social.

Henry quería entender cómo funciona la tierra, por qué existen las montañas, los ríos y cómo están distribuidos los minerales. Le encantaba ir a campo y hacer observaciones para tratar de responder estas preguntas. Su trabajo conllevaba recorrer quebradas y montes en busca de lugares en donde hubiese roca expuesta para explorarla con un martillo, una lupa, un mapa y una brújula. Como geólogo de campo lo impulsaba un profundo deseo de entender el funcionamiento de la tierra. Henry fue asesinado mientras realizaba esta digna labor.

Su vil y atroz asesinato segó la vida de un joven científico que, con seguridad, habría llegado a ser miembro de la Academia en un par de décadas. ¿Qué futuro le espera a nuestra sociedad cuando perdemos a seres humanos tan valiosos como Henry?

Carlos Jaramillo
Smithsonian Tropical Research Institute

Referencias

Martínez-Gomez, H. & Jaramillo, J.M. (2017). Magnetic and Radiometric Signatures in Soils above Hydrocarbon Accumulations, Toqui-Toqui and Mana Fields, Tolima, Colombia. Search and Discovery Article #42046, Datapages. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2017/42046martinez-gomez/ndx_martinez-gomez.pdf.html

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 42, números 162, 163, 164 y 165.

El comité editorial de la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales expresa sincero agradecimiento a los revisores que han participado durante el año 2018, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Adrian Jaimes-Becerra
Agustín Cardona
Álvaro Perea
Arturo Acero
Andrés Pérez-Acosta
Bernardo Ramírez Padilla
Brittany Damron
Carlos Antolinez
Carlos Benjumea Hoyos
Carlos Mendivil
Carlos Ostos Ortiz
Cesar Torres
Cesar Vinasco
Cristiane Bahi dos Santos Fisher
Darío Valencia
Diana Castaño
Duber Ávila
Eber Orozco Guillén
Edgar Páez Mozo
Edison Parra
Eduardo Flórez-Daza
Eduardo Rojas
Ernesto Guhl Nanneti
Efraín Henao Bañol
Efraín Solarte Rodríguez
Enrique Peña Salamanca
Esteban Álvarez
Fabián Michelangeli
Félix Echavarría
Freddy Rafael Pérez
Gabriel Cadena Gómez
Gean Arteaga
Gean Arteaga
Giovanny Fagua
Gloria León
Gloria Patricia Cardona-Gómez
Gustavo Vallejo
Hernando Ariza Calderón
Hilldier Zamora
J. Richard Abbott
Jairo Castaño Zapata
Janice Glime
Jean-Pierre Galaup
Jesús Cruz López
Jesús Ortega
Jesús Rangel
Jimmy Morales
Joaquín Pelkowski
John Barrera Ramírez
Jorge Arias de Greiff
Jorge Dueñas Suaterna
Jorge Ramírez Osorio
José Murillo-A.
José Tavera
Juan Calderón
Juan Carrillo
Juan F. Botero-Cadavid
Karen Fonseca
Keve Kiss
Laura Pérez
Liliana Hoyos Carvajal
Luis Carlos Arboleda
Luis Echeverri López
Luis Rueda Solano
María Camila Vallejo
María Zúñiga
Marcel Marín
Nathali López Cardona
Oscar Zapata Noreño
Rafael González Hernández
Rafael González Hernández
Ricardo Álvarez-León
Ricardo González-Muñoz
Rubén Ardila
Rubén Ardila
Sandra Baena Garzón
Sandra Milena Contreras
Sara Morón
Sebastián Zapata
Silvia Restrepo
Stephania Prince Chacón
Tania Raymundo Ojeda
Thomas Wendt

Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 42, números 162, 163, 164 y 165.

