



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

80
Años
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 · Número 158 · Págs. 1-148 · Enero - Marzo de 2017 · Bogotá - Colombia





ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

80
Años
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 • Número 158 • Págs. 1-148 • Enero - Marzo de 2017 • 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
Felipe Guhl, M. Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
Leonardo Puerta Llerena, Ph. D.
Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia
Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
Luis Caraballo, M.D., M.Sc.
Universidad de Cartagena, Colombia
Eduardo Alberto Egea Bermejo, M.D., M.Sc.
Universidad del Norte,
Barranquilla, Colombia

Ciencias físicas

Bernardo Gómez, Ph. D.
Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
Rubén Antonio Vargas Zapata, Ph. D.
Universidad del Valle,
Cali, Colombia
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 Sepúlveda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
Carlos Alberto Duque Echeverri, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

María Elena Gómez, Doctor

Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Téllez, Ph. D.

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Álvaro Luis Morales Aramburo, Ph. D.

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Germán A. Pérez Alcázar, Ph. D.

Universidad del Valle, Cali, Colombia

Enrique Vera López, Dr. rer. nat.

Universidad Politécnica, Tunja, Colombia

Jairo Roa-Rojas, Ph. D.

Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Rafael Baquero, Ph. D.

Cinvestav, México

Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.

Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Hernando Ariza Calderón, Doctor

Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia

Ciencias químicas

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

Fanor Mondragón, Ph. D.

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.

Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

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

Héctor Fabio Zuluaga Corrales, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

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

Betty Lucy López Osorio, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, 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

Juan Armando Sánchez Muñoz, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, 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

Jorge Enrique Llorente, Doctor
Universidad Nacional Autónoma
de México, México

Santiago Melo Gaviria, Ph. D.
Universidad de Viena, Austria

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

Carlos Daniel Cadena Ordoñez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Santiago Madriñán, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias sociales

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

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

Ciencias de la tierra

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

Armando Espinosa, Ph. D.
Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia

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

Fabio Cediél Melo, Dr. rer. nat.
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Jaime Ignacio Vélez Upegui, Doctor
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

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

Matemáticas

Victor Albis, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

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

José R. Quintero, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Comité científico internacional

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

Antoine M. Cleef, Ph. D.
University of Amsterdam, Holanda

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

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

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

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

Asistencia y coordinación editorial Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diagramación
Johanna Morales

Impresión y acabados
Gente Nueva

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936
Tamaño: 21,5 x 28 cm
Papel: propalmate de 90 gr.
Solicitud de canje

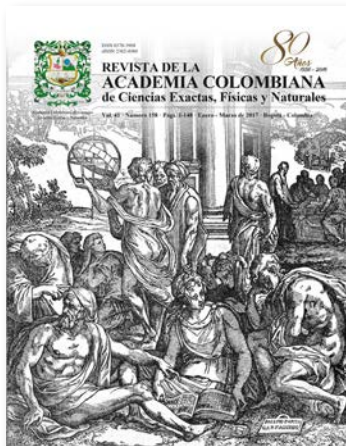
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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



Portada

Reproducción de la portada del volumen 1, número 1, de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, publicada en diciembre de 1936.

Giardino di Pensieri, El jardín del pensamiento. Fecha: 1540

Grabado en madera diseñado por Giuseppe Salviati (Giuseppe Porta, *Il Salviati*) (Castelnuovo di Garfagnana ca. 1520–Venecia, Italia ca. 1575)

Original de Marco Dente (Rávena, Italia 1490-Roma, Italia 1527)

Dimensiones: 23,9 x 19,3 cm

Colección del Museo Metropolitano de Arte, Nueva York, Estados Unidos (The MET)

Autorizada su reproducción el 19 de diciembre de 2016



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

80
Años
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 • Número 158 • Págs. 1-148 • Enero - Marzo de 2017 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

**Ciencias
Biomédicas**
Biomedical Sciences

Terapia génica en enfermedades neurodegenerativas y demencia post infarto cerebral: perspectiva de traslación **AP**

Gene therapy in neurodegeneration and dementia post-stroke

Johanna Gutiérrez-Vargas, Gloria Patricia Cardona-Gómez 6

On the influence of the mass definition in the stability of axisymmetric relativistic thin disks **OA**

Influencia de la definición de masa en la estabilidad de discos relativistas axialsimétricos

Eduar A. Becerra, Fredy L. Dubeibe, Guillermo A. González 22

**Ciencias
Físicas**
Physical Sciences

Simulaciones computacionales para estudiar el nanomundo **AP**

Computational simulations to study the nanoworld

Pamela Rubio-Pereda, Jonathan Guerrero, Noboru Takeuchi 30

Síntesis del superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ mediante sinterización por descarga luminiscente anormal **AO**

Synthesis of the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor through abnormal glow discharge sintering

Erika Yazmin Soto-Gómez, Armando Sarmiento-Santos, Carlos Arturo Parra-Vargas 36

Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá **AO**

Evaluation of the trophic state of El Salitre, the last urban reference wetland of Bogotá

Paulo César Pulido-López, Gabriel Antonio Pinilla-Agudelo 41

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

Trazabilidad de los registros de mamíferos en el marco del otorgamiento de licencias ambientales para proyectos de hidrocarburos en Colombia **AO**

Traceability of mammal records in the framework of environmental licensing of oil projects in Colombia

Paul Andrés Gómez-Sandoval, José Iván Mojica-Corzo, Ofelia Mejía-Egas 51

A new species of *Rhytidhysterion* (Ascomycota: Patellariaceae) from Colombia, with a provisional working key to known species in the world **OA**

Una nueva especie de *Rhytidhysterion* (Ascomycota: Patellariaceae) de Colombia, con una clave provisional para las especies conocidas en el mundo

Edier Soto-Medina, Robert Lücking 59

- Acción antioxidante conjunta de extractos etanólicos de *Mollinedia lanceolata*, *Croton leptostachyus* y *Siparuna sessiliflora* **AO****
 Joint antioxidant action of ethanolic extracts of *Mollinedia lanceolata*,
Croton leptostachyus and *Siparuna sessiliflora*
Claudia C. Pérez-Jaramillo, Wilmer Fernando Sánchez-Peralta,
Walter Murillo-Arango, John J. Méndez-Arteaga 64

- Variaciones de la acidez durante la incubación de las muestras en pruebas de demanda biológica de oxígeno **AO****
 Variations of acidity during incubation of samples in biological oxygen demand tests
Jorge Alonso Cárdenas-León, Ángela María Wilches-Flórez,
Cindy Viviana Vanegas-Castillo 71

- Variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian **AO****
 Intraseasonal variability of precipitation in Colombia and its relationship with the Madden-Julian oscillation
Claudia Elizabeth Torres-Pineda, José Daniel Pabón-Caicedo 79

- Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia **AP****
 On coastline changes between 1735 and 2011 and subsidence in Cartagena Bay, Colombia
Carlos Alberto Andrade-Amaya, Alex José Ferrero-Ronquillo, Hermann León-Rincón,
Héctor Mora-Páez, Henry Carvajal-Perico 94

- Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia **AO****
 Validation of the precipitation estimated by CMIP5 climate models in Colombia
Carlos Andrés Bonilla-Ovallos, Oscar José Mesa 107

- Composición física y química de los suelos fluviovolcánicos de Armero Tolima, Colombia **AO****
 Physical and chemical composition of fluviovolcanic soils in Armero, Tolima, Colombia
Alfredo José Torres-Benítez, Héctor Eduardo Esquivel, Fernando Tinoco 119

- Computation of matrices and submodular functions values associated to nite topological spaces **OA****
 Calculo de matrices y funciones submodulares asociadas a espacios topológicos nitos
Julian L. Cuevas Rozo, Humberto Sarria Zapata 127

- In Memoriam**
 Un ‘Héroe de la Salud’: Hernando Groot Liévano 137
 José Ignacio Martínez Rodríguez 139

- Enfoque y alcance**
 Focus and Scope 141

Terapia génica en enfermedades neurodegenerativas y demencia post infarto cerebral: perspectiva de traslación

Johanna Gutiérrez-Vargas, Gloria Patricia Cardona-Gómez*

Área de Neurobiología Celular y Molecular, Grupo de Neurociencias de Antioquia, Facultad de Medicina,
Sede de Investigación Universitaria, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 24 de noviembre de 2016

Resumen

Las enfermedades cerebrovasculares se han convertido en un problema de salud mundial debido a su alta tasa de mortalidad y discapacidad. En Colombia constituyen la tercera causa de riesgo de muerte y en el mundo son la primera causa de discapacidad física y mental. Se han evaluado muchas estrategias terapéuticas en modelos experimentales y en ensayos clínicos sin buenos resultados. Algunas de las falencias de los estudios sobre tales estrategias terapéuticas son el reducido tiempo de intervención (menos de cuatro horas y media), así como el poco tiempo de protección y la falta de seguimiento de la terapia, lo cual genera secuelas a largo plazo en los pacientes. La terapia génica ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para el tratamiento de las enfermedades neurodegenerativas; sin embargo, en el caso específico de la isquemia cerebral hay pocos estudios experimentales. En nuestras investigaciones hemos constatado el potencial de la terapia génica basada en el ARN de interferencia para prevenir y revertir la neurodegeneración y el deterioro cognitivo después de un infarto cerebral, aunque todavía deben sortearse algunas dificultades terapéuticas inherentes al sistema nervioso cerebral, así como concertar los intereses de los diversos sectores involucrados: el Gobierno, las empresas y el sector científico y académico, con el fin de incentivar la inversión y facilitar la aplicación en otras partes del país de las terapias promisorias propuestas en nuestra región para disminuir las secuelas de enfermedades crónicas no transmisibles, entre ellas la incapacidad física y mental después de un infarto cerebral. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Infarto cerebral; Enfermedades neurodegenerativas; Demencia; Terapia génica; ARN de Interferencia; Medicina de traslación.

Gene therapy in neurodegeneration and dementia post-stroke

Abstract

Cerebrovascular disease has become a worldwide health problem due to its high mortality and disability rate. It is the third leading cause of death risk in our country and the first cause of physical and mental disability in the world. Many therapeutic strategies have been evaluated both in experimental models and in clinical trials without success. One of the major shortcomings of these therapeutic studies is the limitation in the intervention time (less than four and a half hours) and the short time of protection or follow-up of the therapy, which generates long-term sequelae in the patients. Gene therapy has been shown to be a very useful tool for the treatment of neurodegenerative diseases; however, experimental studies are few, specifically in cerebral ischemia. Our research has demonstrated the potential benefit of RNA interference based gene therapy to prevent and reverse neurodegenerative effects and cognitive impairment following a stroke. However, therapeutic difficulties inherent to the cerebral nervous system should be overcome, and the interests of government, business and scientific and academic sectors should be coordinated to procure investment and to facilitate the translation of promising therapies proposed from our region aimed at reducing the sequelae of chronic non-communicable diseases, including physical and mental disability after a stroke. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Stroke; Neurodegeneration; Cognitive impairment; Dementia; Gene therapy; RNA interference; Translational medicine.

*Correspondencia:

Gloria Patricia Cardona-Gómez, patricia.cardonag@udea.edu.co; **Recibido:** 19 de noviembre de 2016; **Aceptado:** 7 de marzo de 2017

Isquemia cerebral

Accidente cerebrovascular: prevalencia y clasificación. Los accidentes cerebrovasculares (ACV) son la segunda causa de muerte en el mundo y la primera causa de discapacidad en los adultos (Bejot, *et al.*, 2007). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año 15 millones de personas sufren un accidente cerebrovascular y de ellos mueren 5,5 (10% del total de defunciones) de ellos, otros 5 quedan con alguna incapacidad permanente (CDC, 2008). Se estima que en 30 años y hasta el 2020 se habrían perdido 61 millones de días de vida sana a causa del ACV (CDC, 2008).

Debido al envejecimiento de muchas poblaciones en el mundo, las proyecciones para el año 2020 parecen indicar que el ACV seguirá siendo la segunda causa de muerte tanto en los países desarrollados como en aquellos en vía de desarrollo (Bejot, *et al.*, 2007). En términos de discapacidad, los ACV estarán entre los cinco principales contribuyentes, lo cual implica enormes cargas económicas para los sistemas de salud debido a los recursos que serán necesarios para atender a los pacientes en fase aguda, al igual que ofrecer a los sobrevivientes los cuidados a largo plazo (CDC, 2008).

Los dos principales mecanismos que causan daño cerebral en el ACV son, la isquemia y la hemorragia (Assarzagdegan, *et al.*, 2015). El accidente cerebrovascular de tipo isquémico que representa alrededor del 80% de los ACV, es debido a disminución o ausencia de circulación sanguínea hacia el cerebro. Al presentarse la disminución y cesar la oxigenación neuronal, se produce una disminución del metabolismo de estas células debido a la carencia de los sustratos necesarios. Los efectos de la isquemia son rápidos ya que el cerebro no almacena la glucosa necesaria como sustrato energético principal, lo que le hace incapaz de realizar el metabolismo anaeróbico (Goldstein, *et al.*, 2011).

La presencia de un trombo o émbolo puede generar la oclusión de una arteria cerebral, lo que conduce al desarrollo de un proceso isquémico en el territorio vascular afectado. Los mecanismos de compromiso y daño neuronal son causados por la hipoxia o la anoxia celular (Amlie-Lefond, *et al.*, 2009).

Patofisiología de la isquemia cerebral. Al obstruirse los vasos sanguíneos que suministran sangre a la totalidad o a la mayor parte del cerebro, la lesión se llama isquemia global, la que suele ocurrir durante un ataque cardíaco o una hipotensión sistémica aguda. Sin embargo, si sólo se produce la oclusión de los vasos que suministran sangre a un área determinada del cerebro, se genera una isquemia focal (Durukan, Tatlisumak, 2007; Dirnagl, Ladecola, Moskowitz, 1999). Aproximadamente el 80% de los casos de isquemia focal son resultado de la oclusión de la arteria cerebral media (ACM) (Durukan, *et al.*, 2007).

En la isquemia focal, la región que sufre el más grave grado de hipoperfusión sanguínea progresa rápidamente hacia un daño irreversible debido a una muerte necrótica, que representa el núcleo isquémico (Figura 1). Esta zona presenta bajo flujo sanguíneo cerebral (<10% del valor

basal) y daño irreversible del metabolismo energético. El tejido hipoperfundido restante que rodea el núcleo isquémico presenta un desequilibrio en los mecanismos de la autorregulación del flujo sanguíneo y se lo conoce como la zona de penumbra (Figura 1) (Moustafa, Baron, 2008). En esta región, las neuronas muestran alteraciones funcionales, si bien conservan una actividad metabólica mínima que preserva la integridad estructural durante un período de tiempo más largo, el que conduce a un patrón de muerte apoptótica (Moskowitz, Lo, Iadecola, 2010). La penumbra es potencialmente recuperable y representa un objetivo clave para la intervención terapéutica en la isquemia cerebral. Este período crítico de viabilidad durante el cual este volumen de tejido cerebral está en riesgo, es conocido como la “ventana de oportunidad”, ya que el déficit creado por la isquemia puede ser parcial o totalmente revertido dentro de un período crítico de dos a cuatro horas y media. Sin embargo, a menos que se mejore la perfusión, las células de la zona de penumbra están en riesgo de morir en unas pocas horas por necrosis (Lo, 2008).

A nivel molecular, el desarrollo de la lesión neuronal isquémica está dada en gran medida por un incremento en la liberación al espacio sináptico de neurotransmisores de tipo excitatorio, principalmente de glutamato. Este proceso llamado “excitotoxicidad” es una respuesta canónica como consecuencia de la falla de la bomba de iones y déficit energético, así como también por la insuficiencia de mecanismos de retoma del neurotransmisor por parte de células astrocíticas (Choi, Rothman, 1990).

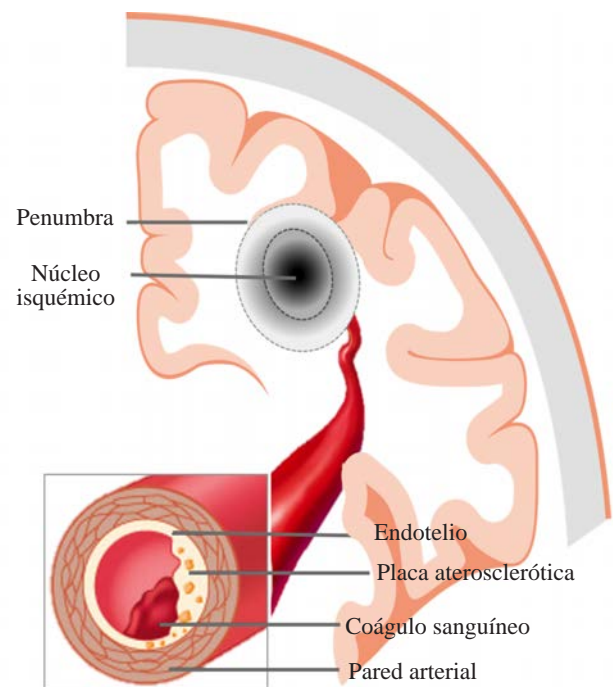


Figura 1. El infarto generado tras una isquemia focal. Éste se divide principalmente en el núcleo isquémico y la zona de penumbra; generalmente se presenta por la formación de una placa ateroesclerótica o un coágulo sanguíneo en el territorio de la ACM.

La sobrecarga de glutamato conduce a la estimulación prolongada de receptores ionotrópicos de glutamato de tipo AMPA (ácido α -amino-3-hidroxi-5-metil-4- isoxazolepropionico) y de receptores NMDA (ácido N-metil-D-aspartico), los que aumentan drásticamente el influjo de calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^{+}), potasio (K^{+}) y agua en las neuronas. La acumulación excesiva de iones y la desregulación simultánea de varias vías de señalización mediadas por proteasas, lipasas, y nucleasas, llevan a la alteración de la función neuronal y conducen a la muerte celular (Wong, Kim, Gwag, 2002).

Discapacidades a corto y largo término luego de una isquemia cerebral. Anualmente cerca de 15 millones de personas en todo el mundo sufren una isquemia cerebral y cerca del 30% de éstos experimentan discapacidades residuales significativas (CDC, 2008), lo que hace que esta enfermedad sea una de las principales causas de discapacidad en el mundo, lo que ha sido conceptualizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una restricción resultante de la falta de capacidad para llevar a cabo una actividad considerada como normal para el hombre (OMS, 2016).

Esta discapacidad es doble y se clasifica como motora y de locomoción, de comunicación, emocional, visual, auditiva y cognitiva. El conjunto de las discapacidades físicas en los sobrevivientes de un infarto cerebral es simultáneo o secundario a la enfermedad, temporal o permanentemente, el cual causa daños en las actividades de la vida diaria como alimentarse, vestirse, cuidar de la higiene personal, uso de transporte, entre otros (Dobkin, Dorsch, 2013). Horn, et al., 2003 consideran que la hemiparesia o hemiplejía, es la principal discapacidad grave de la sociedad actual. El ajuste a esta discapacidad física después de un ACV es un proceso de colaboración entre el paciente, la familia y los profesionales de la salud. Esta colaboración no se limita al ambiente hospitalario ya que continúa durante todo el curso de la enfermedad.

Sin embargo, el deterioro cognitivo posterior al evento isquémico casi siempre es ignorado en los pacientes, debido precisamente a la severidad de la discapacidad física que presenta la mayoría de ellos. Estos pacientes presentan un grado de repercusión que puede ser dividido en deterioro cognitivo leve y demencia (Sun, Tan, Yu, 2014). Según Nys, et al., 2005 una alta proporción de sobrevivientes al infarto cerebral tienen deterioro cognitivo luego de los 3 meses y, en ocasiones, la demencia solo es detectada luego de varios años de ocurrida la lesión. Aunque la prevalencia del deterioro cognitivo post-isquemia es alta según los datos actuales, todavía hay pruebas que demuestran que los actuales criterios de valoración pueden subestimar la frecuencia del deterioro cognitivo en los sobrevivientes. La prevalencia del deterioro cognitivo varía entre el 20% al 80%, proporción que se define según la casuística de cada país, los criterios de diagnóstico y el tiempo post-lesión (Sun, 2014). De acuerdo con la OMS en Sur América los afectados por ACV suelen ser cinco o seis afectados por

cada 1000 habitantes, siendo Brasil el más alto con 11 por cada 10000 (Lavados, et al., 2007). Sin embargo, no hay cifras concretas de cuantas personas sufren problemas cognitivos, debido a los pocos estudios realizados y a la falta de conciencia de que el deterioro cognitivo se constituye como una creciente problemática de salud en los pacientes que sobreviven luego de una isquemia cerebral. No obstante, se estima que en América Latina la gente con demencia incrementará en un 368% para el 2050, más alto que en EEUU y Europa (WHO, 2015, ADI/BUPA, 2013); de esta cifra, una parte importante representa la consecuencia de enfermedades cerebrovasculares, como consecuencia del sedentarismo y una ingesta alta en grasas y azúcares.

Hay pruebas que sugieren que el deterioro del hipocampo está asociado con la demencia post-isquemia. Un estudio realizado por Szabo, et al., 2009 sugiere que la lesión en el hipocampo podría conducir al deterioro persistente de la memoria, considerado como la consecuencia habitual de la oclusión de la arteria cerebral posterior. En recientes estudios, Gemmell, et al., 2012, 2014, al analizar el volumen del hipocampo en muestras post-mortem de pacientes que presentaron demencia, sugirieron que el volumen del cerebro alterado era entre el 10-20% en las regiones de CA1 y CA2 y del 20% en las regiones de CA3 y CA4 del hipocampo. Sin embargo, son aún inciertos el o los mecanismos de la lesión post-isquémica en el hipocampo y si ellos se relacionan con el deterioro cognitivo. Algunos estudios, incluidos los nuestros (Castro-Alvarez, et al., 2011, 2014a), han demostrado que la hiperfosforilación de Tau es considerada un marcador de neurodegeneración posterior a la isquemia cerebral y está estrechamente correlacionado con el desorden cognitivo y la demencia (Pluta, et al., 2011)

Hasta el momento no hay ningún tratamiento eficaz para tratar el deterioro cognitivo post-isquemia. Algunos de los fármacos usados para el tratamiento de la demencia en la enfermedad de Alzheimer (AD), han demostrado algunos efectos positivos en la discapacidad cognitiva post-isquemia (Brainin, et al., 2015). Por ejemplo, agentes anti-inflamatorios, moduladores de barrera hematoencefálica, antagonista de la endotelina, flavonoides, agentes inmunosupresores, antidepresivos, agentes neurotróficos entre otros. Sin embargo, pese a que ninguno de ellos se ha establecido como tratamiento efectivo, se han definido unos objetivos claves para la prevención del deterioro cognitivo, los que se centran en el tratamiento agudo (para limitar el daño desde el inicio de la lesión y prevenir la recurrencia temprana) y en la prevención de la recurrencia a largo plazo.

Terapia de neuroprotección en isquemia cerebral: futuras perspectivas en medicina translacional. Durante las últimas dos décadas, los agentes neuroprotectores diseñados para bloquear la muerte celular han sido investigados en modelos animales de isquemia cerebral. Se han encontrado numerosos fármacos que reducen el tamaño del infarto en modelos de isquemia en roedores, conejos y primates. Sin embargo, la neuroprotección como estrategia para el

tratamiento del ictus, eficaz en modelos experimentales, ha fracasado en estudios clínicos en fase III (**Cheng, Al-Khoury, Zivin, 2004**). Sumado a lo anterior, la única terapia vigente para el infarto cerebral está limitada al tratamiento con el factor activador del plasminógeno tisular recombinante (rt-PA), que, aunque mejora el pronóstico funcional, sólo se emplea en menos de un 3% de pacientes (**Castillo, et al., 2003**).

Varias dificultades se han identificado a la hora de establecer una terapia eficaz que limite las devastadoras consecuencias del reducido flujo sanguíneo en la zona de penumbra y prevenga los insultos secundarios inducidos por la reperfusión (**Moskowitz, et al., 2010**). Por ejemplo, un enfoque hacia un único evento de la cascada isquémica podría no ser suficiente para disminuir las consecuencias de una condición multifactorial como lo es la isquemia cerebral (**Chavez, et al., 2009**). En este escenario, tratamientos individuales específicos efectivos a cierto tiempo, bajo un rango dado de condiciones fisiológicas, pueden ser ineficaces. Sin embargo, si lo utilizamos como contexto de acción terapéutica, eventos troncales en el fenómeno de isquemia/re-perfusión como la excitotoxicidad por glutamato y evitamos su onda de propagación por la circuitería neural local, se podrían bloquear varios fenómenos fisiopatológicos asociados, como la activación de calpains, caspasas, actividad enzimática, disregulación de sustratos, activación de rutas de muerte, despolimerización del citoesqueleto de microtúbulos y de actina, entre otros.

Por ejemplo, el uso de las estatinas ha mostrado tener efectos benéficos luego de un evento isquémico (**Gutiérrez-Vargas, Múnera, Cardona-Gómez, 2015**). Las estatinas, inhibidores competitivos de la 3-hidroxi-3-metilglutaril coenzima A (HMG-CoA) reductasa, son fármacos reductores del colesterol y con múltiples efectos pleiotrópicos en isquemia cerebral, tales la como mejora de la función endotelial, tienen potencial efecto anti-oxidante, antitrombótico y anti-inflamatorio, entre otros (**Goldstein, et al., 2011**). Nuestros estudios han mostrado que la terapia post-isquemia con estatinas recupera el déficit neurológico y el de memoria, así como el aprendizaje, a la par que activa vías de supervivencia y plasticidad sináptica asociadas a la recuperación neuronal. Estos fármacos también regulan los receptores de glutamato de tipo NMDA, los cuales juegan un papel crucial en la excitotoxicidad por glutamato, y por ende, estos fármacos regulan de manera troncal eventos primarios que generan la lesión.

Otra alternativa que se ha propuesto, ha sido la combinación de dos o más agentes potenciales neuroprotectores, cada uno con un objetivo diferente con respecto a la cascada neurodegenerativa, lográndose así efectos sinérgicos en la protección de la lesión isquémica. Por ejemplo, se han hecho estudios en modelos experimentales donde las estatinas son administradas en combinación con el rt-PA con obtención de grandes beneficios en cuanto a la recuperación post-infarto (**Zhang, Zhang, Chopp, 2012**). De acuerdo con lo anterior, el o los agentes neuroprotectores ideales deberían demostrar

eficacia el evaluar estados neurológicos, con soporte histopatológico, y determinación del volumen de infarto y teniendo en consideración estudios de biodistribución, bioequivalencia, farmacocinética y farmacodinamia, así como análisis de seguridad y toxicidad que demuestren el mínimo de efectos adversos (**Cheng, et al., 2004**).

La gran discrepancia existente entre los resultados obtenidos en el laboratorio y los ensayos clínicos hace que se dificulte la translación de muchas terapias ensayadas con éxito en modelos experimentales, (**Cheng, et al., 2004**). En los modelos de accidente cerebrovascular, los investigadores suelen elegir animales jóvenes y sanos. Sin embargo, los pacientes con infarto cerebral suelen ser de edad avanzada y sufren de múltiples enfermedades crónicas, tales como la arteriosclerosis, hipertensión, diabetes e hiperlipidemia (**Demchuk, Buchan, 2000**).

Otro impedimento, es que la mayor parte de los estudios en modelos de isquemia se realizan a corto plazo, basándose en el hecho de que los tratamientos iniciados en las primeras horas del establecimiento de los síntomas tienen una mayor probabilidad de convertirse en una terapéutica efectiva. Sin embargo, muchos agentes terapéuticos considerados efectivos en estudios de la fase aguda han resultado ser indistinguibles de su vehículo en la etapa sub aguda o crónica. Ello es debido, en parte, a la falta de determinación de la ventana de acción terapéutica del tratamiento, al hecho de tener en cuenta que luego de un evento isquémico se generan cambios fisiopatológicos diferentes que varían con respecto al tiempo post-lesión, por ejemplo: a pocas horas de la muerte celular, luego de varios días, el proceso inflamatorio, la astrogliosis y la microgliosis; y posterior a ello, luego de días y semanas, aparece la pérdida de espinas y dendritas que perduran a largo término post-infarto y desencadenan así pérdida de funciones (**Posada-Duque, Barreto, Cardona-Gomez, 2014**). Aunque en la mayoría de los ensayos clínicos 90 días es el tiempo elegido como criterio de valoración principal para los estudios de neuroprotección, pudiera resultar muy apropiado prolongar el tiempo de seguimiento de la evolución clínica del paciente (**Cheng, et al., 2004**) para determinar posibles complicaciones médicas por tratamientos a largo plazo o, por el contrario, para demostrar la eficacia del agente neuroprotector al evitar la secuelas a largo término post-isquemia, y de este modo, ir construyendo criterios para ampliar el uso y los beneficios de la terapia, o generar alertas y especificar protocolos de atención al paciente con infarto cerebral.

De acuerdo con todo lo anterior, se espera entonces que los estudios de neuroprotección en modelos experimentales se ajusten a las condiciones reales que se presentan en los pacientes que sufren un episodio de isquemia, como factores de morbilidad, edad, tiempo post-infarto; y, además, que se cuente con las herramientas metodológicas más apropiadas para abordar la problemática desde el aspecto paraclínico, histopatológico, bioquímico-molecular y la concomitante evaluación funcional motora, cognitiva y emocional, con perspectiva de traslación.

Terapia génica en infarto cerebral ventajas y limitaciones

Generalidades de la terapia génica. La terapia génica es un tratamiento alternativo a los abordajes farmacológicos, quirúrgicos y de índole convencional que se están desarrollando tanto en investigación básica como clínica. Principalmente, consiste en la modificación específica de un gen para prevenir, o remediar, una condición patológica para el organismo. Esta técnica se basa en la interferencia, corrección o sustitución del gen defectuoso dentro de las células que expresan la patología por el gen normal y su correcta proteína funcional de manera de retardar, estabilizar o revertir el curso de la enfermedad (Grimm, Kay, 2007).

De acuerdo con el tipo de trastorno, la terapia génica se realiza a través de alguno de los siguientes abordajes (Fillat, 2004):

Adición génica: consiste en introducir una copia correcta del gen funcional para que éste produzca - en cantidades adecuadas - la proteína correspondiente en el tejido a tratar. Es el procedimiento más utilizado.

Corrección génica: busca corregir el gen alterado sustituyéndolo por el gen correcto mediante recombinación homóloga, aunque por el momento este método es poco eficiente. En su lugar, es posible intercambiar un nucleótido específico mutado, lo que resulta útil para tratar enfermedades con mutaciones puntuales.

Supresión génica: consiste en reducir la expresión de un determinado gen, lo cual se logra mediante el uso de RNA de interferencia (shRNA) que induce la degradación o silenciamiento del RNA mensajero (mRNA) blanco.

El mecanismo del RNA de interferencia puede inducirse mediante la presencia de shRNA codificados directamente desde el núcleo o bien por shRNA generados a partir de un vector de ADN que contiene un promotor específico de tejido y que sintetiza constitutivamente a estos shRNA. Cualquiera que sea su origen, los shRNA presentan algunas características en común: contienen de 21 a 23 nucleótidos de longitud y son dúplex con morfología tipo pasador o tallo-asa (*hairpin*); contienen un extremo 5' fosforilado y un extremo 3' con dos nucleótidos que sobresalen de la estructura tipo pasador. Estas características los hacen específicos para que puedan ser reconocidos por el complejo de silenciamiento inducido por RNA (RISC, del inglés *RNA-induced silencing complex*). RISC es una nucleasa efectora multicomponente que reconoce al shRNA dúplex y, como presenta actividad helicasa, lo que hace es deshebrar al shRNA dúplex, con el ingreso de ATP, a través de la proteína catalítica denominada Argonauta. De esta forma RISC junto con el shRNA de una sola hebra, detecta al mRNA blanco al reconocerlo por apareamiento de bases altamente específica (Boudreau, Rodríguez-Lebron, Davidson, 2011).

El silenciamiento génico post-transcripcional (proceso completamente citoplasmático) es el resultado del corte endonucleolítico del mRNA blanco mediante una enzima con actividad de RNasa H, conocida como *slicer*, la cual

tiene un dominio denominado PIWI que interviene en el silenciamiento génico (Parker, Roe, Barford, 2004). El corte ocurre sólo en la región homóloga entre el mRNA y el shRNA (Juliano, *et al.*, 2005). Además, RISC tiene la capacidad de degradar completamente al mRNA. Adicionalmente, RISC posee actividad de polimerasa, de modo que emplea los mismos shRNA como molde para hacer múltiples copias y amplificar la señal de silenciamiento (Boudreau, *et al.*, 2011).

En el marco de la terapia basada en la interferencia génica, se ha ensayado la administración de shRNA en modelos experimentales y ensayos clínicos mediante diversos vehículos entre los que se cuentan con vectores virales, liposomas y nanopartículas (Li, Huang, 2000; Kay, Glorioso, Naldini, 2001). Los vectores virales poseen una mayor eficacia en la transferencia de ADN-RNA, pero son más propensos a generar una respuesta inmune no deseada en el paciente. La integración del gen de interés al vector requiere de la eliminación de los genes que le confieren su virulencia incorporándose en su lugar la secuencia deseada. Dentro de los vectores virales, los más utilizados son los retrovirus, adenovirus, lentivirus, virus de herpes simple y virus adeno asociados (Kay, Glorioso, Naldini, 2001; CLINIGENE). Estos últimos son los que presentan menos respuesta inflamatoria. Los vectores no virales son menos efectivos en la transferencia, pero más seguros y más sencillos de elaborar, caracterizar y manipular (Boudreau, *et al.*, 2011).

Terapia génica en la prevención de neurodegeneración. Las enfermedades neurodegenerativas han sido de las más evaluadas en terapia génica, luego del cáncer y las enfermedades genéticas y metabólicas. Durante la última década, los científicos han avanzado mucho en la evaluación de terapias basadas en shRNA para las enfermedades que afectan el sistema nervioso central (SNC) (Boudreau, Davidson, 2010).

Para una serie de trastornos neurodegenerativos por ejemplo, la AD, la enfermedad de Parkinson (PD) y el deterioro post-infarto cerebral, la acumulación anómala de proteínas parece desempeñar un papel central en la aparición de la enfermedad o en la progresión (Aguzzi, O'Connor, 2010). Así, una modesta reducción en los niveles de proteínas neurotóxicas se espera que proporcione un significativo alivio terapéutico. Usando un enfoque basado en shRNA, los investigadores han inhibido con éxito la expresión de proteínas que causan enfermedades en modelos animales, donde, en la mayoría de los casos, ésta inhibición se correlaciona con la mejora de los fenotipos neuropatológicos y de comportamiento. Por ejemplo, la AD es la principal causa de demencia en todo el mundo y se caracteriza por la presencia de placas amiloides y ovillos neurofibrilares (NFT) en el cerebro. En nuestra investigación (Piedrahita, *et al.*, 2010) se bloqueó la producción de NFT en ratones triple-transgénicos para la AD, silenciando la ciclina dependiente de quinasa 5 (CDK5), la cual es la encargada de hiperfosforilar la proteína tau y llevar a la formación de NFT. Por otro lado, la PD

es la segunda enfermedad neurodegenerativa más común y ésta se caracteriza histopatológicamente por la formación de cuerpos de Lewy en el cerebro, los cuales son agregados compuestos principalmente de la proteína alfa-sinucleína (α -syn) (Halliday, GMcCann, 2010). Una sola mutación en α -syn, así como la duplicación o triplicación genética del gen están vinculados a parkinsonismo hereditario, lo que llevó a los investigadores a utilizar el shRNA como un agente terapéutico verosímil en la PD (Sapru, et al., 2006).

Estudios preclínicos de terapia génica en infarto cerebral. La terapia génica utilizando shRNA tiene el potencial de ser aplicada para el tratamiento de lesiones cerebrales agudas en humanos debido a que su eficacia ha sido confirmada en modelos de infarto cerebral (Fukuda, Badaut, 2013). Varios estudios reportan resultados satisfactorios sobre la administración de shRNA en el modelo de la oclusión transitoria de la arteria cerebral media (t-MCAO) dirigidos a dianas terapéuticas que participan en la fisiopatología post-isquémica, desde la muerte celular apoptótica hasta la inflamación (Tabla 1).

Al principio, los investigadores se centraron en estrategias neuroprotectoras para limitar la propagación de las vías de muerte celular por apoptosis. El primer estudio utilizó un shRNA contra Beclin1, una proteína responsable de la autofagia celular y la apoptosis. Las ratas tratadas con shRNA para Beclin1 mostraron disminución de volumen del infarto y una mejora de los resultados neurológicos, así

como disminución de la apoptosis (Zheng, et al., 2009). Del mismo modo, en un modelo de rata inducido con la inyección de la endotelina 1 y utilizando un shRNA contra la caspasa-3, se mostró una disminución de la apoptosis y una mejora en la recuperación funcional de la extremidad anterior (Al-Jamal, et al., 2011). Un estudio publicado en el mismo año, tuvo como diana terapéutica a otra proteína implicada en la cascada apoptótica, la quinasa reguladora de la señal apoptótica quinasa 1 (ASK1). Como el nombre lo indica, ASK1 juega un papel en la apoptosis y la diferenciación celular, así pues, los ratones tratados con el shRNA para ASK1 mostraron disminución del volumen del infarto y de la muerte celular (Kim, Cho, Lee, Kim, 2011). Sin embargo, es importante señalar que, en estos estudios, la administración del shRNA se produjo antes del evento isquémico, lo que limita los enfoques de la translación clínica.

Además, se ha intervenido compartimentos vasculares con un shRNA contra el receptor activado por la proteasa -1 (PAR-1) en un modelo de t-MCAO en ratón. PAR-1 está implicado en la coagulación sanguínea y sirve como otra opción viable para la estrategia trombolítica junto con el rt-PA. El shRNA contra PAR-1 siete días antes de la lesión resultó en una disminución de volumen del infarto 24 y 72 h después de la lesión y un menor déficit neurológico en las mismas ventanas de tiempo evaluadas (Price, et al., 2010). Adicionalmente en la isquemia cerebral, la hipoxia que resulta de la reducción en la entrega de oxígeno al cerebro,

Tabla 1. Estudios *in vivo* usando shRNA en modelos de isquemia cerebral

Diana terapéutica	Evento patofisiológico	Modelo de isquemia	Método de administración del shRNA	Tiempo de intervención	Resultados
Caspasa 3 (Al-Jamal, et al., 2011)	Apoptosis	Inyección de endotelina-1 en ratas	Inyección intracerebral en corteza	24 horas antes 24 horas después	Reducción en el déficit comportamental (fue significativamente reducido solo a las 24 horas antes de la isquemia)
Beclina 1 (Zheng, et al., 2009)	Apoptosis y Autofagia	t-MCAo en ratas	Inyección en el ventrículo lateral	7 días antes	Reducción en el volumen del infarto y una mejora en pruebas funcionales
Ask1 (Kim, et al., 2011)	Apoptosis	t-MCAo en ratones	Minibombra osmótica ventricular	Continuamente durante 3 días antes	Reducción en el volumen de infarto
PARK1 (Price, et al., 2010)	Cascada de coagulación	t-MCAo en ratones	Inyección en el ventrículo lateral	7 días antes	Reducción en el volumen de infarto y en el déficit neurológico
HIF1 α (Chen, et al., 2009)	Cascada inducible a la hipoxia	t-MCAo en ratas	Inyección intraparenquimal	<1 hora después	Reducción en la mortalidad, en el déficit neurológico, en el daño de la barrera hematoencefálica, y en la muerte celular
GPR17 (Zhao, et al., 2012)	Microgliosis Neuroinflamación	t-MCAo en ratas	Inyección intracerebro-ventricular	Una vez durante dos días antes hasta los 7 días después	Reducción en la pérdida neuronal, en la disfunción neurológica y en el volumen de infarto
HMGB1 (Lecca, et al., 2008)	Neuroinflamación	t-MCAo	Intranasal	1 hora antes	Reducción en el volumen de infarto y mejora comportamental

tiene enormes efectos sobre la muerte celular. Una proteína clave en este punto es el factor 1 inducible por hipoxia (HIF1 α), que es inducido después del accidente cerebrovascular y está implicado en la disfunción de la unidad neurovascular. Al utilizarse un shRNA para HIF1 α una hora después de la t-MCAO en ratas, se disminuyó la disrupción de la barrera hematoencefálica, se produjo una disminución de la mortalidad y disminución del volumen del infarto, lo cual se asoció con mejoras en el comportamiento. Estos resultados fueron concomitantes con una menor expresión de la proteína p53 y menor actividad de la caspasa-3 (Chen, *et al.*, 2009), generando grandes expectativas de traslación en situación post-infarto cerebral.

Otro mecanismo de lesión importante es la neuroinflamación. En un estudio reciente, la administración repetida de shRNA contra un blanco de la vía neuroinflamatoria brindó la oportunidad de estudiar los efectos agudos y crónicos de la administración de un shRNA (Zhao, *et al.*, 2012). Los autores de dicho trabajo intervinieron la proteína G acoplada al receptor 17 (GPR17), una proteína con funciones propuestas en la neuroinflamación post-isquémica. Estudios previos en los que GPR17 se inhibió mediante un oligonucleótido antisentido, mostraron efectos benéficos después del accidente cerebrovascular isquémico (Lecca, *et al.*, 2008). Zhao, *et al.*, 2012, examinaron específicamente el efecto de shRNA contra GPR17 en la activación microglial en las etapas aguda y crónica. En el estudio lograron reducir la microglía luego de 14 días, pero no a las 24 horas después de la lesión.

Otras proteínas importantes durante la fase neuroinflamatoria post-isquémica son las proteínas de alta movilidad del grupo de caja 1 (HMGB1), secretadas por las células necróticas para el reclutamiento de células pro-inflamatorias (Bianchi, Manfredi, 2007). Se encontró que una inyección intracortical de shRNA contra HMGB1 tuvo efecto neuroprotector después del accidente cerebrovascular isquémico a través de la reducción de la activación microglial y la apoptosis neuronal (Kim, *et al.*, 2006, 2010). En experimentos posteriores, la administración intranasal de este shRNA en un modelo de rata de t-MCAO, dio lugar a una reducción significativa de la HMGB1 en varias regiones del cerebro, pero no en hígado, pulmón, riñón, o corazón. Además, esta reducción efectiva se correlacionó con mejoras en las pruebas de comportamiento (Kim, *et al.*, 2012). Un punto importante a resaltar en este estudio en particular fue su método de administración. Aunque el shRNA fue administrado antes de la lesión, se utilizó una administración intranasal, por tanto, se evitó uno de los mayores obstáculos para la administración de fármacos al cerebro: la barrera hematoencefálica. Importante resaltar que la administración intranasal es una de las herramientas más prometedoras cuando se quiere proponer una terapia con una perspectiva de traslación clínica, no sólo para la entrega de shRNA en el cerebro, sino también para la entrega de otro tipo de fármacos (Thorne, *et al.*, 2004, 2008).

CDK5 como blanco terapéutico en el tratamiento del infarto cerebral. La quinasa-dependiente de ciclina 5 (CDK5) es una quinasa serina/ treonina, miembro de la familia de quinastas dependientes de ciclinas. De forma similar a otros miembros de este grupo de quinastas, CDK5 necesita unirse a una subunidad reguladora para ser activada. Sin embargo, esta quinasa no requiere la unión a ciclinas para su activación y, a cambio de ello, se asocia con activadores denominados p35 y p39, los cuales son estructuralmente similares a las ciclinas (Lopes, Agostinho, 2011).