Aarón Muñoz T., 173
Adriana Gracia C., 49
Adriana Marcela Forero-Céspedes, 230
Alain Vanderpoorten, 221
Alba Marina Torres González, 269
Alejandro Hoyos, 182
Alex Mauricio Jiménez-Ortega, 58, 237
Alexander Mendoza-Mora, 212
Andrés F. García, 200
Angie E. Orduz, 96
Antoine Cleef , 221
Ariana C. Di Lorenzo V., 173
Ariday S. Mosquera Polo, 180
Camilo Anaya, 402
Camilo Montes, 392
Carlos A. Benjumea-Hoyos, 353
Carlos Andrés Sjogreen, 41
Carlos Andrés Villate-Suárez, 202
Carlos Fernando Díaz Meza, 194
Carlos Girado-Polo, 104
Carlos Iván Suárez-Ballesteros, 207
Carlos Osorio M., 49
Carlos Parra, 162
Carolina Mancipe-Murillo, 207
Carolina Pereyra Girardi, 145
Cesar A. Ramírez, 306
Ciro E. Rozo, 96
Claudia Urueña, 132
Concepción J. Puerta, 306
Críspulo E. Deluque Toro, 180
Cristian González-Acosta, 227
Cristina Cedeño-Posso, 49
Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo, 422
Daniela Ahumada-C., 200
David A. Landínez Téllez, 41, 162, 180
David Sanín, 22
Derly Astrid Buitrago, 65
Diego Fernando Motta Nieto, 194
Dilan A. Martínez-Sánchez, 402
Edier Alberto Soto Medina, 269
Edwin Orlando López-Delgado, 216
Edwin Santiago Restrepo-Bastidas, 212
Eider Bladimir Ortiz-Andoke (Q.E.P.D.), 22
Elizabeth Hodson de Jaramillo, 188
Elizabeth Ruiz, 306
Eugenia Razumiejczyk, 145
Evelin María Gómez-Tapia, 246
Fania Caicedo, 162
Fernando Marmolejo-Ramos, 145
Fernando Martínez Ortega, 194
Fernando Vargas-Salinas, 227
Ferney Javier Rodríguez Dueñas, 150
Francisco A. Villa-Navarro, 216
Francisco Cortés-Pérez, 202
Francisco J. Vélez, 182
Gerardo A. Aymard C., 232
Germán Bayona, 364
Giovanny Jiménez-Díaz, 402
Gisela Hurtado, 145
Gladys Reinoso-Florez, 230
Guido van Reenen, 221
Guillermo Macbeth, 145
Gustavo Forte, 189
Hans-Werner Koyro, 323
Héctor Eduardo Esquivel, 65
Hugo Mantilla-Meluk, 58
Humberto Mendoza-Cifuentes, 74
Irene Paredes, 173
Jaime Enrique Meneses Fonseca, 172
Jairo Arbey Rodríguez Martínez, 26
Jairo C. Quijano, 182
Jairo Roa-Rojas, 41, 162, 180
Jaiver Eduardo Rosas Pérez, 41
Javier Rodríguez-Barrios, 330
Jeferson Durán-Fuentes, 49
John J. Castillo, 96
Jorge A. Gómez, 182
Jorge A. Herrera-Ramírez, 182
Jorge Arturo Santa, 166
Jorge I. Villa Hernández, 180
José Benavides Blanco, 32
José Christian Díaz del Basto, 323
José Iván Mojica, 323
José Luis Poveda Cuellar, 216
José María Jaramillo-Mejía, 422
José María Requena, 306
Juan Carlos Agudelo-Martínez, 246
Juan Mauricio Posada-Herrera, 74
Leison Palacios-Mosquera, 58, 237
Leonardo Gónima-Gónima, 104
Ligia Estela Urrego G., 80
Lily Julieth Vargas-Osorio, 343
Lina M. Serna, 410
Lina Marcela Vargas Gaviria, 65
Lisa M. Campbell, 232
Lizhet Soto, 22
Lucy Gabriela Delgado Murcia, 166
Luis Alfonso Vidal, 330
Luis C. Gutiérrez, 182
Luis Eduardo Castro, 330
Luis F. Castaño, 182
Luis Norberto Parra-Sánchez, 422
Luisa Fernanda Bohórquez Villamizar, 166
Luiz C. Da Silva Nunez, 182
Manuela Calderón-Hernández, 207, 255
Marcela López-Casallas, 262
María Isabel Vélez, 330
María Paula Moreno Cavazos, 269
María Teresa Flórez-Molina, 422
Mariano Ospina Hernández, 114
Martín Llano-Almario, 269
Maryeimy Varón-López, 343
Mauricio Pardo Jaramillo, 280
Mauricio Rozo Clavijo, 166
Mayra A. Suárez-Segura, 353
Miguel Ángel Rodríguez, 212
Myrian Tebaldi, 189
Nasly Y. Martínez Velásquez, 26
Nathali López-Cardona, 262, 343
Nestor Bolognini,189
Néstor Pérez-Buitrago, 246
Orlando Rangel, 330
Oscar José Mesa, 379
Paola A. Arias, 410
Paola Nocua, 306
Paulo César Plazas Hurtado, 41
Reimer A. Romero H., 173
Rigoberto A. Casas-Miranda, 32
Robbert Gradstein, 221
Sandra C. Vivas, 173
Sara C. Vieira, 410
Sebastián Duarte-Marín, 227
Sergio Adrián Murillo-Montoya, 212
Silvia Lucía Villabona-González, 353
Susana Fiorentino, 132
Víctor Danilo Palacios-Mayoral, 237
Victor H. Aristizabal, 182
Viktor V. Lemeshko, 6
Vivian Andrea Coy-Rodríguez, 343
William A. Ponce, 319
Yezid Torres Moreno, 194
Yinerla Rentería-Machado, 58
Yohana Domínguez-Romero, 166
Yucely del Carmen Copete-Mosquera, 58
Yury Parada, 162