En contraste con otros miembros de esta familia de quinastas, CDK5 no se encuentra directamente involucrada con el progreso del ciclo celular y su actividad predomina en neuronas post-mitóticas (Tsai, *et al.*, 1993) dado que sus activadores p35 y p39 son expresados principalmente en SNC (Zheng, Leung, Liem, 1998). Sin embargo, aunque la actividad de CDK5 es vital para el correcto desarrollo del SNC, su desregulación ha mostrado tener un papel crítico en el proceso neurodegenerativo crónico de varias enfermedades, incluidas la AD y la PD, la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) y también después de una lesión aguda causada por una isquemia cerebral (Alvira, *et al.*, 2008).

CDK5 en la sinapsis: funciones y disfunciones. CDK5 juega un papel importante en una variedad de procesos fisiológicos y patológicos. Esta multifuncionalidad incluye la participación en el desarrollo del sistema nervioso, la plasticidad sináptica y la neurodegeneración (Lopes, *et al.*, 2011; Angelo, Plattner, Giese, 2006). El SNC requiere la migración programada, la diferenciación y la conexión de las neuronas para formar circuitos funcionales capaces de expresar la plasticidad sináptica (Angelo, *et al.*, 2006). Estudios en varias líneas de ratones mutantes han demostrado que CDK5 es fundamental para todas estas etapas de desarrollo del SNC. Fenotípicamente ratones mutantes nulos para CDK5, así como doble mutantes para p35 / p39, exhiben una alteración de la arquitectura laminar cortical, así como trastornos en la citoarquitectura en el cerebelo, tronco cerebral y el hipocampo (Ko, *et al.*, 2001).

En la pre y post sinápsis se producen mecanismos moleculares de la plasticidad sináptica, los que implican la regulación de la liberación vesicular, cambios en la conductancia de los canales iónicos y modulación de actividades quinasa y fosfatasa (Vautrin, Barker, 2003). Diversas investigaciones han mostrado que CDK5 presenta una importante contribución en la plasticidad sináptica en cada uno de estos niveles y han implicado a CDK5 en la fosforilación directa de numerosos sustratos relevantes para la plasticidad sináptica, por ejemplo los receptores ionotrópicos de glutamato, proteínas de adhesión celular y proteínas del citoesqueleto (Lopes, *et al.*, 2011; Angelo, *et al.*, 2006). Dentro de las proteínas del citoesqueleto que son sustrato directo de CDK5 está la proteína Tau, la cual participa en el ensamble y desensamble de microtúbulos a través de la incorporación dinámica de monómeros de tubulina para formar los axones y dendritas neuronales;

los cuales contribuyen al mantenimiento de la forma y del transporte celular. Tau también establece vínculos entre microtúbulos y otros elementos del citoesqueleto como los neurofilamentos u otras proteínas como son la espectrina y filamentos de actina. En el cerebro normal, el equilibrio entre fosforilación, así como la defosforilación de Tau por parte de CDK5, de otras quinasas y fosfatasa, origina cambios estructurales y conformacionales, lo que regula la estabilidad del citoesqueleto y, consecuentemente, la morfología axonal (Kimura, Ishiguro, Hisanaga, 2014).

Otra de las grandes funciones de CDK5 correlacionado a su papel en plasticidad sináptica, es en el aprendizaje y la memoria (Angelo, et al., 2006). En particular, los modelos transgénicos en animales han revelado papeles algo opuestos en cuanto al papel de CDK5 en el aprendizaje y la formación de la memoria. Un papel positivo de CDK5 se identificó en ratones $p35^{-/-}$, los cuales muestran depotenciación, reducción de la LTP y la inducción defectuosa de la depresión a largo plazo (LTD), mecanismos que son electrofisiológicos relacionados con la formación de la memoria (Ohshima, et al., 2005). Del mismo modo, ratones $Cdk5f/f/T29$ en los que no hay expresión de CDK5 en las neuronas piramidales CA1 del hipocampo, revelaron un deterioro de la memoria y la plasticidad sináptica (Guan, et al., 2011) En contraste, Hawasli, et al., 2007, demostraron que la pérdida inicial de CDK5 en un modelo de ratón *knockout* condicional, genera una mayor LTP y mayor plasticidad mediada por los receptores NMDA y una mejora en el rendimiento de tareas como el aprendizaje.

Pese a las funciones que cumple CDK5 en plasticidad, desarrollo neuronal y memoria, su sobre-activación desencadena eventos neurodegenerativos que van desde muerte celular, desestabilización de los microtúbulos, alteración del citoesqueleto de actina, pérdida de la adhesión celular y alteraciones de memoria y aprendizaje. La desregulación de la actividad de CDK5 se inicia con el corte de sus activadores p35 y p39 a través de las calpaínas, las cuales son un grupo de proteasas citosólicas activadas por el calcio intracelular (Camins, et al., 2006).

Después de un evento isquémico la sobre-activación de receptores de glutamato de tipo NMDA y AMPA conlleva a un incremento de calcio intracelular con activación las calpaínas, las cuales cortan a los activadores p35 y p39 para generar a p25 y p29, respectivamente (Figura 2). La vida media de p25 y p29 es significativamente más larga (alrededor de tres veces mayor a la de p35 y p39), así como la unión a la quinasa de estos activadores, lo que es mucho más fuerte que la unión de p35 y p39 (Patrick, et al., 1998; Amin, Albers, Pant, 2002); ello resulta en un aumento de la actividad de p25/CDK5 (o p29), en comparación con p35/CDK5 (o p39). Por otro lado, p25 y p29 carecen de un sitio de miristoilización amino-terminal, modificación necesaria para mantener la proteína en la periferia de la célula, en la membrana celular (Asada, et al., 2008). De esta manera, la interacción de p25 con CDK5 no solo conlleva

una activación de la quinasa de una manera sostenida en el tiempo, sino que modifica su distribución celular, concentrándose en el citoplasma y en el núcleo, alterando su especificidad de sustratos y desencadenando la muerte celular (Asada, et al., 2008; Patrick, et al., 1999).

Se ha encontrado que en ratas la expresión CDK5, así como el clivaje de p35, aumenta en las neuronas de la región de penumbra después de la oclusión de arteria cerebral media (MCAO) (Wen, et al., 2007) y, más recientemente, se anotó también una asociación entre el incremento en la expresión de CDK5 y del fragmento clivado p25 con daño neuronal en cerebros de pacientes afectados por una isquemia cerebral (Mitsios, et al., 2007).

Adicionalmente, modelos *in vivo* indican que, el aumento sostenido de la actividad de CDK5 en la AD se correlaciona con la hiperfosforilación aberrante de la proteína Tau, formando agregados de esta proteína en el soma (Piedrahita, et al., 2010) y, por consiguiente, la inducción de muerte celular, pérdida de habilidades de aprendizaje y memoria (Posada-Duque, et al., 2015). Se ha demostrado que ratones que sobre-expresan p25 durante largos períodos de tiempo, sufren deterioro de la LTP en el hipocampo y déficits de memoria, junto con una significativa pérdida neuronal. Sin embargo, cuando p25 se expresa de forma transitoria, se mejora la LTP, aumenta el número de espinas dendríticas y de sinapsis, sin observar neurodegeneración (Fischer, et al., 2005).

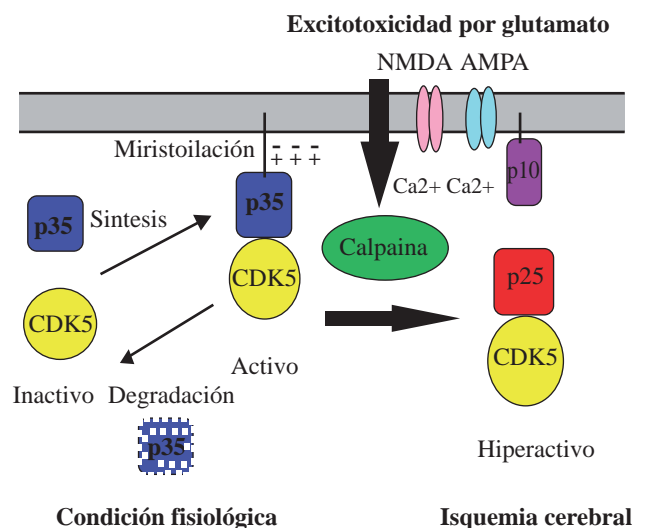


Figura 2. Mecanismo de activación de CDK5. CDK5 por sí sola es una subunidad catalítica inactiva. Esta quinasa es activada por p35 y luego reclutada a la membrana a través de la miristoilización de su región N-terminal. p35 es una proteína con un lapso de vida corta y es degradada por el proteosoma. Cuando se presenta una condición de excitotoxicidad por glutamato como en el caso de la isquemia cerebral, la calpaína se activa por el incremento de las concentraciones de calcio intracelular y corta a p35 en un fragmento C-terminal generando a p10 y a p25. p25 tiene una vida media más larga y se disocia de las membranas, donde es capaz de mantener de forma sostenida la fosforilación de CDK5.

Estrategias para controlar la sobre-activación de CDK5. Debido a la importancia que tiene CDK5 en neurodegeneración, es de suponer que esta quinasa es una buena diana terapéutica para prevenir o, incluso, detener patologías asociadas a la hiperfosforilación de Tau, como ya ha sido demostrado en la AD (**Piedrahita, et al., 2010**). De hecho, diversos estudios *in vitro* e *in vivo* han demostrado que el bloqueo de la sobre-actividad de CDK5 puede tener un efecto benéfico y que genera neuroprotección. Se han utilizado dos estrategias principales para estos fines: la inhibición directa, con el uso de inhibidores de CDK5, y la acción indirecta mediante la prevención de la excesiva generación del activador p25 asociada, a través del uso de inhibidores de calpaína (**Lopes, et al., 2011**).

Algunos estudios muestran que la roscovitina, un inhibidor farmacológico de CDK5, ejerce un efecto neuroprotector *in vivo*, después de su administración sistémica pre y post-isquemia en modelos experimentales del accidente cerebrovascular (**Menn, et al., 2010**). La roscovitina actúa en diferentes tipos de células (neuronas y células gliales) y a través de diversos mecanismos tales como anti-apoptóticos, anti-excitotoxicidad y, posiblemente, mediante las vías anti-inflamatorias. De esta manera, incluso cuando la roscovitina es administrada dos horas post-isquemia, se reduce el volumen de infarto en ratas sometidas a una isquemia focal transitoria (**Lopes, et al., 2011**). Por otro lado, un inhibidor de calpaína (MDL 28.170), reduce el volumen de infarto cuando se administra 30 minutos después de la oclusión de la arteria cerebral media. Adicionalmente, en este mismo estudio se evaluaron diversas ventanas terapéuticas para determinar el retardo máximo entre el inicio de la isquemia y la eficacia de la terapia, encontrando que el MDL 28.170 reduce el volumen del infarto cuando la terapia se retrasa durante 0,5, 3, 4, y 6 horas después del inicio de la isquemia. El efecto protector de MDL 28.170 se pierde después de un retraso de 8 horas (**Markgraf, et al., 1998**).

A pesar de que ambos abordajes mediante el uso común de inhibidores farmacológicos de CDK5 y los inhibidores de calpaína tienen la capacidad de cruzar la barrera hematoencefálica, además de mostrar reducción en el volumen de infarto, la muerte celular y la respuesta inflamatoria en una amplia ventana terapéutica de intervención, éstos no son completamente específicos (**Fischer, et al., 2001**; **Glicksman, et al., 2007**), lo que implica que su administración puede afectar también otro tipo de proteínas involucradas en otras vías de señalización celular.

Es así como estudios realizados en los últimos años, han mostrado otras perspectivas para controlar la sobre-activación de CDK5. Por ejemplo, un péptido diseñado para inhibir CDK5 protege en varios modelos *in vivo* de enfermedades neurodegenerativas como AD (**Binukumar, et al., 2015, 2015a**), PD (**Binukumar, et al., 2015**) e infarto cerebral (**Tan, et al., 2015**). Este péptido de 24 aminoácidos es capaz de atravesar la barrera hematoencefálica. *In vitro*, estos péptidos inhiben la actividad de p35/CDK5 y p25/

CDK5, mientras que, en las neuronas corticales de roedores, sólo inhiben a p25/CDK5 sin afectar la actividad endógena de p35/CDK5. En un modelo de isquemia cerebral, el tratamiento con el péptido p5-TAT no altera los niveles de p35, p39, aunque reduce la fosforilación de Tau a través de la inhibición de la actividad p25/CDK5. Además, p5-TAT reduce los niveles de la caspasa-3 y el volumen del infarto cerebral; incluso cuando p5-TAT es administrado hasta 24 horas después de la lesión isquémica, lo que promueve la recuperación funcional a largo plazo (**Tan, et al., 2015**).

En nuestro grupo de investigación se ha evaluado el efecto del silenciamiento de CDK5 en AD (**Piedrahita, et al., 2010, Castro-Alvarez, et al., 2014a; Castro-Alvarez, Uribe-Arias, Cardona-Gómez, 2014b; Castro-Alvarez, Uribe-Arias, Cardona-Gomez, 2015**). AD es una enfermedad neurodegenerativa en donde la sobre-activación de CDK5 y la consiguiente taupatía y alteración cognitiva, son el común denominador con la isquemia cerebral. Utilizando un iRNA para CDK5 inyectado en ratones triple transgénicos para AD, se encontró una reducción de la hiperfosforilación de Tau y de placas beta amiloide, así como una mejora en el aprendizaje y la memoria espacial en estos ratones, tanto a corto como a largo plazo del tratamiento.

Silenciamiento de CDK5 a través de RNA de interferencia en isquemia cerebral. Los anteriores antecedentes ponen de manifiesto que el silenciamiento de CDK5 puede ser una herramienta clave en la reversión del daño tras una isquemia cerebral. Lo anterior parte del hecho de que el bloqueo de CDK5 puede prevenir varios eventos patológicos que se dan en el lapso de tiempo desde las primeras horas hasta, incluso, meses post-lesión. Por ejemplo, después de la isquemia cerebral, la muerte neuronal que se presenta como un evento temprano de la cascada fisiopatológica, se asocia fundamentalmente por la hiper-activación de CDK5 mediada por p25. El silenciamiento de CDK5 puede estar jugando un papel crítico a tiempos tempranos en la regulación de la tasa de degradación y en la internalización de los receptores NMDA, los cuales son elementos esenciales en toda la cascada excitotóxica que se presente luego de un daño isquémico y, por ende, evitando el consecuente incremento en la entrada de calcio intracelular, la activación de calpaínas y la activación de vías de muerte celular. Lo anterior se basa en que la subunidad GluN2B del receptor NMDA es sustrato directo de CDK5, fosforilación que determina la dinámica de internalización del receptor (**Zhang, et al., 2008**).

Una ventaja del control de la sobre-activación de CDK5 a través de un iRNA además de su alta especificidad, es su permanencia a largo término, ya que ello permite la prevención de los eventos fisiopatológicos que pueden aparecer luego de varios meses post-isquemia. Nuestras investigaciones muestran que la terapia génica dirigida a silenciar CDK5 en el hipocampo derecho de ratas isquémicas durante la oclusión de la arteria cerebral media (tMCAO), no genera cambios en los parámetros fisiológicos (presión arterial, pH, pO₂, pCO₂) ni en la reducción de CDK5, lo

que resultó en una mejoría neurológica y motora durante la primera semana después de la isquemia. Así mismo, impidió disfunciones en el aprendizaje, la memoria y la reversión de aprendizaje a un mes, y se mantuvo la protección a los cuatro meses post-isquemia, además previno pérdida neuronal, taupatía e hiperreactividad microglial (**Gutiérrez-Vargas, et al., 2015**), dicho efecto se mantuvo por cuatro meses (**Gutiérrez-Vargas, Moreno, Cardona-Gómez, 2016**). El silenciamiento de CDK5 aumentó la expresión del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) y activó la ruta de TRKB/ CREB / CaMKII en el hipocampo, implicando la modulación de calcio en las espinas y la inducción de LTP, en un modo dependiente de receptor TRKB en las neuronas (**Gutiérrez-Vargas, et al., 2016; Posada-Duque, et al., 2017**). También, CDK5 iRNA protegió contra la excitotoxicidad mediada por glutamato (principal neurotransmisor excitatorio que aumenta de manera descontrolada en un infarto cerebral) en cultivos primarios de neuronas. La protección fue dependiente de un aumento concomitante de p35, ya que se bloqueó al utilizar un iRNA contra p35, lo que afectó corriente abajo la actividad de las RhoGTPasas (proteínas encargadas del remodelamiento del citoesqueleto y formación de espinas dendríticas). Además, la sobreexpresión de la proteína p35, así como la versión de la constitutivamente activa de Rac1, imitaron la neuroprotección ejercida por el silenciamiento de CDK5 (**Posada-Duque, et al., 2015**). Otras proteínas sinápticas, también participaron en la neuroprotección y plasticidad inducida por el iRNA de CDK5, como fueron: PSD95, NR2B, p120ctn, Ncadherin y β -catenina. La inhibición o “knock-out” de CDK5 dieron como resultado el aumento de p120ctn y la neuroprotección inducida por CDK5 iRNA dependió de la expresión de p120ctn en un modelo de excitotoxicidad inducida por glutamato (**Uribe-Arias, et al., 2016**). Así el complejo p35/p120ctn/PSD95/NR2B está implicado en la recuperación sináptica inducida por el silenciamiento de CDK5.

Por otro lado, los astrocitos realizan funciones metabólicas y de soporte estructural en el cerebro y contribuyen a la integridad de la barrera hematoencefálica. Los astrocitos influyen en la supervivencia neuronal y previenen la gliotoxicidad mediante la captura de glutamato (Glu), especies reactivas de oxígeno y nutrientes. CDK5 podría tener un doble efecto sobre el endotelio y los astrocitos, ya que está involucrada en migración, senescencia y angiogénesis, y su hiperactividad está asociada con la disfunción de la recaptura de glutamato e hipoxia. Por lo tanto, la terapia génica basada en el silenciamiento de CDK5, es una estrategia muy promisoriosa en la prevención del deterioro cerebral progresivo. En la línea celular C6 astroglioma y astrocitos primarios, CDK5 RNAi evitó la gliotoxicidad inducida por el glutamato, efecto que fue confirmado por la inhibición farmacológica de CDK5 con roscovitina (Ros). El fenotipo del astrocito silenciado, presentó la formación de lamellipodia, tras la activación de Rac1 y la liberación

de BDNF. Eventos que fueron responsables de la protección de neuronas expuestas a la excitotoxicidad por glutamato y en co-cultivo con los astrocitos- CDK5 “knock-down” (KD). De interés, la inhibición de Rac1 en astrocitos bloqueó el aumento del BDNF y la neuroprotección (**Posada-Duque, et al., 2015**). Así el remodelamiento del citoesqueleto de actina en el estrellamiento de los astrocitos, sugiere un fenotipo funcional para la liberación de BDNF, el cual promueve la neuroprotección.

En forma complementaria, en la línea celular de bEnd.3 proveniente de microvasculatura cerebral de ratón, se encontró que Rosc recuperaba la adhesión endotelial alterada por la toxicidad del glutamato; este efecto fue corroborado por el aumento de la TEER, p120ctn, y la reducción de las hendiduras intercelulares. Además, CDK5 iRNA incrementó los procesos primarios en células bEnd.3, que se relacionan con la formación similar a lamelipodios. Por otro lado, las células endoteliales que se co-cultivaron con astrocitos CDK5 iRNA mostraron una recuperación de la viabilidad celular, un aumento de las proteínas de adhesión (p120ctn y PECAM-1), y un aumento en la liberación de BDNF. Estos hallazgos sugieren que la inhibición de CDK5, o su silenciamiento en astrocitos, protege el endotelio, lo que promueve la liberación de BDNF y la adhesión endotelial (**Posada-Duque, Vargas-Restrepo, Cardona-Gómez, datos no publicados**). Estos hallazgos validan preclínicamente el uso de los astrocitos CDK5 - KD, como una alternativa de terapia celular, que recupera la integridad de la unidad neurovascular en infarto cerebral. Por lo tanto, se evaluó en ratas la respuesta del parénquima cerebral al trasplante de astrocitos-CDK5 KD en la corteza somatosensorial después de una isquemia cerebral. En estos experimentos se logró una prevención general de la pérdida neuronal por el trasplante de astrocitos CDK5-KD, los cuales indujeron una estimulación significativa en la arborización de astrocitos endógenos, envolviendo vasos sanguíneos, acompañado por el aumento de la inmunoreactividad de PECAM-1 en las áreas motora y somatosensorial, así como un aumento de Ki67 (marcador de proliferación) en los ventrículos laterales, parcialmente asociados a la producción BDNF, lo que sugiere que el trasplante de astrocitos CDK5-KD protege la unidad neurovascular, recupera la función motora y neurológica en las ratas isquémicas (**Becerra-Calixto, Cardona-Gómez, 2016**).

En conjunto, los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la unidad neurovascular tiene un papel crítico en la recuperación funcional y morfológica después de un infarto cerebral y que el silenciamiento de CDK5 en neuronas, astrocitos y endotelio genera protección. No obstante, nuestros resultados sugieren que los astrocitos CDK5-KD son una fuente paracrina de la producción de BDNF, el que genera protección neuronal y endovascular, lo cual se convierte en una estrategia novedosa en la protección de la integridad BBB después de un accidente cerebrovascular.

Lo anterior, apoyado por otras investigaciones que se han centrado en nuevas terapias dirigidas a mejorar la angiogénesis, eventos que son críticos en la recuperación a mediano y largo termino post-daño cerebral, han puesto de manifiesto a la inhibición de la señalización p25/ CDK5 como un nuevo blanco de intervención para la protección celular y recuperación de la remodelación tisular después del accidente cerebrovascular (Slevin, Krupinski, 2009).

Como vemos, el silenciamiento de CDK5 en el contexto de acción terapéutica, es una estrategia ideal porque no solo contempla eventos troncales en el fenómeno de isquemia/reperfusión como posiblemente la excitotoxicidad por glutamato, al bloquear consecutivamente fenómenos fisiopatológicos asociados como activación de calpaínas, activación de rutas de muerte, e hiperfosforilación de Tau (Figura 3), sino que - de igual manera - es posible llegar a abordar otros eventos que son críticos en la recuperación

a largo término como lo son la plasticidad sináptica, la angiogénesis y la neurogénesis. Ello, en conjunto, podría desencadenar una mejoría en funciones alteradas, motora, cognitiva y emocional, luego de una isquemia cerebral.

Actuales y futuros desafíos de la terapia génica en infarto cerebral desde el punto de vista de la medicina translacional. De acuerdo con todo lo abordado anteriormente entre ellos nuestros propios estudios y a pesar de haber identificado blancos moleculares potenciales, hay limitaciones considerables inherentes al sistema nervioso, tales como el cruce de la barrera hematoencefálica y la dificultad para dirigirse a poblaciones neuronales de regiones específicas (hipocampo, corteza, tálamo). La existencia de estos obstáculos, ha impulsado hacia la búsqueda de nuevas estrategias para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas, tales como el uso de vectores virales, el diseño de nanopartículas y la terapia celular con el fin de

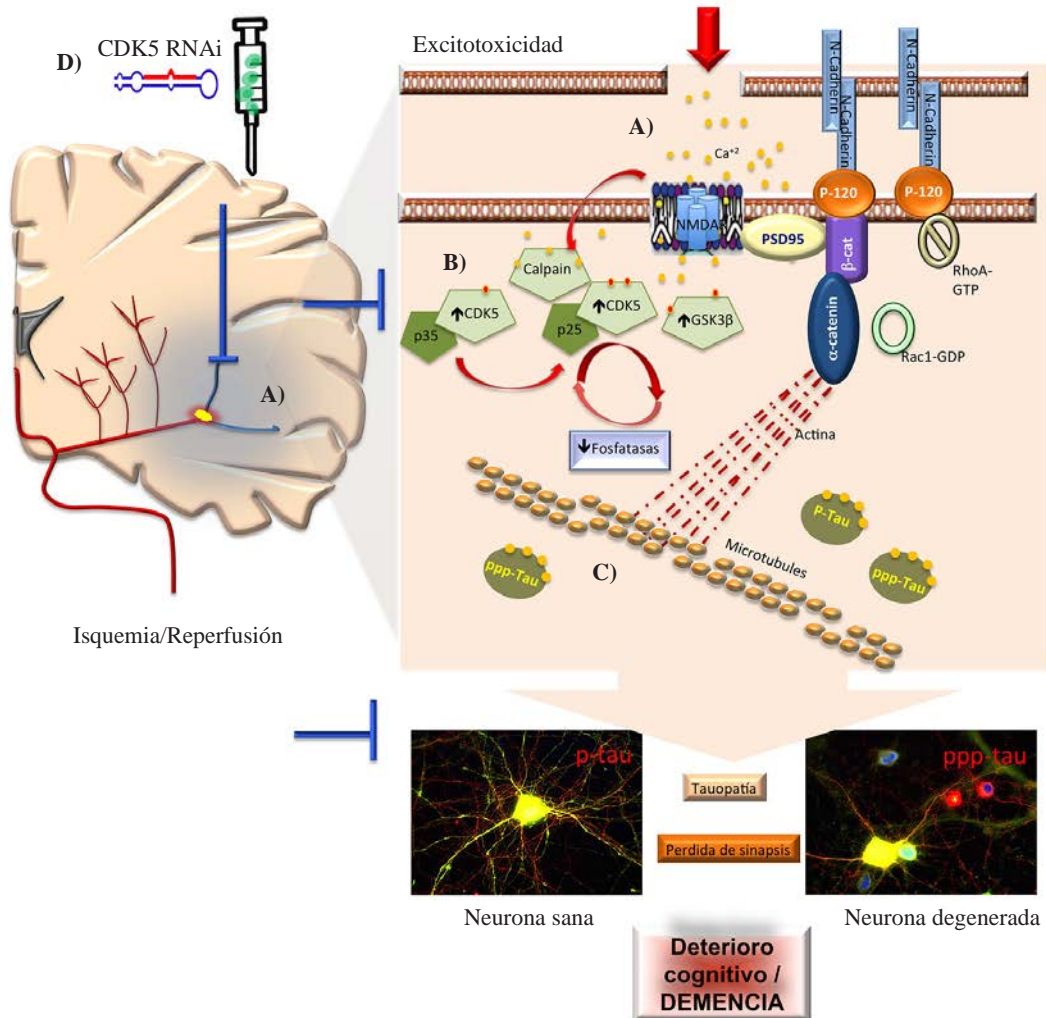


Figura 3. Modelo hipotético de la acción de la terapia génica basada en la interferencia del CDK5 ante un evento de excitotoxicidad por infarto cerebral isquémico y prevención del deterioro cognitivo. A) Anoxia/reperfusión, y propagación de la excitotoxicidad, B) Activación de CDK5, desbalance quinasas/fosfatasa, hiperfosforilación de Tau, C) Desensamblaje del citoesqueleto de actina y microtúbulos, pérdida de sinapsis, deterioro cognitivo y demencia. D) La terapia génica con CDK5 iRNA bloquea los eventos anteriores (A-C). pTau: Fosforilación de tau, pppTau: hiperfosforilación de tau

mejorar la liberación del transgene y subsanar las limitaciones en cuanto a las vías de administración, incluyendo estudios de seguridad y eficacia, que aún representan un desafío.

Una limitación importante de la mayoría de estudios realizados en terapia génica en infarto cerebral es la aplicabilidad al paciente. Hay dos aspectos que son cruciales a la hora de llevar los resultados de los estudios preclínicos al paciente: el tiempo de intervención terapéutica y la vía administración para que el shRNA llegue directamente a la zona infartada (**Fukuda, et al., 2013**).

La mayoría de estudios donde se han encontraron los mejores resultados terapéuticos son aquellos donde la administración del shRNA se hace antes de la lesión. Desafortunadamente, un pre-tratamiento con shRNA representa un problema porque no imita la demanda clínica de intervención. Como se ha sido demostrado por **Al-Jamal, et al., 2011**, un tratamiento administrado en diferentes momentos, ya sea antes o luego de la lesión, podría producir diferentes efectos, lo cual incluye que el shRNA administrado antes de la lesión o luego de horas o de días después de la lesión, pudiera tener un efecto diferencial en la recuperación isquémica (**Al-Jamal, et al., 2011**). El siguiente paso, entonces, es poner a prueba la eficacia de la terapia cuando el shRNA es administrado por lo menos poco tiempo después de la lesión, imitando así los plazos previstos en la práctica clínica. En esto punto ya se han venido realizando estudios con resultados satisfactorios (Tabla 1).

La vía de administración intracerebral del shRNA presenta la mayor dificultad en el uso clínico de la terapia génica por el riesgo en la intervención quirúrgica, y la aplicación por vía intravenosa, que ¿? no atraviesa la barrera hematoencefálica. Los métodos que, hasta el momento, han sido empleados en modelos *in vivo* de isquemia cerebral en roedores, han sido la inyección intracerebroventricular, inyección intra-parenquimatosa y en la arteria carótida interna (**Kim, et al., 2011**). Otro estudio analiza como la disminución de la expresión de claudina 5 con una inyección en la cola del ratón, y su localización, se facilita debido a que dicha proteína hace parte de la barrera hematoencefálica y, por lo tanto, no hay necesidad de que el shRNA la cruce. Sin embargo, debido a que la claudina-5 está presente en otros órganos, vale la pena señalar que la expresión del shRNA fue eficaz también en las células hepáticas y endoteliales (**Campbell, et al., 2012**). Otro estudio empleo el método de la administración intranasal con éxito, ya que permitió acceder directamente al cerebro (**Kim, et al., 2012**).

Esta administración intranasal es un método no invasivo, de sencilla elección, eficiente en tiempo, rentable y que proporciona facilidad del procedimiento. Frey y sus colaboradores, pioneros en el campo de la administración de fármacos por vía intranasal en enfermedades cerebrales como el ictus y la AD, han mostrado resultados prometedores con una amplia variedad de compuestos, entre los cuales la insulina y el factor de crecimiento nervioso, proporcionan mejoras eficientes en la recuperación, sin efectos secundarios

significativos (**Danielyan, et al., 2010; Gomez, et al., 2012**). En el caso de la terapia génica, el shRNA puede llegar directamente a las células del cerebro a través de la ruta intranasal, debido a que no se presentan impedimentos por la barrera hematoencefálica. Ya existe al menos un estudio en el que se administró por vía intranasal un shRNA en un modelo de accidente cerebrovascular rata y se obtuvieron resultados prometedores (**Kim, et al., 2012**). Otros estudios han observado que el shRNA administrado a través de la vía intranasal viaja eficazmente a los nervios olfatorios y bulbo olfatorio (**Renner, Frey, Hanson, 2012**), y a los núcleos del rafe dirigidos a las neuronas serotoninérgicas (**Bortolozzi, et al., 2012**). El trabajo realizado por **Kim, et al., 2012**, es muy promisorio porque el shRNA administrado por vía intranasal en un modelo de ratas t-MCAO, mostró una reducción significativa de la proteína diana en el cerebro. Dentro de la primera hora después de la administración intranasal, el shRNA se observó en el citoplasma de las neuronas, astrocitos y células de la microglía en la corteza frontal, el cuerpo estriado, la amígdala y el hipotálamo y se mantuvo durante al menos 12 horas después de la inyección. Sin embargo, los estudios farmacocinéticos son necesarios y pueden ofrecer garantías de la entrega efectiva del shRNA en el cerebro (**Thorne, Frey, 2001**).

Por otro lado, además de las dificultades inherentes del sistema nervioso central, la medicina de traslación a partir del descubrimiento de fármacos útiles para la clínica, necesita superar varias limitaciones, las que además de la sensibilidad y la especificidad de los fármacos, requiere que los pacientes deban estar clasificados con claros criterios de inclusión (**Drucker, Krapfenbauer, 2013**). Promover la traslación de alternativas terapéuticas que impacten la morbilidad y la mortalidad, es una necesidad urgente en todo el mundo y en Latino América. Específicamente en Colombia, necesitamos dar un paso adelante en las políticas de medicina de traslación, aunque nuestros países en desarrollo necesitan primero mejorar la atención médica de urgencias para lesiones agudas (**Razzak, Kellermann, 2002**). También necesitamos ponernos al día en normativas y protocolos para desarrollar ensayos clínicos con candidatos originales o estrategias propuestas por países de América Latina, y reunir esfuerzos de científicos, especialistas médicos, industria farmacéutica y gobierno, acompañados de apoyo económico y social. Debemos ofrecer tratamientos experimentales, sin falsas expectativas al paciente y a la familia, basados en el rigor de las evidencias científicas preclínicas, en diálogo directo con el equipo médico, la vigilancia por parte de los pares de las fases I, II y III, y la estricta monitorización a largo plazo de los efectos secundarios potenciales no deseados (**Main, et al., 2014**), podrían ir fortaleciendo progresivamente la contribución que permita resolver los problemas de salud mental (**Cardona-Gómez, Lopera, 2016**).

Conclusiones

La isquemia cerebral se ha convertido en una problemática de salud mundial, debido a su alta tasa de mortalidad y a

la discapacidad que genera en los pacientes que la padecen. Se han evaluado muchas estrategias terapéuticas tanto en modelos experimentales como en ensayos clínicos sin obtener los resultados esperados. Dos de las grandes falencias de esta investigación terapéutica son la limitación en el tiempo de intervención (menos de cuatro horas y media) y el corto tiempo de protección (o seguimiento) de la terapia, lo cual genera en los pacientes secuelas a largo término.

La terapia génica ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas; sin embargo específicamente en isquemia cerebral hay pocos estudios preclínicos, los cuales muestran efecto neuroprotector a través de la reducción en el volumen de infarto y una mejoría funcional, pero no logran un acercamiento a la solución clínica porque la intervención terapéutica se realiza antes de inducir el infarto cerebral. Por lo tanto, un gran reto de la terapia génica es que sea implementada como terapia post-lesión, lo cual es apoyado por nuestros resultados, ya que esta situación recrea la necesidad del paciente una vez llega al hospital y los resultados experimentales toman mayor relevancia en el campo de la medicina de traslación.

El bloqueo de CDK5 se ha convertido en una estrategia terapéutica de alta importancia para reducir la muerte celular en varias enfermedades neurodegenerativas, principalmente en aquellas donde la taupatía es la causante del deterioro cognitivo y demencia, como es el caso de la isquemia cerebral (Figura 3). Sin embargo, pese a que se han probado inhibidores farmacológicos para dicha quinasa es necesario el uso de metodologías que permitan el bloqueo dirigido y eficaz de CDK5, evitando así efectos secundarios de la terapia generados por bloqueos farmacológicos inespecíficos hacia otras proteínas y vías de señalización. Es aquí donde la terapia génica, cobra gran importancia siendo esta una herramienta dirigida para controlar la sobre-activación de dicha quinasa, no solo en un tiempo inmediato a la lesión isquémica en el cual hay mayor tasa de muerte celular, sino que también su efecto permanece a largo término, donde se puede prevenir la disfunción emocional y cognitiva, se evita la pérdida de espinas y dendritas, que son eventos fundamentales en las secuelas a largo plazo post-isquemia. Por lo tanto, los primeros pasos deberán ser la solicitud y aprobación de protocolos de ensayos clínicos por el INVIMA (ente regulatorio de seguridad y eficacia de medicamentos y alimentos en Colombia), la oferta de fuentes de financiación provenientes del gobierno y la empresa que incentiven el desarrollo de terapias propuestas desde nuestro propio país. Lo anterior significaría un alineamiento entre los intereses científicos, del gobierno y del sector productivo, que ayudarían a evitar o a mejorar la calidad de vida de los pacientes con incapacidad física y mental post-infarto cerebral.

Agradecimientos

Agradecemos al Área de Neurobiología Celular y Molecular, Grupo de Neurociencias de Antioquia (GNA), de la Universidad de Antioquia por la discusión académica constructiva.

Esta investigación fue apoyada por proyectos de Colciencias (código # 111551928905, # 111554531400) (GPC-G) y el CODI de la Universidad de Antioquia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

- ADI/BUPA Inform.** 2013. La demencia en América: EL costo y la prevalencia del Alzheimer y otros tipos de demencia.
- Aguzzi, A., O'Connor, T.** 2010. Protein aggregation diseases: pathogenicity and therapeutic perspectives. *Nat Rev Drug Discov.* **9:** 237-48.
- Al-Jamal, K.T., Gherardini, L., Bardi, G., Nunes, A., Guo, C., Bussy, C., Herrero, M.A., Bianco, A., Prato, M., Kostarelos, K., Pizzorusso, T.** 2011. Functional motor recovery from brain ischemic insult by carbon nanotube-mediated siRNA silencing. *Proc Natl Acad Sci U S A.* **108:** 10952-7.
- Alvira, D., Ferrer, I., Gutierrez-Cuesta, J., Garcia-Castro, B., Pallàs, M., Camins, A.** 2008. Activation of the calpain/cdk5/p25 pathway in the girus cinguli in Parkinson's disease. *Parkinsonism & related disorders.* **14:** 309-13.
- Amlie-Lefond, C., Chan, A.K., Kirton, A., DeVeber, G., Hovinga, C.A., Ichord, R., Stephens, D., Zaidat, O.O.** 2009. Thrombolysis in acute childhood stroke: design and challenges of the thrombolysis in pediatric stroke clinical trial. *Neuroepidemiology.* **32:** 279-86.
- Amin, N.D., Albers, W., Pant, H.C.** 2002. Cyclin-dependent kinase 5 (cdk5) activation requires interaction with three domains of p35. *J Neuros Res.* **67:** 354-62.
- Angelo, M., F. Plattner, Giese, K.P.** 2006. Cyclin-dependent kinase 5 in synaptic plasticity, learning and memory. *J Neurochem.* **99:** 353-70.
- Asada, A., Yamamoto, N., Gohda, M., Saito, T., Hayashi, N., Hisanaga, S.** 2008. Myristoylation of p39 and p35 is a determinant of cytoplasmic or nuclear localization of active cyclin-dependent kinase 5 complexes. *J Neurochem.* **106:** 1325-36.
- Assarzadegan, F., Tabesh, H., Shoghli, A., Ghafouri Yazdi M., Tabesh, H., Daneshpajoo, P., Yaseri, M.** 2015. Relation of Stroke Risk Factors with Specific Stroke Subtypes and Territories. *Iran J Public Health.* **44:**1387-1394.
- Brainin, M., Tuomilehto, J., Heiss, W.D., Bornstein, N.M., Bath, P.M., Teuschl, Y., Richard, E., Guekht, A., Quinn, T.** 2015. Post-stroke cognitive decline: an update and perspectives for clinical research. *Eur J Neurol.* **22:** 229-38.
- Becerra-Calixto, A., Cardona-Gómez, G.P.** 2016. Neuroprotection Induced by Transplanted CDK5 Knockdown Astrocytes in Global Cerebral Ischemic Rats. *Mol Neurobiol.*
- Bejot, Y., Benatru, I., Rouaud, O., Fromont, A., Besancenot, J.P., Moreau, T., Giroud, M.** 2007. Epidemiology of stroke in Europe: geographic and environmental differences. *J Neurol Sci.* **262:** 85-88.
- Bianchi, M.E., Manfredi, A.A.** 2007. High-mobility group box 1 (HMGB1) protein at the crossroads between innate and adaptive immunity. *Immunol Rev.* **220:** 35-46.
- Binukumar, B.K., Shukla, V., Amin, N.D., Bhaskar, M., Skuntz, S., Steiner, J., Winkler, D., Pelech, S.L., Pant, H.C.** 2015. Analysis of the Inhibitory Elements in the p5 Peptide Fragment of the CDK5 Activator, p35, CDKR1 Protein. *J Alzheimers Dis.* **48:** 1009-17.