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 42(165):461-467, octubre-diciembre de 2018

Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 42, números 162, 163, 164 y 165.

Ciencias Biomédicas
Biomedical Sciences

El papel de la membrana mitocondrial externa en el control del metabolismo energético celular
The mitochondrial outer membrane in the control of cell energy metabolism 6

La fitoterapia como fuente de medicamentos reguladores del metabolismo tumoral y activadores de la respuesta inmunitaria
Phytotherapy as a source of medicaments that regulate tumoral metabolism and activate the immune response 132

Estudio preliminar de anticuerpos IgG antiinsulínicos y complejos inmunitarios en pacientes colombianos con diabetes tipo 2
Preliminary study of anti-insuline IgG antibodies and immune complexes in Colombian patients with type 2 diabetes 166

Identificación de proteínas reguladoras de la expresión génica en tripanosomátidos
Identification of proteins regulating gene expression in trypanosomatids 306

Ciencias del Comportamiento
Behavioral Sciences

Notas sobre el uso del helecho *Jokome* (*Adiantum pulverulentum* L. Pteridaceae) por el pueblo *Murui-Muina* "uitoto" en el piedemonte andino-amazónico de Colombia
Notes about the use of the fern *Jokome* (*Adiantum pulverulentum* L. Pteridaceae) by the people *Murui-Muina* "uitoto" in the Foothill Andean-Amazonic of Colombia 22

Sonidos del comer: propuestas para el estudio intermodal entre el sabor y la música
Sounds of eating: proposals for the crossmodal study between flavour and music 145

Ciencias Físicas
Physical Sciences

Propiedades electrónicas y estructurales del $Ga_{1-x}Cr_xAs$
Electronic and structural properties of $Ga_{1-x}Cr_xAs$ 26

Numerical simulations of the formation of the Milky Way disk of satellites through the accretion of associations of dwarf galaxies
Simulaciones numéricas de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de la acreción de asociaciones de galaxias enanas 32

Experimental study of nanobubbles in salt solutions
Estudio experimental de nanoburbujas en soluciones salinas 41

Propiedades ópticas y de transporte de sistemas electrónicos cuasi-unidimensionales
Optical and transport properties of cuasi-one dimensional electronic systems 150

Evolution of the structural ordering of the Sr_2SbMnO_6 perovskite as a function of temperature
Evolución del ordenamiento estructural de la perovskita Sr_2SbMnO_6 en función de la temperatura 162

Ciencias Físicas
Physical Sciences

Un problema de osciladores acoplados analizado mediante la notación bra-ket empleada en mecánica cuántica
Analysis of a problem of coupled oscillators making use of the bra-ket notation used in quantum mechanics 166

XV Encuentro Nacional de Óptica – VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones
XV National Meeting on Optics – VI Andean and Caribbean Conference on Optics and its Applications 172

Análisis multiespectral y digital de los nevos melanocíticos adquiridos
Multiespectral and digital analysis of acquired melanocytic nevi 173

Specklegramas de fibra óptica analizados mediante procesamiento digital de imágenes
Fiber specklegram sensor analysis by digital image processing 182

Características del efecto Lau empleando redes de fase y de volumen fotorrefractivas
Features of the Lau effect by using a photorefractive volume phase grating 189

Seguimiento de una reacción fotocatalítica modelo expuesta a la propagación de la superposición de dos vórtices ópticos con momento angular orbital entero definido y opuesto, por medio de espectroscopía UV-VIS
Monitoring of a photocatalytic reaction pattern exposed to the propagation of the superposition of two optical vortices with defined and opposite orbital angular momentum, by UV-VIS spectroscopy 194

Thermodynamic properties, electronic and crystallographic structure, and magnetic response of the Sr_2HoNbO_6 material
Propiedades termodinámicas, estructuras electrónica y cristalográfica y respuesta magnética del material Sr_2HoNbO_6 180

New universal 3-3-1 models
Nuevos modelos 3-3-1 universales 319

Ciencias Naturales
Natural Sciences

Aporte al conocimiento de las medusas (Cnidaria: Medusozoa) en el departamento del Atlántico, Colombia
Contribution to the knowledge on jellyfishes (Cnidaria: Medusozoa) in the department of Atlántico, Colombia 49

Plantas utilizadas como tiendas por murciélagos tenderos en la selva pluvial central del Chocó, Colombia
Plants used as refuge by bats in the central rainforest of Chocó, Colombia 58

Diversidad y composición de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia
Diversity and composition of lycophytes and polypodiopsida of the páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia 65

Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) de hojas rojizas de los andes de Colombia
A new species of *Miconia* (Melastomataceae) of reddish leaves from the Andes of Colombia 74

Ciencias Naturales
Natural Sciences

Cananguchales y manglares: humedales forestales de las zonas bajas tropicales, tan semejantes como contrastantes
Mauritia-dominated forests and mangroves: Tropical swamp forests, as similar as contrasting 80

Completing the puzzle: Another species of *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) from Colombia
Se completa el rompecabezas: otra especie de *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) de Colombia 200

Propagación sexual y tolerancia a la desecación del agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) de tres fuentes semilleras localizadas en Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) y Gachetá (Cundinamarca)
Sexual propagation and desiccation tolerance of agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) of three seed sources located in Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) and Gachetá (Cundinamarca) 207

Efecto de la cobertura vegetal de ribera en las comunidades ícticas en el bosque húmedo premontano y muy húmedo premontano del Alto Magdalena, Colombia
Effect of the riparian vegetation cover on fish communities in the humid premontane and very humid premontane forest in the Upper Magdalena, Colombia 216

Estructura y composición de ensamblajes de anfibios en tres tipos de hábitat en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, Cordillera Central de Colombia
Structure and composition of amphibian assemblages in three types of habitat in the National Natural Park *Selva de Florencia*, Colombian Central Cordillera 227

Bioeconomía: el futuro sostenible
Bioeconomy: A sustainable future 188

Las perchas para aves como estrategia de restauración en la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá
Bird perches as restoration strategy in the micro-basin of La Vega River, Tunja, Boyacá 202

Utilización de macroinvertebrados acuáticos como herramienta para determinar la calidad del agua en la quebrada Santo Tomás, municipio de Pensilvania, Colombia
Utilization of aquatic macroinvertebrates as a tool to determine water quality in Santo Tomás ravine, Pensilvania municipality (Colombia) 212