- Binukumar, B.K., Shukla V, Amin ND, Grant P, Bhaskar M, Skuntz S, Steiner J, Pant HC.** 2015. Peptide (TFP5/TP5), derived from Cdk5 activator P35, provides neuroprotection in the MPTP model of Parkinson's disease. *Mol Biol Cell.* **26:** 4478-4491.
- Bortolozzi, A., Castañé, A., Semakova, J., Santana, N., Alvarado, G., Cortés, R., Ferrés-Coy, A., Fernández, G., Carmona, M.C., Toth, M., Perales, J.C., Montefeltro, A., Artigas, F.** 2012. Selective siRNA-mediated suppression of 5-HT1A autoreceptors evokes strong anti-depressant-like effects. *Mol Psychiatry.* **17:** 612-23.
- Boudreau, R.L., Davidson, B.L.** 2010. RNAi therapeutics for CNS disorders. *Brain Res.* **1338:** 112-21.
- Boudreau, R.L., Rodriguez-Lebron, E., Davidson, B.L.** 2011. RNAi medicine for the brain: progresses and challenges. *Hum Mol Genet.* **20:** R21-7.
- Camins, A., Verdaguer, E., Folch, J., Pallàs, M.** 2006. Involvement of calpain activation in neurodegenerative processes. *CNS drug reviews.* 2006. **12:** 135-148.
- Campbell, M., Hanrahan, F., Gobbo, O.L., Kelly, M.E., Kiang, A.S., Humphries, M.M., Nguyen, A.T., Ozaki, E., Keane, J., Blau, C.W., Kerskens, C.M., Cahalan, S.D., Callanan, J.J., Wallace, E., Grant, G. A, Doherty, C.P., Humphries, P.** 2012. Targeted suppression of claudin-5 decreases cerebral oedema and improves cognitive outcome following traumatic brain injury. *Nat Commun.* **3:** 849.
- Cardona-Gómez, G.P. & Lopera, F.** 2016. Dementia, preclinical studies and its potential for translational medicine in South America. *Frontiers in Aging Neurosci.* **8:** 304.
- Castillo J, Alvarez-Sabin J, Dávalos A, Diez-Tejedor E, Lizasoain I, Martínez-Vila E, Vivancos J, Zarranz JJ.** 2003 [Consensus review. Pharmacological neuroprotection in cerebral ischemia: is it still a therapeutic option?]. *Neurologia.* **18:** 368-84.
- Castro-Alvarez, J.F., Gutierrez-Vargas, J., Darnaudéry, M., Cardona-Gómez, G.P.** 2011. ROCK inhibition prevents tau hyperphosphorylation and p25/CDK5 increase after global cerebral ischemia. *Behav Neurosci.* **125:** 465-72.
- Castro-Alvarez, J.F., Uribe-Arias, S.A., Kosik, K.S., Cardona-Gómez, G.P.** 2014a. Long- and short-term CDK5 knock-down prevents spatial memory dysfunction and tau pathology of triple transgenic Alzheimer's mice. *Front Aging Neurosci.* **6:** 243.
- Castro-Alvarez, J.F., Uribe-Arias, S.A., Cardona-Gómez, G.P.** 2014b. Cyclin-dependent kinase 5, a node protein in diminished tauopathy: a systems biology approach. *Front Aging Neurosci.* **6:** 232.
- Castro-Alvarez, J.F., Uribe-Arias, S.A., Cardona-Gomez, G.P.** 2015. Cyclin-Dependent kinase 5 targeting prevents beta-Amyloid aggregation involving glycogen synthase kinase 3beta and phosphatases. *J Neurosci Res.* **93:**1258-66.
- CDC.** 2008. http://www.cdc.gov/dhds/atlas/heart_stroke_atlas.
- Chavez JC, Hurko O, Barone FC, Feuerstein GZ.** 2009 Pharmacologic interventions for stroke: looking beyond the thrombolysis time window into the penumbra with biomarkers, not a stopwatch. *Stroke.* **40:** e558-63.
- Chen, C., Hu, Q., Yan, J., Yang, X., Shi, X., Lei, J., Chen, L., Huang, H., Han, J., Zhang, J.H., Zhou, C.** 2009. Early inhibition of HIF-1alpha with small interfering RNA reduces ischemic-reperfused brain injury in rats. *Neurobiol Dis.* **33:** 509-17.
- Cheng, Y.D., Al-Khoury, L., Zivin, J.A.** 2004. Neuroprotection for ischemic stroke: two decades of success and failure. *NeuroRx.* **1:** 36-45.
- CLINIGENE.** European Network for the Advancement of Clinical Gene Transfer and Therapy. Available from: <http://www.clinigene.eu/>.
- Choi, D.W., Rothman, S.M.** 1990. The role of glutamate neurotoxicity in hypoxic-ischemic neuronal death. *Annu Rev Neurosci.* **13:** 171-182.
- Danielyan, L., Klein, R., Hanson, L.R., Buadze, M., Schwab, M., Gleiter, C.H., Frey, W.H.** 2010. Protective effects of intranasal losartan in the APP/PS1 transgenic mouse model of Alzheimer disease. *Rejuvenation Res.* **13:** 195-201.
- Demchuk, A.M., Buchan, A.M.** 2000. Predictors of stroke outcome. *Neurol Clin.* 2000. **18:** 455-73.
- Dirnagl, U., Ladecola, C., Moskowitz, M.A.** 1999. Pathobiology of ischaemic stroke: an integrated view. *Trends Neurosci.* **22:** 391-397.
- Dobkin, B.H., Dorsch, A.** 2013. New evidence for therapies in stroke rehabilitation. *Curr Atheroscler Rep.* **15:** 331.
- Durukan, A., Tatlisumak, T.** 2007. Acute ischemic stroke: overview of major experimental rodent models, pathophysiology, and therapy of focal cerebral ischemia. *Pharmacol Biochem Behav.* **87:** 179-197.
- Drucker, E., Krapfenbauer, K.** 2013. Pitfalls and limitations in translation from biomarker discovery to clinical utility in predictive and personalized medicine. *The EPMA journal.* **4:** 1-10.
- Fillat, C.** 2004. Perspectivas actuales de la terapia génica. *BSCP Can Ped.* **28:** 203-207.
- Fischer, A., Sananbenesi, F., Pang, P.T., Lu, B., Tsai, L.H.** 2005. Opposing roles of transient and prolonged expression of p25 in synaptic plasticity and hippocampus-dependent memory. *Neuron.* **48:** 825-38.
- Fischer, P.M.** 2001. Recent advances and new directions in the discovery and development of cyclin-dependent kinase inhibitors. *Curr Opin Drug Discov Devel.* **4:** 623-34.
- Fukuda A.M., Badaut, J.** 2013. siRNA Treatment: "A Sword-in-the-Stone" for Acute Brain Injuries. *Genes (Basel).* **4:** 435-56.
- Gemmell, E., Bosomworth, H., Allan, L., Hall, R., Khundakar, A., Oakley, A.E., Deramecourt, V., Polvikoski, T.M., O'Brien, J.T., Kalaria, R.N.** 2012. Hippocampal neuronal atrophy and cognitive function in delayed poststroke and aging-related dementias. *Stroke.* **43:** 808-14.
- Gemmell, E., Tam, E., Allan, L., Hall, R., Khundakar, A., Oakley, A.E., Thomas, A., Deramecourt, V., Kalaria, R.N.** 2014. Neuron volumes in hippocampal subfields in delayed poststroke and aging-related dementias. *J Neuropathol Exp Neurol.* **73:** 305-311.
- Glicksman, M.A., Cuny GD, Liu M, Dobson B, Auerbach K, Stein RL, Kosik KS.** 2007. New approaches to the discovery of cdk5 inhibitors. *Curr Alzheimer Res.* **4:** 547-9.
- Goldstein, L.B., Bushnell, C.D., Adams, R.J., Appel, L.J., Braun, L.T., Chaturvedi, S., Creager, M.A., Culebras, A., Eckel, R.H., Hart, R.G., Hinchey, J.A., Howard, V.J., Jauch, E.C., Levine, S.R., Meschia, J.F, Moore, W.S., Nixon, J.V., Pearson, T.A., American Heart Association Stroke Council., Council on Cardiovascular Nursing., Council on Epidemiology and Prevention., Council for High Blood Pressure Research., Council**

- on Peripheral Vascular Disease., and Interdisciplinary Council on Quality of Care and Outcomes Research. 2011. Guidelines for the primary prevention of stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. **42**: 517-584.
- Grimm, D., Kay, M.A. 2007. RNAi and gene therapy: a mutual attraction. *Hematology Am Soc Hematol Educ Program*. 473-81.
- Gutiérrez-Vargas, J.A., Múnera, A., Cardona-Gómez, G.P. 2015. CDK5 knockdown prevents hippocampal degeneration and cognitive dysfunction produced by cerebral ischemia. *J Cereb Blood Flow Metab*. **35**: 1937-49.
- 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
- Gomez, D., Martinez, J.A., Hanson, L.R., Frey, W.H. 2nd, Toth, C.C. 2012. Intranasal treatment of neurodegenerative diseases and stroke. *Front Biosci (Schol Ed)*. **4**: 74-89.
- Guan, J.S., Su SC, Gao J, Joseph N, Xie Z, Zhou Y, Durak O, Zhang L, Zhu JJ, Clauser KR, Carr SA, Tsai LH. 2011. Cdk5 is required for memory function and hippocampal plasticity via the cAMP signaling pathway. *PLoS One*. 2011. **6**: e25735.
- Halliday, G.M., McCann, H. 2010. The progression of pathology in Parkinson's disease. *Ann N Y Acad Sci*. **1184**: 188-195.
- Hawasli, A.H., Benavides, D.R., Nguyen, C., Kansy, J.W., Hayashi, K., Chambon, P., Greengard, P., Powell, C.M., Cooper, D.C., Bibb, J.A. 2007. Cyclin-dependent kinase 5 governs learning and synaptic plasticity via control of NMDAR degradation. *Nat Neurosci*. **10**: 880-886.
- Horn AI, F.S., Carvalho, S.M.R., Silvado, R.A.B., Babosa, P.M.K., Junior, A.D., Atallah, N.A., Fukujima, M.M., Prado, G.F. 2003. Cinesioterapia previne ombro doloroso em pacientes hemiplégicos/paréticos na fase sub-aguda do acidente vascular encefálico. *Arq. Neuropsiquiatria*. **61**: 768-771.
- Juliano, R.L., Dixit, V.R., Kang, H., Kim, T.Y., Miyamoto, Y., Xu, D. 2005. Epigenetic manipulation of gene expression: a tool kit for cell biologists. *J Cell Biol*. **169**: 847-857.
- 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.
- Kim, H.W., Cho, K.J., Lee, S.K., Kim, G.W. 2011. Apoptosis signal-regulating kinase 1 (Ask1) targeted small interfering RNA on ischemic neuronal cell death. *Brain Res*. **1412**: 73-78.
- Kim, I.D., Lim, C.M., Kim, J.B., Nam, H.Y., Nam, K., Kim, S.W., Park, J.S., Lee, J.K. 2010. Neuroprotection by biodegradable PAMAM ester (e-PAM-R)-mediated HMGB1 siRNA delivery in primary cortical cultures and in the postischemic brain. *J Control Release*. **142**: 422-30.
- Kim, I.D., Shin, J.H., Kim, S.W., Choi, S., Ahn, J., Han, P.L., Park, J.S., Lee, J.K. 2012. Intranasal delivery of HMGB1 siRNA confers target gene knockdown and robust neuroprotection in the postischemic brain. *Mol Ther*. **20**: 829-39.
- Kim, J.B., Sig Choi, J., Yu, Y.M., Nam, K., Piao, C.S., Kim, S.W., Lee, M.H., Han, P.L., Park, J.S., Lee, J.K. 2006. HMGB1, a novel cytokine-like mediator linking acute neuronal death and delayed neuroinflammation in the postischemic brain. *J Neurosci*. **26**: 6413-21.
- Kimura, T., Ishiguro, K., Hisanaga, S. 2014. Physiological and pathological phosphorylation of tau by Cdk5. *Front Mol Neurosci*. **7**: 65.
- Ko, J., Humbert S, Bronson RT, Takahashi S, Kulkarni AB, Li E, Tsai LH. 2001. p35 and p39 are essential for cyclin-dependent kinase 5 function during neurodevelopment. *J Neurosci*. **21**: 6758-6771.
- Kusakawa, G., Saito, T., Onuki, R., Ishiguro, K., Kishimoto, T., Hisanaga, S. 2000. Calpain-dependent proteolytic cleavage of the p35 cyclin-dependent kinase 5 activator to p25. *J Biol Chem*. **275**: 17166-17172.
- Lavados, P.M., Hennis, A.J., Fernandes, J.G., Medina, M.T., Legetic, B., Hoppe, A., Sacks, C., Jadue, L., Salinas, R. 2007. Stroke epidemiology, prevention, and management strategies at a regional level: Latin America and the Caribbean. *Lancet Neurol*. **6**: 362-72.
- Lecca, D., Trincavelli, M.L., Gelosa, P., Sironi, L., Ciana, P., Fumagalli, M., Villa, G., Verderio, C., Grumelli, C., Guerrini, U., Tremoli, E., Rosa, P., Cuboni, S., Martini, C., Buffo, A., Cimino, M., Abbracchio, M.P. 2008. The recently identified P2Y-like receptor GPR17 is a sensor of brain damage and a new target for brain repair. *PLoS One*. **3**: e3579.
- Lo, E.H. 2008. A new penumbra: transitioning from injury into repair after stroke. *Nat Med*. **14**: 497-500.
- Lopes, J.P., Agostinho, P. 2011. Cdk5: multitasking between physiological and pathological conditions. *Prog Neurobiol*. **94**: 49-63.
- Markgraf, C.G., Velayo, N.L., Johnson, M.P., McCarty, D.R., Medhi, S., Koehl, J.R., Chmielewski, P.A., Linnik, M.D. 1998. Six-hour window of opportunity for calpain inhibition in focal cerebral ischemia in rats. *Stroke*. **29**: 152-8.
- Menn, B., Bach, S., Blevins, T.L., Campbell M, Meijer L, Timsit S. 2010. Delayed treatment with systemic (S)-roscovitine provides neuroprotection and inhibits in vivo CDK5 activity increase in animal stroke models. *PLoS One*. **5**: e12117.
- Mitsios, N., Pennucci R, Krupinski J, Sanfeliu C, Gaffney J, Kumar P, Kumar S, Juan-Babot O, Slevin M. 2007. Expression of cyclin-dependent kinase 5 mRNA and protein in the human brain following acute ischemic stroke. *Brain pathology*. **17**: 11-23.
- Moskowitz, M.A., E.H. Lo, and C. Iadecola. 2010. The science of stroke: mechanisms in search of treatments. *Neuron*. **67**: 181-198.
- Moustafa, R.R. and J.C. Baron. 2008. Pathophysiology of ischaemic stroke: insights from imaging, and implications for therapy and drug discovery. *Br J Pharmacol*. **153 Suppl 1**: S44-54.
- Nys, G.M., van Zandvoort MJ, de Kort PL, Jansen BP, Kappelle LJ, de Haan EH. 2005. Restrictions of the Mini-Mental State Examination in acute stroke. *Arch Clin Neuropsychol*. **20**: 623-9.
- OMS. 2016. Discapacidades.
- Ohshima, T., Ogura H, Tomizawa K, Hayashi K, Suzuki H, Saito T, Kamei H, Nishi A, Bibb JA, Hisanaga S, Matsui H, Mikoshiba K. 2005. Impairment of hippocampal long-term depression and defective spatial learning and memory in p35 mice. *J Neurochem*. **94**: 917-925.
- Patrick, G.N., Zhou P, Kwon YT, Howley PM, Tsai LH. 1998. p35, the neuronal-specific activator of cyclin-dependent kinase 5 (Cdk5) is degraded by the ubiquitin-proteasome pathway. *J Biol Chem*. **273**: 24057-2464.

- Patrick, G.N., Zukerberg, L., Nikolic, M., De la Monte, S., Dikkes, P., Tsai, L.H. 1999. Conversion of p35 to p25 deregulates Cdk5 activity and promotes neurodegeneration. *Nature*. **402**: 615-622.
- Parker, J.S., Roe, S.M., Barford, D. 2004. Crystal structure of a PIWI protein suggests mechanisms for siRNA recognition and slicer activity. *EMBO J*. **23**: 4727-37.
- Piedrahita, D., Hernández, I., López-Tobón, A., Fedorov, D., Obara, B., Manjunath, B.S., Boudreau, R.L., Davidson, B., Laferla, F., Gallego-Gómez, J.C., Kosik, K.S., Cardona-Gómez, G.P. 2010. Silencing of CDK5 reduces neurofibrillary tangles in transgenic Alzheimer's mice. *J Neurosci*. **30**: 13966-13976.
- Pluta, R., Jolkkonen, J., Cuzzocrea, S., Pedata, F., Cechetto, D., Popa-Wagner, A. 2011. Cognitive impairment with vascular impairment and degeneration. Cognitive impairment with vascular impairment and degeneration. *Curr Neurovasc Res*. **8**: 342-350.
- Posada-Duque, R.A., Barreto, G.E., Cardona-Gomez, G.P. 2014. Protection after stroke: cellular effectors of neurovascular unit integrity. *Front Cell Neurosci*. **8**: 231.
- Posada-Duque, R.A., López-Tobón, A., Piedrahita, D., González-Billault, C., Cardona-Gomez, G.P. 2015. p35 and Rac1 underlie the neuroprotection and cognitive improvement induced by CDK5 silencing. *J Neurochem*. **134**: 354-370.
- Posada-Duque, R.A., Ramirez, O., Härtel, S., Inestrosa, N.C., Bodaleo, F., González-Billault, C., Kirkwood, A., Cardona-Gómez, G.P. 2017. CDK5 downregulation enhances synaptic plasticity. *Cell Mol Life Sci*. **74**: 153-172.
- Price, M., Badaut, J., Thevenet, J., Hirt, L. 2010. Activation of c-Jun in the nuclei of neurons of the CA-1 in thrombin preconditioning occurs via PAR-1. *J Neurosci Res*. **88**: 1338-1347.
- Razzak, J., Kellermann, A. 2002. Emergency medical care in developing countries is it worthwhile? *Bulletin of the World Health Organization*. **80**: 900-905.
- Renner, D.B., Frey, 2nd, and L.R. Hanson. 2012. Intranasal delivery of siRNA to the olfactory bulbs of mice via the olfactory nerve pathway. *Neurosci Lett*. **513**: 193-7.
- Sapru, M.K., Yates, J.W., Hogan, S., Jiang, L., Halter, J., Bohn, M.C. 2006. Silencing of human alpha-synuclein in vitro and in rat brain using lentiviral-mediated RNAi. *Exp Neurol*. **198**: 382-90.
- Slevin M, Krupinski J. 2009. Cyclin-dependent kinase-5 targeting for ischaemic stroke. *Curr Opin Pharmacol*. **9**: 119-24.
- Sun, J.H., Tan, L., Yu, J.T. 2014. Post-stroke cognitive impairment: epidemiology, mechanisms and management. *Ann Transl Med*. **2**: 80.
- Szabo, K., Szabo, K., Förster, A., Jäger, T., Kern, R., Griebel, M., Hennerici, M.G., Gass, A. 2009. Hippocampal lesion patterns in acute posterior cerebral artery stroke: clinical and MRI findings. *Stroke*. **40**: 2042-2045.
- Tan, X., Chen, Y., Li, J., Li, X., Miao, Z., Xin, N., Zhu, J., Ge, W., Feng, Y., Xu, X. 2015. The inhibition of Cdk5 activity after hypoxia/ischemia injury reduces infarct size and promotes functional recovery in neonatal rats. *Neuroscience*. **290**: 552-60.
- Thorne, R.G., Hanson, L.R., Ross, T.M., Tung, D., Frey, W.H. 2nd. 2008. Delivery of interferon-beta to the monkey nervous system following intranasal administration. *Neuroscience*. **152**: 785-97.
- Thorne, R.G., Pronk, G.J., Padmanabhan, V., Frey, W.H. 2nd. 2004. Delivery of insulin-like growth factor-I to the rat brain and spinal cord along olfactory and trigeminal pathways following intranasal administration. *Neuroscience*. **127**: 481-496.
- Thorne, R.G., Frey, W.H. 2nd. 2001. Delivery of neurotrophic factors to the central nervous system: pharmacokinetic considerations. *Clin Pharmacokinet*. **40**: 907-946.
- Tsai, L.H., Takahashi, T., Caviness, V.S. Jr, Harlow, E. 1993. Activity and expression pattern of cyclin-dependent kinase 5 in the embryonic mouse nervous system. *Development*. **119**: 1029-40.
- Uribe-Arias, A., Posada-Duque, R.A., González-Billault, C., Villegas, A., Lopera, F., Cardona-Gómez, G.P. 2016. p120-catenin is necessary for neuroprotection induced by CDK5 silencing in models of Alzheimer's disease. *J Neurochem*. **138**: 624-39.
- Vautrin, J., Barker, J.L. 2003. Presynaptic quantal plasticity: Katz's original hypothesis revisited. *Synapse*. **47**: 184-199.
- Wen, Y., Yang, S.H., Liu, R., Perez, E.J., Brun-Zinkernagel, A.M., Koulen, P., Simpkins, J.W. 2007. Cdk5 is involved in NFT-like tauopathy induced by transient cerebral ischemia in female rats. *Biochimica et biophysica acta*. **1772**: 473-483.
- WHO. 2015. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs362/en/>.
- Won, S.J., Kim, D.Y., Gwag, B.J. 2002. Cellular and molecular pathways of ischemic neuronal death. *J Biochem Mol Biol*. **35**: 67-86.
- Zhang, S., Edelman, L., Liu, J., Crandall, J.E., Morabito, M.A. 2008. Cdk5 regulates the phosphorylation of tyrosine 1472 NR2B and the surface expression of NMDA receptors. *J Neurosci*. **28**: 415-424.
- Zhang, L., Z.G. Zhang, Chopp, M. 2012 The neurovascular unit and combination treatment strategies for stroke. *Trends Pharmacol Sci*. **33**: 415-22.
- Zhao, B., Zhao, C.Z., Zhang, X.Y., Huang, X.Q., Shi, W.Z., Fang, S.H., Lu, Y.B., Zhang, W.P., Xia, Q. 2012. The new P2Y-like receptor G protein-coupled receptor 17 mediates acute neuronal injury and late microgliosis after focal cerebral ischemia in rats. *Neuroscience*. **202**: 42-57.
- Zheng, Y.Q., Liu, J.X., Li, X.Z., Xu, L., Xu, Y.G. 2009. RNA interference-mediated downregulation of Beclin1 attenuates cerebral ischemic injury in rats. *Acta Pharmacol Sin*. **30**: 919-27.
- Zheng, M., Leung, C.L., Liem, R.K. 1998. Region-specific expression of cyclin-dependent kinase 5 (cdk5) and its activators, p35 and p39, in the developing and adult rat central nervous system. *J Neurobiol*. **35**: 141-159.

On the influence of the mass definition in the stability of axisymmetric relativistic thin disks

Eduar A. Becerra¹, Fredy L. Dubeibe^{1,2}, Guillermo A. González^{1,*}

¹Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

²Facultad de Ciencias Humanas y de la Educación, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

Abstract

The study on the stability of relativistic disks is one of the most important criteria for the characterization of astrophysically relevant galactic or accretion disks models. In this paper, we perform an analysis of the stability of static axisymmetric relativistic thin disks, by introducing a first-order perturbation into the energy-momentum tensor of the fluid. The formalism is applied to three particular models built with the aid of the displace-cut-reflect (DCR) method, and previously considered in literature (Ujevic and Letelier, 2004), but modifying the mass criteria, *i.e.*, using the Komar mass instead of the total surface mass. Under this conditions, it is found that the total mass values are independent of the parameters of the DCR-method, which let us choose the boundary condition for the cutoff radius, such that it takes the maximum value that allows an appreciable and well-behaved perturbation on the disk. As a general result, we found that the Komar mass is more appropriate to define the cutoff radius.

Key words: General Relativity, Relativistic thin disks, Stability.

Influencia de la definición de masa en la estabilidad de discos relativistas axialsimétricos

Resumen

Uno de los criterios más importantes para la caracterización de modelos galácticos o discos de acreción astrofísicamente relevantes, es el análisis de la estabilidad de dichos modelos. En este trabajo, se realiza un análisis de la estabilidad de discos delgados estáticos relativistas con simetría axial, mediante la introducción de una perturbación de primer orden en el tensor de energía-impulso del fluido. El formalismo se aplica a tres modelos construidos con el método de desplazamiento-corte-reflexión (DCR), previamente considerados en la literatura (Ujevic and Letelier, 2004), pero modificando el criterio de masa, es decir, usando la masa de Komar en lugar de la masa total superficial. Bajo estas condiciones, se encuentra que los valores de masa total son independientes de los parámetros del método DCR, lo que permite elegir la condición de frontera para el radio de corte que tome el valor máximo y a la vez permita una perturbación apreciable y bien comportada en el disco. Como resultado general, se encuentra que para la mayoría de modos de oscilación, la masa de Komar es mas apropiada para definir el radio de corte.

Palabras clave: Relatividad General, Discos delgados Relativistas, Estabilidad.

Introduction

During the last decades, considerable efforts have been made to obtain exact analytical solutions suitable to modeling axisymmetric thin disks, within the framework of Newton's and Einstein's theories of gravity. Such models are of astrophysical interest because they can be used to model accretion disks, galaxies in thermodynamic equilibrium or galaxies with black holes centers (Bicák, Lynden-Bell and Pichon, 1993, Ledvinka, Zofka and Bicák, 1998). Moreover, the addition of electromagnetic fields in those space-times allows studying neutron stars formation, white dwarfs, and quasars (Muñoz *et al.*, 2011, Alpar, 2001).

Since the seminal works on exact solutions representing static thin disks carried out by Bonnor and Sackfield (Bonnor and Sackfield, 1968) and Morgan and Morgan (Morgan and Morgan, 1969), more realistic models have been proposed

(Pichon and Lynden-Bell, 1996, González and Letelier, 2000). The superposition of static and stationary thin disks with black holes at the center, has been considered by Lemos, Letelier and Semerák (Lemos and Letelier, 1993, Semerák, 2002b, 2004). Vogt and Letelier studied the inclusion of electromagnetic fields into thin disks made of dust (Vogt and Letelier, 2004a) and of charged perfect fluid (Vogt and Letelier, 2004b). Also interesting is the case of thick disks proposed by González and Letelier (González and Letelier, 2004), who extended the DCR method to include thick disks in their models (For the interested reader, a complete review of the state-of-the-art on relativistic disks was made by Semerák, 2002a).

*Corresponding autor:

Guillermo A. González, guillermo.gonzalez@saber.uis.edu.co

Received: October 6, 2016

Accepted: January 12, 2017

Stability is an essential criterion to determine whether or not a model can be applied to describe an astrophysical system present in nature. In general, there are two approaches to study the stability of relativistic disks: The first option is based on analyzing the stability of particle orbits along geodesics (see *e.g.*, (Letelier, 2003) and (Vogt and Letelier, 2003)), while the second option consists in perturbing the energy-momentum tensor (see *e.g.*, (Seguin, 1975)). From a theoretical point of view, the latter option is more rigorous, because in this case the collective behavior of the particles is taken into account. Working on this line, Ujevic and Letelier (2004) investigated the stability of three particular models for relativistic thin disks, performing a first-order perturbation analysis with variable coefficients. However, as a pathological result, the authors find that the total mass of the disk depends on the parameters of the DCR method, such that the boundary conditions are also dependent on these parameters.

With the aim to avoid the undesired dependencies between parameters and to observe the possible changes in the stability, in the present paper we redo the calculations made by Ujevic and Letelier (2004) using the Komar mass definition instead of the mass definition (along the paper we will call it total surface mass) introduced in Vogt and Letelier (2003). The new results let us to choose the boundary condition for the cut-off radius such that it takes the maximum value allowing an appreciable and well-behaved perturbation on the disk.

Derivation of First-Order Perturbation Equations

Following Ujevic and Letelier (2004), and for the sake of self-consistency of the current paper, in what follows we present the derivation of the first-order perturbation equations for relativistic thin disks. Let us start considering that the energy-momentum tensor for an isotropic fluid with a discoid shape and without heat flow can be written as

$$T^{\mu\nu} = Q^{\mu\nu} \delta(z), \quad (1)$$

where δ denotes the Dirac delta function and

$$Q^{\mu\nu} = \sigma U^\mu U^\nu + p_r X^\mu X^\nu + p_\varphi Y^\mu Y^\nu,$$

with σ the surface energy density, p_r and p_φ the radial and azimuthal pressure, respectively, and U^μ , X^μ , and Y^μ the non-zero components of the orthonormal tetrad. Assuming that the first-order perturbations in the Einstein field equations do not modify the background metric, the perturbed equation for the energy-momentum tensor reads as

$$(\delta T^{\mu\nu})_{;\mu} = 0. \quad (2)$$

Introducing the definition of energy-momentum tensor for a thin disk (1), in the perturbed equation (2), and integrating with respect to the coordinate z , we find

$$\int \left\{ (\delta Q^{\mu\nu})_{;\mu} \delta(z) + \delta Q^{z\nu} [\delta(z)]_{,z} \right\} \sqrt{g_{zz}} dz = 0. \quad (3)$$

As a consequence of the DCR method, the metric components should only depend on r and $|z|$ (Vogt and Letelier, 2003). Additionally, if we define the value of $|z|_{,z}$ at $z = 0$ equals zero, the perturbed equation reduces to

$$(\delta Q^{\mu\nu})_{;\mu} \Big|_{z=0} = 0. \quad (4)$$

Taking into account that the perturbed vectors must satisfy the orthonormality condition, and assuming that $\delta X^\varphi = 0$ (since

the four-velocity and the thermodynamical variables do not depend on this quantity), we obtain

$$\begin{aligned} \delta Y^r &= \delta U^t = \delta X^r = \delta Y^\varphi = 0, \\ \delta X^t &= -\frac{X_r}{U_t} \delta U^r, \quad \delta Y^t = -\frac{Y_\varphi}{U_t} \delta U^\varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Due to the fact that the metric is static and axisymmetric, and the lack of z -dependences in $T^{\mu\nu}$, all the coefficients depend only on the radial coordinate; therefore, the general perturbation can be chosen as

$$\delta \xi^\mu(t, r, \varphi) = \delta \xi^\mu(r) e^{i(k\varphi - wt)}, \quad (6)$$

with k the wave number and w the angular frequency of the perturbation. We will focus on the term $\delta \xi^\mu(r)$, which has a significant role for the system stability.

Therefore, after substituting the perturbation (6) into equation (4), and replacing the conditions (5) in the resulting expression, the respective perturbed equations for t , r , and φ , read as

$$\begin{aligned} \delta U^r_{,r} \left(\sigma U^t - \frac{p_r}{U_t} \right) + \delta U^r \left\{ (\sigma U^t)_{,r} + \right. \\ \left. \sigma U^t (2\Gamma^t_{tr} + \Gamma^\mu_{\mu r}) - \left(\frac{X_r}{U_t} \right)_{,r} p_r X^r - \right. \\ \left. \frac{X_r}{U_t} \left[(p_r X^r)_{,r} + p_r X^r (2\Gamma^t_{tr} + \Gamma^\mu_{\mu r}) \right] \right\} + \end{aligned} \quad (7)$$

$$\delta U^\varphi \left[ik \left(\sigma U^t - \frac{p_\varphi}{U_t} \right) \right] - \delta \sigma (iw U^t U^t) = 0,$$

$$\begin{aligned} \delta U^r \left[iw \left(\frac{p_r}{U_t} - \sigma U^t \right) \right] + \delta \sigma (U^t U^t \Gamma^r_{tt}) + \\ \delta p_r \left[(X^r X^r)_{,r} + X^r X^r (\Gamma^r_{rr} + \Gamma^\mu_{\mu r}) \right] + \end{aligned} \quad (8)$$

$$\delta p_{r,r} (X^r X^r) + \delta p_\varphi (Y^\varphi Y^\varphi \Gamma^r_{\varphi\varphi}) = 0,$$

$$\delta U^\varphi \left[w \left(\frac{p_\varphi}{U_t} - \sigma U^t \right) \right] + \delta p_\varphi (k Y^\varphi Y^\varphi) = 0, \quad (9)$$

Finally, from the set of differential equations presented above, and the equation of state of a perfect fluid, $\delta p = \delta \sigma (p_{,r} / \sigma_{,r})$, the differential equation for the perturbed energy density takes the form

$$A \delta \sigma_{,rr} + B \delta \sigma_{,r} + C \delta \sigma = 0, \quad (10)$$

whose coefficient A , B , and C , are given by

$$\begin{aligned} A &= -\frac{A_1 B_1}{B_2} \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right), \\ B &= A_1 \left\{ \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right) \left[\frac{B_1 B_{2,r}}{B_2^2} - \frac{B_{1,r} + B_4 + B_5}{B_2} \right] - \frac{B_3}{B_2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{2B_1}{B_2} \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right)_{,r} \right\} - \frac{A_2 B_1}{B_2} \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right), \\ C &= A_1 \left\{ \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right)_{,r} \left[\frac{B_1 B_{2,r}}{B_2^2} - \frac{B_{1,r} + B_4 + B_5}{B_2} \right] - \frac{B_{3,r}}{B_2} + \right. \\ &\quad \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right) \left[\frac{B_{2,r}}{B_2^2} (B_4 + B_5) - \frac{B_{4,r} + B_{5,r}}{B_2} \right] + \\ &\quad \left. \frac{B_{2,r} B_3}{B_2^2} - \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right)_{,rr} \right\} - \frac{A_3 C_2}{C_1} \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right) - A_4 \\ &\quad - \frac{A_2}{B_2} \left\{ B_1 \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right)_{,r} + \left(\frac{p_{,r}}{\sigma_{,r}} \right) [B_4 + B_5] + B_3 \right\}, \end{aligned}$$

where A_i , B_i , and C_i , are the factors multiplying the perturbed variables in equations (7), (8), and (9), respectively, with the indexes in numerical order according to their order of appearance.

Due to the cumbersome form of equation (10), it must be solved numerically. For this purpose, we shall impose Dirichlet boundary conditions, one at the center of the disk and the other one at the final boundary of the domain. However, it should be noted that the disk has an infinite radial extension, for this reason, it is necessary to introduce a cutoff on the radial coordinate.

Thermodynamic variables

In the previous section, we explicitly wrote down the perturbed equations for thin disks, nevertheless, such expressions are given in terms of the thermodynamic variables of the fluid, which requires finding explicit formulas for the surface energy density and the pressures on the disk. To this end, let us represent the matter distribution on a hypersurface Σ , defined by the function $l(x^\alpha) = z$, which divides the space-time into two regions: M^+ on top and M^- at the bottom. Therefore, the normal vector to the hypersurface Σ is given by $n_\alpha = l_{,\alpha} = \delta_\alpha^z$, and the components of the metric tensor must satisfy

$$g_{\mu\nu}^-(r, z) = g_{\mu\nu}^+(r, -z), \quad (11)$$

such that

$$g_{\mu\nu,z}^-(r, z) = -g_{\mu\nu,z}^+(r, -z), \quad (12)$$

where $g_{\alpha\beta}^+$ and $g_{\alpha\beta}^-$, should be understood as the metric tensors for the regions defined by $z > 0$ (M^+) and $z < 0$ (M^-), respectively.

By taking the limit $z \rightarrow 0$, the discontinuities in the first derivatives of the metric tensor take the form

$$b_{\mu\nu} = [g_{\mu\nu,z}] = g_{\mu\nu,z}^+ \Big|_{z=0} - g_{\mu\nu,z}^- \Big|_{z=0} = 2g_{\mu\nu,z}^+ \Big|_{z=0}, \quad (13)$$

with $b_{\mu\nu}$, the jump of the first derivative through Σ . Using the distributions method (Papapetrou, 1968, Poisson, 2004), the metric can be written as

$$g_{\alpha\beta} = \Theta(l) g_{\alpha\beta}^+ + \Theta(-l) g_{\alpha\beta}^-, \quad (14)$$

where $\Theta(l)$ is the usual Heaviside function. Performing the derivative of equation (14) we obtain

$$g_{\alpha\beta,\gamma} = \Theta(l) g_{\alpha\beta,\gamma}^+ + \Theta(-l) g_{\alpha\beta,\gamma}^- + n_\gamma \delta(l) [g_{\alpha\beta}]. \quad (15)$$

The last term in the right-hand side of equation (15) is singular, consequently the Christoffel symbols would not be defined as a distribution. An alternative way to avoid this difficulty, is to impose that the metric is continuous on the hypersurface, *i.e.*, $[g_{\alpha\beta}] = g_{\alpha\beta}^+ - g_{\alpha\beta}^- = 0$, such that

$$\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha = \Theta(l) \Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha+} + \Theta(-l) \Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha-}, \quad (16)$$

whose derivative reads as

$$\Gamma_{\beta\gamma,\delta}^\alpha = \Theta(l) \Gamma_{\beta\gamma,\delta}^{\alpha+} + \Theta(-l) \Gamma_{\beta\gamma,\delta}^{\alpha-} + n_\delta(l) [\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha]. \quad (17)$$

The corresponding Riemann curvature tensor is given by

$$R_{\beta\gamma\delta}^\alpha = \Theta(l) R_{\beta\gamma\delta}^{\alpha+} + \Theta(-l) R_{\beta\gamma\delta}^{\alpha-} + \delta(l) \widehat{R}_{\beta\gamma\delta}^\alpha, \quad (18)$$

where $R_{\beta\gamma\delta}^{\alpha\pm}$ are the tensors defined in M^\pm and

$$\widehat{R}_{\beta\gamma\delta}^\alpha = [\Gamma_{\beta\delta}^\alpha] n_\gamma - [\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha] n_\delta, \quad (19)$$

$$\text{with } [\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha] = \frac{1}{2} (b_{\beta}^\alpha n_\gamma + b_{\alpha}^\alpha n_\beta - b_{\beta\gamma} n^\alpha).$$

From the last expression, it is clear that Riemann tensor, the Ricci tensor, and Ricci scalar on the hypersurface are

$$\begin{aligned} \widehat{R}_{\beta\gamma\delta}^\alpha &= \frac{1}{2} \{ b_{\delta}^\alpha n_\beta n_\gamma - b_{\gamma}^\alpha n_\beta n_\delta + b_{\beta\gamma} n^\alpha n_\delta - b_{\beta\delta} n^\alpha n_\gamma \}, \\ \widehat{R}_{\beta\delta}^\alpha &= \frac{1}{2} \{ b_{\delta}^\alpha n_\beta n^\alpha - b_{\alpha}^\alpha n_\beta n_\delta + b_{\beta\alpha} n^\alpha n_\delta - b_{\beta\delta} n^\alpha n_\alpha \}, \\ \widehat{R} &= \{ b_{\mu\alpha} n^\alpha n^\mu - b_{\alpha}^\alpha n^\alpha n_\alpha \}. \end{aligned} \quad (20)$$

On the other hand, the energy-momentum tensor $T_{\beta\delta}$ can be expressed as

$$T_{\beta\delta} = \Theta(l) T_{\beta\delta}^+ + \Theta(-l) T_{\beta\delta}^- + \delta(l) Q_{\beta\delta}, \quad (21)$$

where $Q_{\beta\delta}$ is the energy-momentum tensor associated with the hypersurface, and $T_{\beta\delta}^\pm$ are the energy-momentum tensors associated to M^\pm . Hence, we can write the Einstein field equations as follows

$$\begin{aligned} R_{\beta\delta}^\pm - \frac{1}{2} g_{\beta\delta} R^\pm &= \kappa T_{\beta\delta}^\pm \\ \widehat{R}_{\beta\delta} - \frac{1}{2} g_{\beta\delta} \widehat{R} &= \kappa Q_{\beta\delta}. \end{aligned} \quad (22)$$

Given that the only source of gravitational field is a thin distribution of matter, the energy-momentum tensor satisfies

$$\begin{aligned} \kappa Q_{\beta\delta} &= \frac{1}{2} \{ b_{\alpha\delta} n_\beta n^\alpha - b_{\alpha}^\alpha n_\beta n_\delta + b_{\beta\alpha} n^\alpha n_\delta - b_{\beta\delta} n^\alpha n_\alpha \\ &\quad - (b_{\mu\alpha} n^\alpha n^\mu - b_{\alpha}^\alpha n^\alpha n_\alpha) g_{\beta\delta} \}. \end{aligned} \quad (23)$$

which, in quasi-cylindrical coordinates $x^\alpha = (t, r, \varphi, z)$ and considering the hypersurface Σ defined by the function $l(x^\alpha) = z$, with normal vector $n_\alpha = \delta_\alpha^z$, takes the form

$$\begin{aligned} \kappa Q_\beta^\mu &= \frac{1}{2} \{ b^{z\mu} \delta_\beta^z - g^{\mu z} \delta_\beta^z b_\alpha^\alpha + g^{\mu z} b_\beta^z - g^{zz} b_\beta^\mu \\ &\quad - (b^{zz} - g^{zz} b_\alpha^\alpha) \delta_\beta^\mu \}. \end{aligned} \quad (24)$$

From the above equation, and as noted by **Vogt and Letelier** (2003), it can be shown that the non-zero components of the surface energy-momentum tensor are

$$Q^t_t = \sigma = \frac{1}{16\pi} g^{zz} (b^r_r + b^\varphi_\varphi), \quad (25)$$

$$Q^r_r = p_r = \frac{1}{16\pi} g^{zz} (b^t_t + b^\varphi_\varphi), \quad (26)$$

$$Q^\varphi_\varphi = p_\varphi = \frac{1}{16\pi} g^{zz} (b^t_t + b^r_r). \quad (27)$$

Mass Definition

The mass concept in general relativity is not unique and there are several different definitions that are applicable under different circumstances. In the case of stationary spacetimes, the commonly accepted definitions are: the total volumetric (or surface) mass, Komar, ADM and Bondi-Sach masses. However, it is a well-known fact that for stationary spacetimes the ADM and Bondi-Sach masses are exactly alike (Poisson, 2004). Besides, in the asymptotically flat case, it can be shown that the ADM and the Komar masses are equivalent (Jaramillo and Gourgoulhon, 2009). Then, in the stationary, axisymmetric, asymptotically flat, vacuum solutions of Einstein's equation, there are only two possibilities to choose from, the total volumetric (or surface) mass or the Komar mass. As commented in the introduction, the main difference between the present paper and the one by **Ujevic and Letelier** (2004), is that they

used the total surface mass, while along this paper, we use the Komar mass definition, which is independent of the methods used to build the particular solutions of Einstein's equation. A necessary condition for the definition of mass, is that must not involve any dependence with the specific choice of coordinates. This property is achieved for stationary and axially symmetric spacetimes, through the Komar formula M_k , which reads as

$$M_k = 2 \int_{\Sigma} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} T g_{\alpha\beta} \right) n^{\alpha} \xi_{(t)}^{\beta} \sqrt{h} d^3y, \quad (28)$$

where Σ is spacelike hypersurface, n^{α} is timelike vector normal to Σ , $\xi_{(t)}^{\beta}$ is timelike Killing vector and h is the determinant of metric associated to Σ . For a static and diagonal metric, the following relations holds

$$n^{\alpha} = -\frac{g^{\alpha\beta}}{\sqrt{|g^{tt}|}} \delta_{\beta}^t, \quad \xi_{(t)}^{\beta} = \delta_{t}^{\beta}, \quad h = g_{zz} g_{rr} g_{\varphi\varphi},$$

such that the Komar mass takes the form

$$M_k = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} (\sigma + p_r + p_{\varphi}) \sqrt{|g^{tt}|} \sqrt{g_{zz}} \sqrt{g_{rr}} \sqrt{g_{\varphi\varphi}} dr d\varphi. \quad (29)$$

The Komar mass definition differs from the total surface mass in the fact that the former one considers all the contributions to the energy-momentum tensor, while the surface mass, given by

$$M_s = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma \sqrt{g_{zz}} \sqrt{g_{rr}} \sqrt{g_{\varphi\varphi}} dr d\varphi, \quad (30)$$

takes only into account the surface energy density.

Case 1: Isotropic Schwarzschild Thin Disk

The isotropic Schwarzschild thin disk metric in quasi-cylindrical Weyl-Papapetrou coordinates was obtained by **Vogt and Letelier** (2005), and can be written as

$$ds^2 = -\left(\frac{2R-m}{2R+m}\right)^2 dt^2 + \left(1 + \frac{m}{2R}\right)^4 (dr^2 + r^2 d\varphi^2 + dz^2) \quad (31)$$

where m is a positive constant and $R^2 = r^2 + (|z| + a)^2$.

Thus, the corresponding expressions for the pressure components and surface energy density (see *e.g.*, **Vogt and Letelier** (2003)), are obtained by using equations (25-27),

$$\sigma = \frac{16maR_0^2}{\pi(2R_0 + m)^5}, \quad (32)$$

$$p = \frac{8m^2aR_0^2}{\pi(2R_0 + m)^5(2R_0 - m)}, \quad (33)$$

with $R_0 = R(r, z = 0)$ and $p = p_r = p_{\varphi}$.

Let us define a general cutoff radius as the radial distance at which the matter within the thin disk formed up to such radius corresponds to the $n\%$ of the total matter of the infinite disk, *i.e.*

$$nM_T = M_{r_c}, \quad (34)$$

with M_T the total mass of the infinite disk and M_{r_c} the mass up to the cutoff radius. As noted in the previous section, the total mass value may depend on the considered definition, such that the cutoff radius could depend also on this choice. From

(30), (31) and (32), and in accordance with Eq. (12) of **Vogt and Letelier** (2003), we find

$$M_s = m \left(1 + \frac{m}{4a}\right), \quad (35)$$

and

$$M_{r_c} = m \left(1 + \frac{m}{4a}\right) - \frac{ma}{2r_c} \left(2 + \frac{m}{2r_c}\right). \quad (36)$$

On the other hand, from the Komar mass definition (29) and using (31), (32) and (33), we get

$$M_k = m, \quad (37)$$

and

$$M_{r_c} = m - \frac{ma}{r_c}. \quad (38)$$

Hence, the resulting expression for the cutoff radius when considering Eq. (30) is

$$r_c^* = \frac{2a^2 + a\sqrt{4a^2 + m(1-n)(4a+m)}}{(1-n)(4a+m)}, \quad (39)$$

while using Eq. (29), we get

$$r_c = \frac{a}{1-n} \quad (40)$$

In Fig. 1 we show a comparison between the cutoff radii r_c and r_c^* , using different values of the parameters m and a . Taking into account that values of n smaller than 0.9 are not used nor physically appropriate, we plot the difference $r_c - r_c^*$ in the range $n \in [0.9, 1]$.

In all that follows, except where especially noted, we define the cutoff radius r_c using the 95% of the total mass of infinite disk,[†] and the remaining 5% of matter is distributed along the plane $z = 0$ from r_c to infinity. Moreover, we assume that at $r = 0$, the perturbation equals 10% of the unperturbed energy density value and at $r = r_c$ the perturbation vanishes, *i.e.* $\delta\sigma(r = r_c) = 0$.