Mass occurrence of the liverwort *Herbertus sendtneri* in a glacial lake in the Andes of Colombia
Presencia masiva de la hepática *Herbertus sendtneri* en una laguna glaciar en los Andes de Colombia 221

Primer registro de *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) en el departamento del Tolima, Colombia
First record of *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) from Tolima, Colombia 230

***Moutabea chartacea* (Polygalaceae), a new species from the north-central Amazon and Guayana Shield**
Moutabea chartacea (Polygalaceae), una nueva especie de la Amazonía nor-central y el escudo guayanés 232

Ciencias Naturales
Natural Sciences

Diversidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) asociadas con tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, Chocó, Colombia
The diversity of butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea) associated with three habitats in Pacurita, Quibdó municipality, Chocó, Colombia 237

Dinámica temporal de la riqueza de especies y la abundancia de mariposas frugívoras (Lepidoptera: Nymphalidae) en la sabana inundable del municipio de Arauca (Colombia)
Temporal dynamics of species richness and abundance of fruit-feeding butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae) in the flooding savannas of Arauca (Colombia) 246

Evaluación del efecto de *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) en el crecimiento de plántulas de *Oreopanax floribundus* (Araliaceae)
Evaluation of the effect of *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) on the growth of *Oreopanax floribundus* (Araliaceae) seedlings 255

Evaluación de resistencia de cultivares de soya (*Glycine ma*x L.) a aislamientos de *Phytophthora sojae* Kaufm. & Gerd. de la altillanura colombiana
Evaluation of soybean (*Glycine max* L.) cultivars resistance to *Phytophthora sojae* isolates from the Colombian eastern high plains 262

Patrones altitudinales de las comunidades vegetales en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca, Colombia
Altitudinal patterns of plant communities in the Chocó biogeographical region of Valle del Cauca, Colombia 269

External morphology of the fish parasite *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae), under the scanning electron microscope
Morfología externa del pez parásito *Paravandellia phaneronema* (Miles 1943) (Siluriformes: Trichomycteridae) observada mediante imágenes de microscopía electrónico de barrido 323

Sizes of the centric diatom *Actinocyclus normanii* as salinity function, a new tool for the assessment of paleoenvironments
Tamaños de la diatomea céntrica *Actinocyclus normanii* en función de la salinidad, una nueva herramienta aplicada a la interpretación de paleoambientes 330

Identificación de hongos y bacterias asociados a fustes de melina (*Gmelina arborea* ROXB) en el departamento del Tolima, Colombia
Identification of fungi and bacteria associated with candahar stems (*Gmelina arborea* ROXB) in the department of Tolima, Colombia 343

Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical
Temporary and spatial variation of nutrients and total suspended solids in the basin of a high mountain tropical river 353

Ciencias Químicas
Chemical Sciences

Caracterización del conjugado no covalente de grafeno y ácido fólico mediante espectroscopia Raman y métodos computacionales
Characterization of the non-covalent conjugate graphene-folic acid using Raman spectroscopy and computational methods
John J. Castillo, Angie E. Orduz, Ciro E. Rozo 96

Ciencias de la Tierra
Earth Sciences

Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada
Theoretical algorithm for estimating global solar radiation for a cloudless atmosphere 104

Reporte del hallazgo de restos de *Hilarcotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria) y de material asociado en una nueva localidad fosilífera del valle inferior del Magdalena, ciénaga de Zapatosa, Cesar, Colombia
Report on the finding of remains of *Hilarcotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria) and associated material in a new fossil locality in the Lower Valley of Magdalena, Zapatosa wetlands, Cesar, Colombia 280

El inicio de la emergencia en los Andes del norte: una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno
The onset of the mountain uplift in the northern Andes: A perspective based on Coniacian to Paleocene tectono-sedimentary studies 364

Cuatro modelos de redes de drenaje
Four Models of Channel Networks 379

La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano
Climatic uncertainty and the Colombian energy dilema 392