By setting $m = 0.5$ and $a = 0.6$, which are the set of parameters that best fit the expected energy density profile in a realistic model, we find $r_c \approx 12$ and $r_c^* \approx 10$. In Fig. 2 we present the numerical solution to the differential equation (10) using the Komar mass definition (upper panel) and the total surface mass (lower panel). In this figure, we show the perturbed energy density profile for different values of w . It can be seen that the parameter w is proportional to the frequency of oscillations

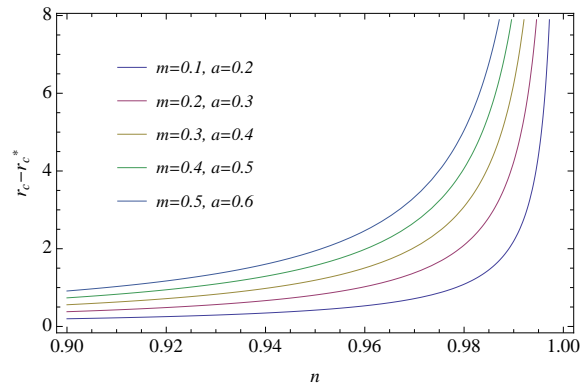


Figure 1. Comparison between the cutoff radii r_c and r_c^* using different values of the parameters m and a .

[†]This percentage corresponds to the optimal value to get a non-negligible perturbation on the disk.

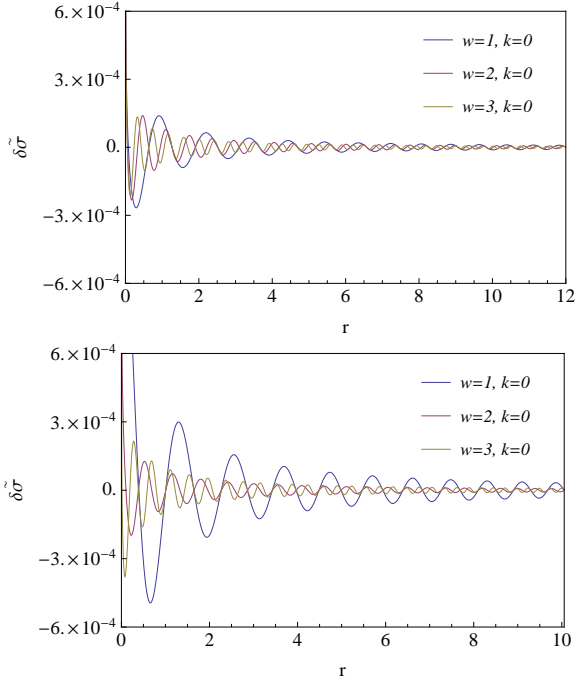


Figure 2. Perturbed energy density profiles $\delta\bar{\sigma} = \sqrt{g_{zz}}\delta\sigma$ for different values of w using Eq. (29) (upper panel) and Eq. (30) (lower panel) in the isotropic Schwarzschild thin disk.

within the disk, *i.e.* the number of ring-like structures increases with increasing w . Also, it is worth noting that the oscillations quickly decay to zero regardless of the oscillation modes, however the oscillation amplitude is smaller for Eq. (29) (upper panel) than for Eq. (30) (upper panel).

On the other hand, in Fig. 3 we present the profile of the perturbed pressure. When fixing w and varying k , the amplitude for $\delta\bar{p}$ has an oscillatory behavior similar to the one of $\delta\bar{\sigma}$. From Fig. 3 it can be seen that the oscillation amplitude is not only smaller for Eq. (29) (upper panel) than for Eq. (30) (upper panel), but also disappears in approximately the middle of the disk. It means that for the set of parameters here considered, the density and pressure in the disk are stable independently of the mass definition used.

A full analysis of the system requires also a comparison between the amplitude of the perturbed velocities with the escape velocity of the constituents in the disk. In Fig. 4 we show the profiles for the perturbed radial δU^r velocities using Eq. (29) (upper panel) and Eq. (30) (lower panel), setting the respective cutoff radii for the 95.776% of the total mass of infinite disk[‡]. Both velocities exhibit an increase in the frequency of oscillations with increasing w ; moreover, we see that the envelopes of the oscillating functions increase at the external radial boundary, however, the perturbed radial velocity grows faster in the lower panel than in the upper panel.

Concerning the escape velocity v_e , it is well known that it should be larger than the perturbed radial velocity, otherwise, the model will not have any astrophysical validity. The escape

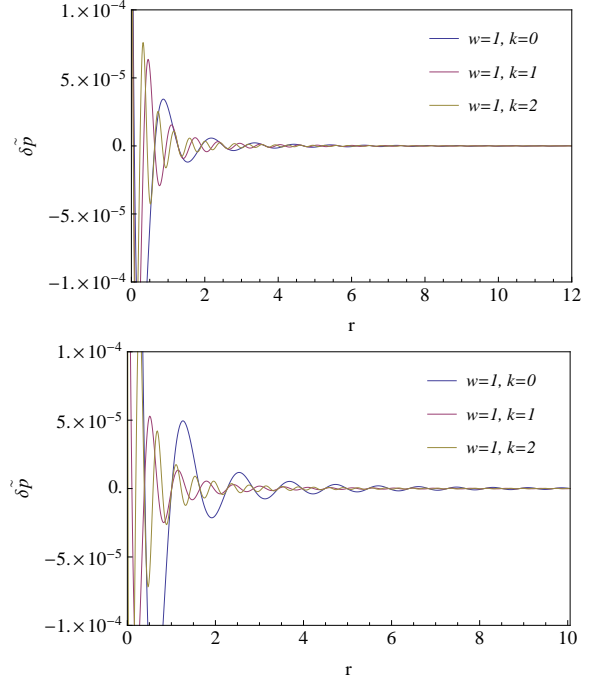


Figure 3. Perturbed pressure profiles $\delta\bar{p} = \sqrt{g_{zz}}\delta p$ for the isotropic Schwarzschild thin disk using Eq. (29) (upper panel) and Eq. (30) (lower panel).

velocity required to overcome the force generated by a gravitational potential Φ can be calculated as $v_e = \sqrt{2\Phi}$, which from the weak-field approximation is given as $2\Phi = g_{tt} - 1$. So, from (31), we find

$$v_e = \frac{2\sqrt{2mR}}{2R + m}. \tag{41}$$

For the set of parameters $a = 0.6$ and $m = 0.5$, the resulting escape velocities for Eq. (29) and Eq. (30) are $v_e = 0.26$ and $v_e = 0.28$, respectively. From Fig. 4 it is clear that using Eq. (29) the perturbed radial velocity is always less than the escape velocity (red dashed line), such that all particles remain inside the disk. Conversely, using Eq. (30) the perturbed radial velocity can be greater than the escape velocity (red dashed line), meaning that the particles may escape of the disk.

In Fig. 5 we show the profiles of the perturbed azimuthal velocities. In both cases the velocities are stable and some orders of magnitude smaller than the escape velocity. These results ratify that, under first order perturbations of the form (6) and using the Komar mass definition, the isotropic Schwarzschild thin disk has a stable behavior for a large set of parameters such that it can be used to describe astrophysical models.

Case 2: Chazy-Curzon Thin Disk

The Chazy-Curzon thin disk metric in Weyl coordinates is described as (Bicák, Lynden-Bell and Katz, 1993)

$$ds^2 = -e^{2\Phi} dt^2 + e^{-2\Phi} r^2 d\varphi^2 + e^{2(\Lambda-\Phi)} (dr^2 + dz^2), \tag{42}$$

where the metric functions Φ y Λ are given by

$$\Phi = -\frac{m}{R}, \quad \Lambda = -\frac{m^2 r^2}{2R^4}, \tag{43}$$

[‡]We set this percentage because it gives place to instabilities.

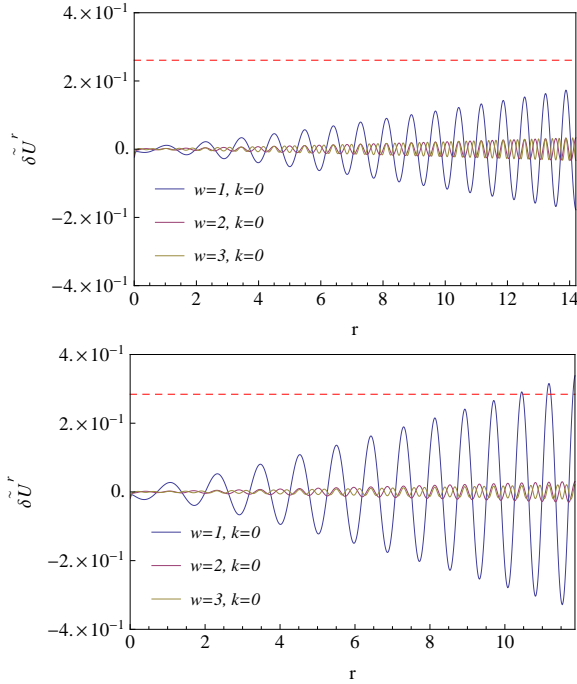


Figure 4. Profiles of the perturbed radial velocities $\delta\tilde{U}^r$ for different oscillation modes in Schwarzschild isotropic thin disk using Eq. (29) (upper panel) and Eq. (30) (lower panel). The red dashed line denotes the value of the respective escape velocities.

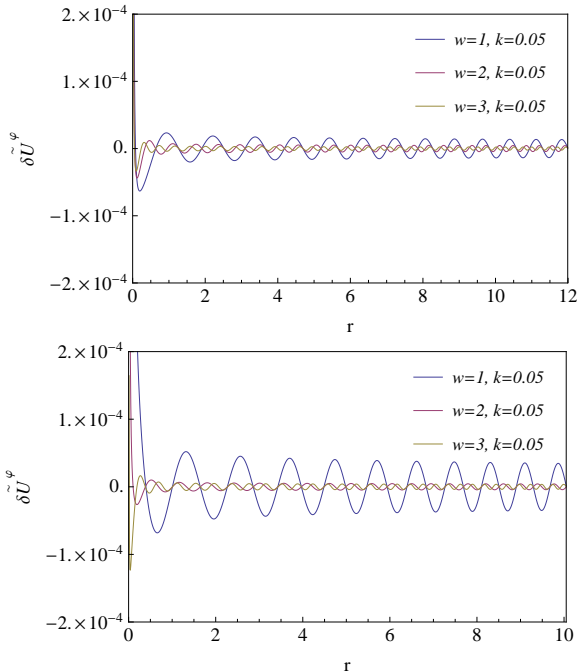


Figure 5. Profiles of the perturbed azimuthal velocities for different oscillation modes in Schwarzschild isotropic thin disk using Eq. (29) (upper panel) and Eq. (30) (lower panel).

with $R^2 = r^2 + (|z| + a)^2$. From (42) and (43), and equations (25), (26), and (27), we obtain the expressions for the pressure and the surface energy density of the Chazy-Curzon thin disk,

$$\sigma = \frac{ma}{2\pi R_0^3} \left[1 - \frac{mr^2}{R_0^3} \right] e^{2(\Phi_0 - \Lambda_0)}, \quad (44)$$

$$p_\varphi = \frac{m^2 a}{2\pi R_0^4} \frac{r^2}{R_0^2} e^{2(\Phi_0 - \Lambda_0)}, \quad p_r = 0, \quad (45)$$

where R_0 , Λ_0 and Φ_0 are the functions evaluated at $z = 0$. Substituting equations (43), (44) and (45), into the Komar mass equation (29), we obtain, accordingly, $M_k = m$. A particular set of values that satisfy the energy conditions are $a = 0.4$ and $m = 0.5$, in which case $r_c \approx 8$. In Fig. 6 we show the numerical solution to the differential equation (10) with boundary conditions at $r = 0$ and $r = r_c = 8$. As can be noted, regardless of the values of w (upper panel) and k (lower panel), the profiles of the perturbed energy density grow rapidly to infinity. To rule out that the above effect is due to the chosen values of a , we perform an analysis varying $\delta\sigma$ in the interval $0 \leq m/a \leq 1.3$, observing the same tendency. The same procedure was performed using the total surface mass definition, obtaining the same behavior. These results show that the energy density, and hence the pressure and velocities, exhibit instabilities for this model and are independent of the mass definition used in the calculations.

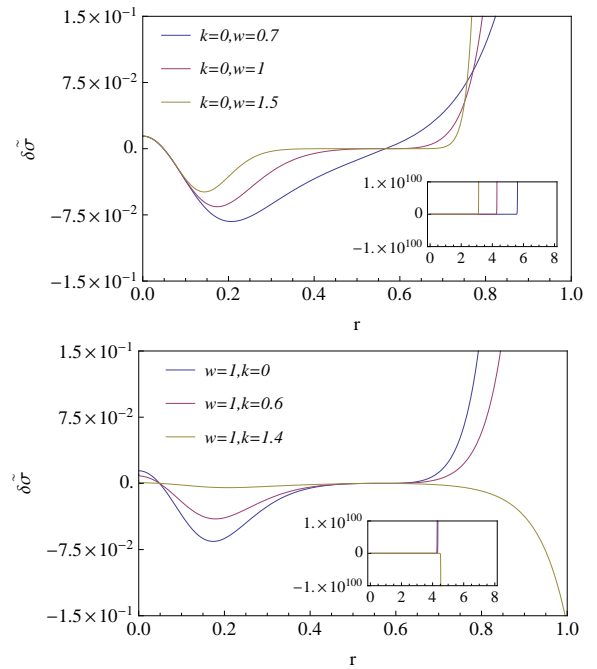


Figure 6. Profiles of the perturbed energy density $\delta\tilde{\sigma}$ in the Chazy-Curzon thin disk using Eq. (29), for different values of w and k . The parameters have been set as $a = 0.4$ and $m = 0.5$. The insets show that for finite values of r , the perturbations tend to infinity.

Case 3: Zipoy-Voorhees Thin Disk

The Zipoy-Voorhees thin disk metric in Weyl coordinates has the form (Ujevic and Letelier, 2004)

$$ds^2 = -e^{2\Phi} dt^2 + e^{-2\Phi} r^2 d\varphi^2 + e^{2(\Lambda - \Phi)} (dr^2 + dz^2), \quad (46)$$

with metric functions Φ and Λ , given by

$$\Phi = \frac{m}{b-a} \ln \left[\frac{R_a + |z| + a}{R_b + |z| + b} \right], \tag{47}$$

$$\Lambda = \frac{2m^2}{(b-a)^2} \ln \left[\frac{(R_a + R_b)^2 - (b-a)^2}{4R_a R_b} \right],$$

where $R_a^2 = r^2 + (|z| + a)^2$, $R_b^2 = r^2 + (|z| + b)^2$ and $b \geq a$. Hence, by applying the same procedure used for the previous disks models, we obtain expressions for the surface energy density and the azimuthal pressure,

$$\sigma = -\frac{m^2 e^{-2(\Lambda_0 - \Phi_0)}}{2\pi(b-a)^2} \left[\frac{2(R_{a0} + R_{b0}) \left(\frac{a}{R_{a0}} + \frac{b}{R_{b0}} \right)}{(R_{a0} + R_{b0})^2 - (b-a)^2} - \left(\frac{a}{R_{a0}^2} + \frac{b}{R_{b0}^2} \right) \right] + \frac{m e^{-2(\Lambda_0 - \Phi_0)}}{2\pi(b-a)} \left(\frac{1}{R_{a0}} - \frac{1}{R_{b0}} \right), \tag{48}$$

$$p_\varphi = \frac{m^2 e^{-2(\Lambda_0 - \Phi_0)}}{2\pi(b-a)^2} \left[\frac{2(R_{a0} + R_{b0}) \left(\frac{a}{R_{a0}} + \frac{b}{R_{b0}} \right)}{(R_{a0} + R_{b0})^2 - (b-a)^2} - \left(\frac{a}{R_{a0}^2} + \frac{b}{R_{b0}^2} \right) \right], \tag{49}$$

with R_{a0} , R_{b0} , Λ_0 and Φ_0 the respective functions evaluated at $z = 0$. Just like in the Chazy-Curzon model, the thin disk described by the Zipoy-Voorhees metric has no radial pressure. Replacing (47), (48) and (49) into equation (29), we can calculate the Komar mass for the Zipoy-Voorhees thin disk as $M_T = m$.

To be consistent with the previous models, the calculations were performed for a particular set of values that satisfy the energy conditions, $m = 0.5$, $a = 1$ and $b = 2.15$, such that the cutoff radius takes the value $r_c \approx 31$. In the same way as cases 1 and 2, in Fig. 7 we show the numerical solution to the differential equation (10) with boundary conditions at $r = 0$ and $r = r_c = 31$.

It can be seen from Fig. 7 that there exist instabilities for the Zipoy-Voorhees thin disk strongly amplified before they reach 10% of its cutoff radius, and regardless of the angular frequency w (upper panel) or wave number k (lower panel) the perturbed energy density tends to infinity. The results for the Zipoy-Voorhees thin disk when using the total surface mass are not shown because they exhibit practically the same behavior than using the Komar mass. The independence of the results with the particular chosen values of a and b , was also analyzed observing the same tendency. Given the instability in the surface energy density, the other thermodynamic variables of the thin disk also are unstable.

Concluding Remarks

In this paper, we have reviewed the results obtained by **Ujevic and Letelier** (2004) on the stability of three particular models, using an alternative mass definition, *i.e.*, the Komar mass. This formal concept of mass can be defined in any stationary spacetime, so it is applicable to all three particular thin disk models under consideration: the isotropic Schwarzschild, Chazy-Curzon, and Zipoy-Voorhees metrics. Assuming that the disks are made of a perfect fluid, we found the differential equation for the perturbed energy density and the non-zero components of the surface energy-momentum tensor. The differential equation was numerically solved, defining a cutoff

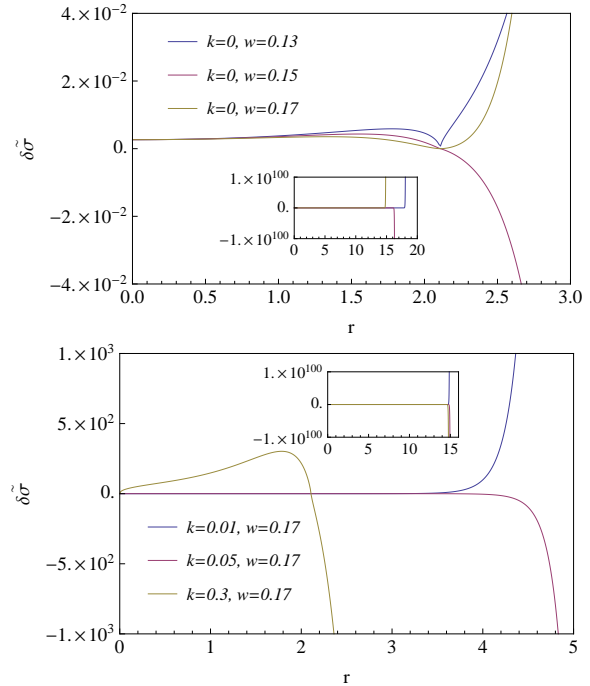


Figure 7. Profiles of the perturbed energy density $\delta\sigma$ for different values of w (upper panel) and k (lower panel) in the Zipoy-Voorhees thin disk. The parameters have been set as $a = 1$, $b = 2.15$ and $m = 0.5$. The inset shows the tendency of the curves for larger scales.

radius r_c , such that the matter up to r_c is approximately 95% of the mass of the infinite disk and the remaining 5% of matter is distributed from r_c to infinity. Moreover, we assumed that at the center of the disk the perturbation equals 10% of the unperturbed energy density, and at the external cutoff radius the perturbation vanishes.

Once we derived the expressions for the pressure components, the surface energy density, and the metric functions for each particular case, we calculated the Komar mass. As a general result, we find that the mass parameter in each one of the metrics equals the Komar mass for the disk, while by using the total surface mass definition, as is the case of the reviewed paper, the total mass depends on the parameters of the DCR method. The use of the Komar definition lets us set the physical parameters that best fit the expected energy density profile in a realistic model and simultaneously satisfy the energy conditions. With this result, the cutoff radius only depends on the thermodynamic variables and the free parameters of each

As the main finding, we found that the cutoff radius is larger for the Komar mass definition than for the total surface mass. This result let us to increase the number of parameters that give place to stable Schwarzschild thin disk models. On the other hand, the Chazy-Curzon and Zipoy-Voorhees thin disk models are not stable under first-order perturbations, because the thermodynamic variables and fluid velocities tend to infinity for finite values of the radial coordinate. Such instabilities are a consequence of the lack of radial pressure and are not related to the definition of mass. We also have shown that the infinite radial extension of the disk can be the reason for the

instability, as hypothesized by Ujevic *et al.*, nevertheless, some instabilities can be artificially introduced into the model due to the use of a non-appropriate mass definition in the calculations.

Acknowledgments

We would like to thank the anonymous referee for useful comments and remarks, which improved the presentation of the paper. This research was partially supported by VIE-UIS under grant numbers 1822 and 1785, and COLCIENCIAS under grant number 8840. EAB would like to thank COLCIENCIAS for their support through the program: Jóvenes Investigadores e Innovadores 2014. FLD acknowledges financial support from the Universidad de los Llanos provided under grant Commission: Postdoctoral Fellowship Scheme.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Bicák, J., Lynden-Bell, D. and Pichon, C.** (1993). Relativistic Disks and Flat Galaxy Models. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 265, 126.
- Ledvinka, T., Zofka, M. and Bicák, J.** (1998). Relativistic Disks as Sources of the Kerr-Newman Fields. Proc. of the MGM8 Meeting, Jerusalem.
- Muñoz, J. A. et. al.** (2011). A study of gravitational lens chromaticity with the hubble space telescope Based on observations made with the NASA-ESA Hubble Space Telescope. *Astrophys. J.*, 742, 67.
- Alpar, M. A.** (2001). On young neutron stars as propellers and accretors with conventional magnetic fields. *Astrophys. J.* 554(2), 1245.
- Bonnor, W. B. and Sackfield, A.** (1968). The interpretation of some spheroidal metrics. *Commun. Math. Phys.* 8, 338.
- Morgan, T. and Morgan, L.** (1969). The gravitational field of a disk. *Phys. Rev.* 183, 1097.
- Pichon, C. and Lynden-Bell, D.** (1996). New Sources of Kerr and other Metrics: Rotating Relativistic Disks with Pressure Support. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 280, 1007 *Phys. Rev. D.* 45, 3534.
- González, G. A. and Letelier, P. S.** (2000). Rotating relativistic thin disks. *Phys. Rev. D.* 62, 064025.
- Lemos, J. P. S. and Letelier, P. S.** (1993). Superposition of Morgan and Morgan discs with a Schwarzschild black hole. *Class. Quantum Grav.* 10, L75.
- Semerák, O.** (2002). Thin disc around a rotating black hole, but with support in-between. *Class. Quantum Grav.* 19, 3829.
- Semerák, O.** (2004). Exact power-law discs around static black holes. *Class. Quantum Grav.* 21, 2203.
- Semerák, O.** (2002). Following the Prague Inspiration, to Celebrate the 60th Birthday of Jiri Bicák. World Scientific, Singapore.
- Bicák, J., Lynden-Bell, D. and Katz, J.** (1993). Relativistic Disks as Sources of Static Vacuum Spacetimes. *Phys. Rev. D.* 47, 4334.
- Vogt, D. and Letelier, P. S.** (2004). Exact relativistic static charged dust discs and non-axisymmetric structures. *Class. Quantum Grav.* 21, 3369.
- Vogt, D. and Letelier, P. S.** (2004). Exact relativistic static charged perfect fluid disks. *Phys. Rev. D.* 70, 064003.
- González, G. A. and Letelier, P. S.** (2004). Exact general relativistic thick disks. *Phys. Rev. D.* 69, 044013.
- Letelier, P.S.** (2003). Stability of circular orbits of particles moving around black holes surrounded by axially symmetric structures. *Phys. Rev. D.* 68, 104002.
- Vogt, D. and Letelier, P. S.** (2005). New models of general relativistic static thick disks. *Phys. Rev. D.* 71, 084030.
- Vogt, D. and Letelier, P. S.** (2003). Exact general relativistic perfect fluid disks with halos. *Phys. Rev. D.* 68, 084010.
- Seguin, F.H.** (1975). Stability of nonuniform rotation in relativistic stars. *Astrophys. J.* 197, 745.
- Ujevic, M., and Letelier, P. S.** (2004). Stability of general relativistic geometric thin disks. *Phys. Rev. D.* 70, 084015.
- Papapetrou A. and Hamouni A.** (1968). Couches simples de matière en relativité générale. *Ann. Inst. Henri Poincaré.* 9, 179.
- Poisson, E. A** (2004). Relativist's toolkit: the mathematics of black-hole mechanics. Cambridge university press.
- Jaramillo, J. L., and Gourgoulhon, E.** (2009). Mass and motion in general relativity. Springer Netherlands.

Simulaciones computacionales para estudiar el nanomundo

Pamela Rubio-Pereda¹, Jonathan Guerrero², Noboru Takeuchi^{2,*}

¹ Instituto de Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla, México

² Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ensenada, Baja California, México

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 1 de diciembre de 2016

Resumen

Las simulaciones computacionales son una herramienta muy importante para estudiar el nanomundo. En este artículo se revisan algunas líneas de investigación desarrolladas con el uso de simulaciones computacionales basadas en la teoría del funcional de la densidad y se presentan algunos resultados recientes. Se muestra, específicamente, cómo se puede usar esta teoría para estudiar reacciones químicas en sistemas bidimensionales con posibles aplicaciones en el futuro campo de la electrónica molecular o moletrónica, y en la formación de nanoestructuras de nitruros de manganeso con propiedades magnéticas que las pueden hacer útiles en la espintrónica. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Nanociencia; Nanotecnología; Simulaciones computacionales; Teoría del funcional de la densidad.

Computational simulations to study the nanoworld

Abstract

Computational simulations are a very important tool for studying the nanoworld. In this article we review some research lines that we have developed using computational simulations based on the density functional theory (DFT), and we also present some recent results. In particular, we show how we can use the DFT to study chemical reactions in two-dimensional systems with possible applications in the new developing field of molecular electronics or moletronics, and the formation of manganese nitride nanostructures with magnetic properties that can make them useful in spintronics. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Nanoscience; Nanotechnology; Computer simulations; Density functional theory.

Introducción

Cuando pensamos en simulaciones computacionales, lo primero que se nos viene a la mente, son los videojuegos. Podemos simular y participar en un partido de fútbol con un equipo como Argentina en el programa FIFA 2016, o matar zombies en las diferentes versiones de Resident Evil. Sin embargo, también podemos usar programas computacionales para simular nuestro mundo real, desde las colisiones de las grandes galaxias, hasta las del pequeño e increíble nanomundo. En este trabajo, nos concentraremos en este último mundo, el cual todavía es desconocido para muchas personas.

Pero ¿qué es el nanomundo? Nano es un prefijo griego que significa enano. En ciencias se usa este prefijo para denotar la milmillonésima parte de algo. De esta manera, un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro, o sea un metro dividido en mil millones o para visualizarlo un poco más fácil, un milímetro dividido en un millón de veces.

Llamamos nanoestructuras a objetos que tengan por lo menos en una de sus dimensiones un tamaño entre uno y cien nanómetros (nm). Muchas veces se llama nanotecnología al uso de las nanoestructuras para aplicaciones prácticas,

aunque algunas veces se define como la habilidad que se tiene actualmente para controlar la materia átomo por átomo o molécula por molécula (Takeuchi, 2009). Ahora nos podemos preguntar, qué tienen de especial los tamaños de las nanoestructuras: 1 a 100 nm. Resulta que a esos tamaños tan pequeños, las propiedades de los materiales cambian con respecto a las propiedades del mismo material a tamaños macro o microscópicos. Un ejemplo muy usado es el del oro: a tamaños macroscópicos es un metal buen conductor de la electricidad, maleable y, muy importante, es dorado. Y eso sin importar su forma o tamaño, ya sea en forma de la balsa muisca del Museo del Oro, o una moneda acuñada por el Banco de la República. Sin embargo, a tamaños de los nanómetros las cosas cambian. En este caso la forma y el tamaño sí importan, una nanopartícula esférica de 100 nm puede ser amarilla, mientras una de 25 nanómetros es roja. Cambian también sus otras propiedades físicas

*Correspondencia:

Noboru Takeuchi, noborutakeuchi@gmail.com

Recibido: 17 de noviembre de 2016

Aceptado: 26 de enero de 2017

y químicas como la dureza, el punto de fusión, etc. Y son esas nuevas propiedades las que se usan en diferentes aplicaciones prácticas.

Las aplicaciones de la nanotecnología están en diferentes rangos de desarrollo. Hay algunas que ya están en el mercado, otras a nivel de prototipos y algunas en los laboratorios de investigación. Dentro de la gran variedad de aplicaciones de la nanotecnología, podemos mencionar por ejemplo aplicaciones en nuevos materiales: telas y fibras que no se mojan y no se manchan, materiales livianos y más resistentes utilizados, por ejemplo, para equipos deportivos como raquetas de tenis o bicicletas, materiales ultra duros para herramientas, celdas solares más eficientes como las que se usan en las naves espaciales, celdas solares, que aunque no sean tan eficientes son baratas y flexibles, en los materiales que conforman las celdas de hidrógeno, en computadoras y dispositivos electrónicos más poderosos y baratos. En las ciencias de la vida se piensa que la nanotecnología tendrá un impacto muy importante, ya se usa para encapsular medicamentos en nanopartículas para así reducir sus efectos secundarios, se habla de nuevos tratamientos contra el cáncer usando nanopartículas y radiación infrarroja para quemar los tumores, para prótesis más resistentes y nuevos materiales para tapar las caries, también para usar los virus como medio de transporte de medicamentos. Son tantas las posibles aplicaciones de la nanotecnología que se habla de una nueva revolución tecnológica en este siglo XXI (Takeuchi, 2009).

En este artículo presentaremos simulaciones computacionales usando la teoría del funcional de densidad (DFT, por sus siglas en inglés) de dos sistemas del nanomundo. El primero es el estudio de reacciones de moléculas orgánicas en superficies de materiales bidimensionales semiconductores. Esta clase de trabajo es muy importante puesto que la introducción de la química orgánica en los semiconductores puede traer nuevas aplicaciones. La habilidad de las moléculas orgánicas para adsorber y emitir luz a ciertas frecuencias, de detectar moléculas, o de reconocer muestras biológicas son ejemplos de algunas aplicaciones que se podrían extender a la tecnología del silicio (Buriak, 2002, Bent, 2002). El uso de dispositivos basados en monocapas de compuestos orgánicos, ya es usado en aplicaciones prácticas reales (Moller, et al., 2003). Aunque el mecanismo de cómo reaccionan estas moléculas con la superficie semiconductor es algo que todavía no se conocía en detalle, se ha visto que el tipo de crecimiento y la formación de monocapas completas puede ser controlado escogiendo cuidadosamente el sustrato.

El segundo estudio que presentaremos es la formación de nanopirámides magnéticas de Mn_3N_2 . Dichas pirámides han sido obtenidas experimentalmente por la técnica de epitaxia de haces moleculares y caracterizadas in-situ con microscopía de tunelamiento electrónico (Wang & Smith, 2012) Además, debido a que es un material antiferromagnético, el Mn_3N_2 podría ser utilizado en la fabricación de heteroestructuras semiconductoras-magnéticas.

Método

Una de las herramientas usadas en el estudio del nanomundo son las simulaciones computacionales (Rubio-Pereda & Takeuchi, 2016a). Según el *National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering*, una simulación computacional es el uso de las matemáticas, la física y la informática para estudiar el comportamiento de sistemas complejos mediante el uso de las computadoras.

En este trabajo nos concentraremos en simulaciones computacionales que tienen que ver con el nanomundo, o sea en la escala nanométrica. Usamos los llamados cálculos de primeros principios, los cuales no necesitan de ningún parámetro externo a excepción del número y masa atómica.

Esta clase de cálculos son posibles gracias al aumento en el poder de cómputo alcanzado en las últimas décadas (Figura 1) y al desarrollo de nuevos métodos. En particular, en la DFT, la variable básica es la densidad electrónica y no la función de onda, resultando en un esquema muy eficiente desde un punto de vista computacional (Hohenberg & Kohn, 1964; Kohn & Sham, 1965). La DFT reduce el problema de muchos cuerpos a la solución de un conjunto de ecuaciones del tipo de Schrödinger para una partícula. Es importante señalar que la DFT se fundamenta en los teoremas de Hohenberg y Kohn, los cuales establecen que: (1) las propiedades de un sistema de muchos electrones, en particular su energía total, es funcional de la densidad electrónica solamente, (2) la densidad de carga verdadera del estado base es la densidad que minimiza la energía total. Escribimos la energía total de nuestro sistema incorporando varios términos: uno para la energía cinética de los electrones, otro para la energía electrónica de Hartree, otro para la correlación e intercambio electrónico, y por último una parte que toma en cuenta la interacción de los electrones con los iones y la interacción entre iones. El término de correlación e intercambio se calcula usando alguna aproximación, generalmente la aproximación de densidad local o la de gradiente generalizado.

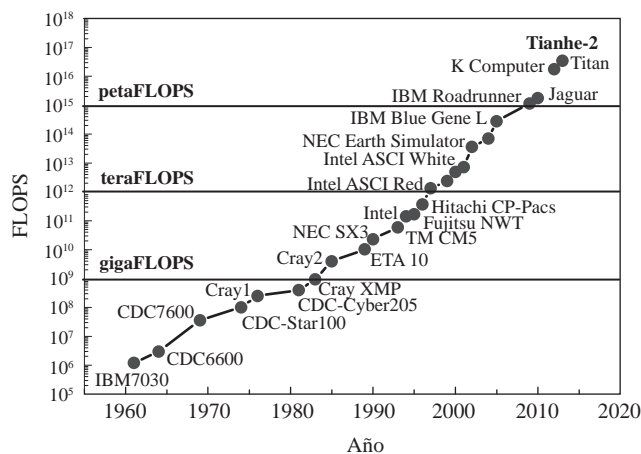


Figura 1. Evolución del poder de cómputo con el paso de los años

Resultados

A. Adsorción de moléculas orgánicas en superficies semiconductoras hidrogenadas. Experimentalmente se ha encontrado que cuando se deposita el estireno en la superficie hidrogenada (111) de silicio se tiene un crecimiento en dos dimensiones (Cicero, *et al.*, 2002), mientras que en la (001) el crecimiento es en una sola dirección, se forman líneas moleculares de estireno (Tong, *et al.*, 2004; Lopinsky, *et al.*, 2000). Usando cálculos de primeros principios, hemos estudiado anteriormente la adsorción de alquenos, alquinos y aldehídos en superficies hidrogenadas de silicio conocidas como H-Si [111] e H-Si [001], respectivamente, y germanio (111) conocida como H-Ge [111] (Takeuchi, *et al.*, 2004; Takeuchi & Selloni, 2005; Takeuchi, *et al.*, 2010; Kanai, *et al.*, 2005; Kanai & Takeuchi, 2009; Rubio-Pereda & Takeuchi, 2016b). En particular estudiamos el depósito del estireno en dichas superficies, comprobando los resultados experimentales. Teniendo en cuenta que localmente la superficie de silicio hidrogenada (111) es muy parecida a la del siliceno hidrogenado (llamado siliceno), podemos esperar un crecimiento similar al del silicio cuando se depositan moléculas orgánicas en siliceno (Rubio-Pereda & Takeuchi, 2013a y otros sistemas bidimensionales como el grafeno Rubio-Pereda & Takeuchi, 2013b y germaneno hidrogenado Rubio-Pereda & Takeuchi, 2015). En este artículo presentaremos resultados de la adsorción de estireno en la superficie hidrogenada de siliceno.

El siliceno puede presentar tres posibles configuraciones para una estructura bidimensional, la cual puede mostrarse como una red plana, no plana con bajo grado de deformación (LB por sus siglas en inglés, *Low Buckled*) y no plana con alto grado de deformación (HB por sus siglas en inglés, *High Buckled*), con desplazamientos verticales promedio entre átomos de silicio contiguos de 0 Å, 0.44 Å y 2.13 Å respectivamente.

Como se observa en la figura 2, la configuración del siliceno con una red plana, resulta energéticamente menos favorable que la del siliceno con una red con cierto grado de deformación (LB). Una vez que se hidrogena el siliceno, su parámetro de red se hace un poco más grande y sigue estando deformada.

Usando cálculos de primeros principios, como la DFT, hemos estudiado la adsorción del estireno sobre la superficie de siliceno. El mecanismo de la reacción es el siguiente: si existe una vacancia de hidrógeno (H) sobre una superficie hidrogenada de silicio (Si), por ejemplo, se forma un enlace flotante (*dangling bond*) que puede reaccionar fácilmente con una molécula incidente de un hidrocarburo no saturado. La molécula se une a la superficie por medio de un enlace Si-C resultando en un sistema con un radical (uno de los átomos de carbono (C) tiene un electrón no saturado). El radical es muy reactivo y sustrae un átomo de hidrógeno de un grupo Si-H vecino, resultando en una molécula estable además de la formación de un enlace flotante nuevo, donde otra molécula puede reaccionar, repitiéndose el proceso anterior, y produciendo lo que en la literatura se conoce como reacción en cadena.

Como en estudios anteriores hemos encontrado que la barrera de energía para que inicialmente se adhiera la molécula a la superficie es muy pequeña o no existente, en este caso sólo hemos considerado la substracción del átomo de H, que es el paso que limita la reacción. La trayectoria de mínima energía se puede ver en la figura 3, donde en los recuadros se pueden observar las estructuras atómicas de los estados intermedio, de transición y final.

En la figura 3 podemos observar que el estado intermedio es energéticamente más estable que el estado inicial en 0.84 eV, mientras que el estado final es 0.90 eV más estable. La barrera de abstracción del átomo de H es de 0.78 eV. Estos resultados son muy similares a los del estireno en H-Si [111]. Dado que se ha demostrado experimentalmente que las nanoestructuras de estireno pueden formarse sobre H-Si [111] mediante el mecanismo de reacción en cadena superficial iniciado en vacancias de hidrógeno, y que los valores calculados para los estados intermedios (EI) y finales

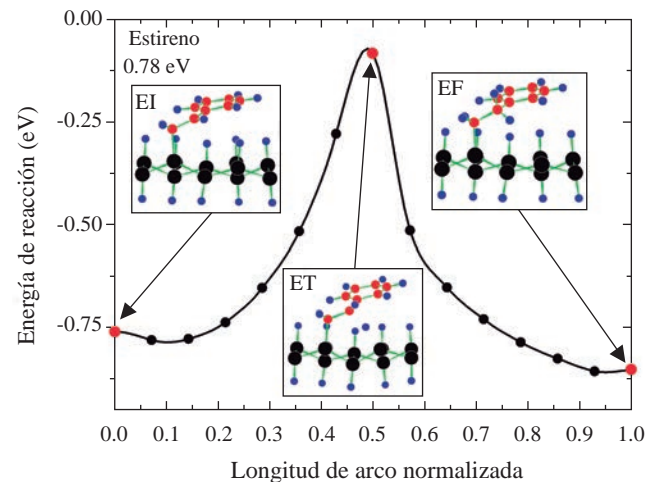


Figura 2. Energía total para el siliceno limpio e hidrogenado

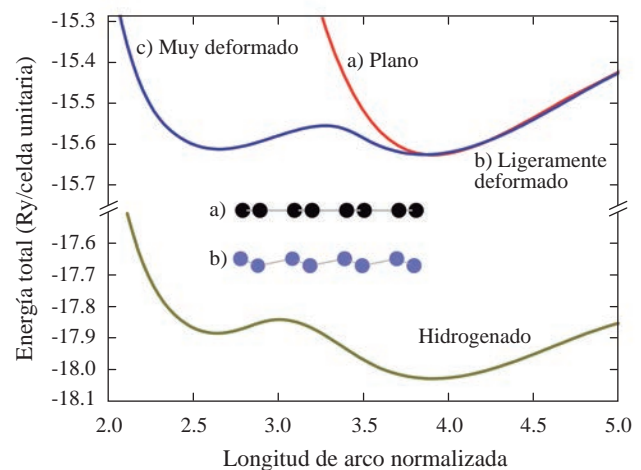


Figura 3. Trayectoria de mínima energía para la adsorción de estireno en siliceno hidrogenado

(EF) y la barrera de abstracción son similares, creemos que la funcionalización de siliceno hidrogenado con estireno también es posible mediante un mecanismo similar.

B. Formación de nanopirámides de nitruro de manganeso (Mn_3N_2) (001). Experimentalmente se encontraron pirámides con tres diferentes terrazas, las cuales están caracterizadas por diferentes contrastes electrónicos: $A > B > C$ como se observa en la figura 4 (Wang & Smith, 2012). Donde, A se propone como una superficie terminada en tetrámeros de manganeso (Mn) y los modelos B y C son superficies terminadas en nitruro de manganeso.

Desde el punto de vista teórico, partimos de la descripción del Mn_3N_2 en bulto, los parámetros optimizados son: $a=2.94 \text{ \AA}$ y $c=11.97 \text{ \AA}$. Este compuesto presenta un comportamiento antiferromagnético. Teniendo en cuenta la estructura del bulto, se obtienen tres modelos, los cuales son: A, superficie terminada en manganeso y los modelos B y C, terminados en MnN. Con estos modelos se pretendió describir las nanopirámides experimentales. Después de la relajación estructural se calculó la energía de formación superficial (Takeuchi & Ulloa, 2002; Takeuchi, 2002) en función del potencial químico del nitrógeno definida como (ver figura 5):

$$\Omega = \frac{1}{2A} \left[E^{\text{slab}} - \frac{1}{3} (n_{Mn} \mu_{Mn_3N_2}^{\text{bulto}}) - \frac{1}{3} (3n_N - 2n_{Mn}) \mu_N \right]$$

Con los límites permitidos para el crecimiento:

$$\frac{1}{2} \left[\mu_{Mn_3N_2}^{\text{bulto}} - \mu_{Mn}^{\text{bulto}} \right] < \mu_N < \frac{1}{2} \left[\mu_{Mn_3N_2}^{\text{bulto}} - \mu_{Mn}^{\text{bulto}} + \Delta H_f^{Mn_3N_2} \right]$$

Donde el límite inferior corresponde a condiciones pobres en nitrógeno (N) y el superior a condiciones ricas en N.

Se encontró que sólo los modelos B y C son estables, mientras que el modelo de tetrámeros y la superficie terminada en manganeso (Mn) no son estables termodinámicamente (Guerrero-Sanchez & Takeuchi, 2015). De tal manera que se propusieron una serie de modelos adicionales para encontrar el modelo más estable. Las estructuras tienen periodicidades 1×1 y 2×2 con diferente contenido de Mn y N en la superficie. Del análisis de energías de formación se encontró estable el modelo A_1 , el cual describe una superficie terminada en Mn pero con el nitrógeno de la segunda monocapa migrando hacia la superficie para producir una terminación en MnN. Con esto, para condiciones ricas en Mn se encontró estable el modelo A_1 , bajo condiciones intermedias de crecimiento el modelo estable es el C y en condiciones ricas en N el modelo favorable es el B [23].

Usando como base las estructuras estables encontradas con la energía de formación superficial, construimos un modelo para las nanopirámides de Mn_3N_2 , el cual se puede observar en la figura 6.

También, se obtuvieron simulaciones de imágenes de microscopía de tunelamiento de electrones (STM, por sus siglas en inglés) de los tres modelos estables. A partir de estas simulaciones se pudo observar que los contrastes electrónicos de estas superficies explican de buena forma los resultados experimentales. Los contrastes electrónicos obtenidos son: $B > C > A_1$, como se observa en la figura 7.