Modelo estructural del Campo Escuela Colorado a partir de modelos análogos
Structural model of *Campo Escuela Colorado* based on analog models 402

Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki
The Choco and Caribbean low-level jets during El Niño and El Niño Modoki events 410

Evidencias macromorfológicas y micromorfológicas de paleosuelos en el desierto de La Tatacoa y su variación sincrónica
Macromorphological and micromorphological evidence of the paleosols of La Tatacoa desert and its synchronic variation 422

Vida de la Academia 237

Académicos honorarios
Palabras Carlos Enrique Ruiz 439
Palabras Fernando Zalamea Traba 442

Comentarios académicos
Premio Nobel de Física 449
Premio Nobel de Medicina 452
Premio Nobel de Química 454

Comentarios bibliográficos 246
Comentarios bibliográficos 287

In Memoriam
Mariano Ospina Hernández 114
Henry Mauricio Martínez Gómez 456

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 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 biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, sicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

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 Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

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 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes 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 un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará cómo un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** 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.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice:
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/

COPE code of conduct:
https://publicationethics.org/resources/code-conduct

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

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, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de

desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente,-que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos 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 deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de **http://www.raccefyn.co**
El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (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. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor **ID*** **(**Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor **ID***.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

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 metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las 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 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: deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Referencias: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. 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 no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al*."

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

Lista de referencias. Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

Artículo de revista

Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen:** pp-pp.

Ejemplo

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. Nat Med., **7:** 33-40.

Libro

Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Capítulo de libro

Apellido, A. A., Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Revista en línea

Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: http://www...

Ejemplo

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. Biotropica, **10** (2): 110-121. Disponible en: http://www.jstor.org/pss/2388013.

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. J Cereb Blood Flow Metab. doi: 10.1177/0271678X16662476

Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en http://www.algaebase.org., accedida entre enero y junio de 2015.

Tablas y figuras: las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán 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, utilizar 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 todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen 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 pero 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 en 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 apoyó económicamente.

Consideraciones

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

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

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 aproximada y el número del volumen en el que el trabajo 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 orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificación 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 intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto 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, entre otros.

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, entre otros).

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 correspondiente 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 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 con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.

d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.

e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

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 se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también 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 de los coautores del trabajo 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 con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.
- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés.
- Título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
- Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

3. Estructura del artículo

Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Key words).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original.

Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPEG o PNG.

5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos

MINEDUCACIÓN

TODOS POR UN NUEVO PAÍS
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like 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 Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal´s website (**www.raccefyn.co**) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice:
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/

COPE code of conduct:
https://publicationethics.org/resources/code-conduct

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (**www.raccefyn.co**) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English 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 corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see http://www.icmje.org/ for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

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 Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

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.

Conclusions: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

References: these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al*.

Reference list: alphabetically and following the examples

Journal article

Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C. (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. Nat Med., **7:** 33-40.

Book

Last name, A. A. (year). Title, City, Country: Publisher

Example

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Book chapter

Last name, A. A., Last name, B. B. (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Journal on line

Last name, A. A. (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in http:/ /www…or DOI

Examples

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. Biotropica, **10** (2): 110-121. Available in: http://www.jstor.org/pss/2388013

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. J Cereb Blood Flow Metab. doi: 10.1177/0271678X16662476

References web pages

Date of the access

Example

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in http://www.algaebase.org., accesed in June 2015.

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.

Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

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.

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.).

Copyright Notice

Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.**

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author´s rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,** and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,** the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

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**, except in the following cases:

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, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. 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.

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.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal´s norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English.

- Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures.
- Figures in jpg or tiff format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

1. An abstract should be included in both Spanish and English.
2. Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
3. Introduction.
4. Materials and methods.
5. Results and Discussion for short communications.
6. Discussion.
7. Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
8. Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or tiff format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o PNG format

5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN´s norms found in the authors´ instructions

7. Abreviations

The first use is introduced in parentheses

8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

MINEDUCACIÓN

TODOS POR UN NUEVO PAÍS
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN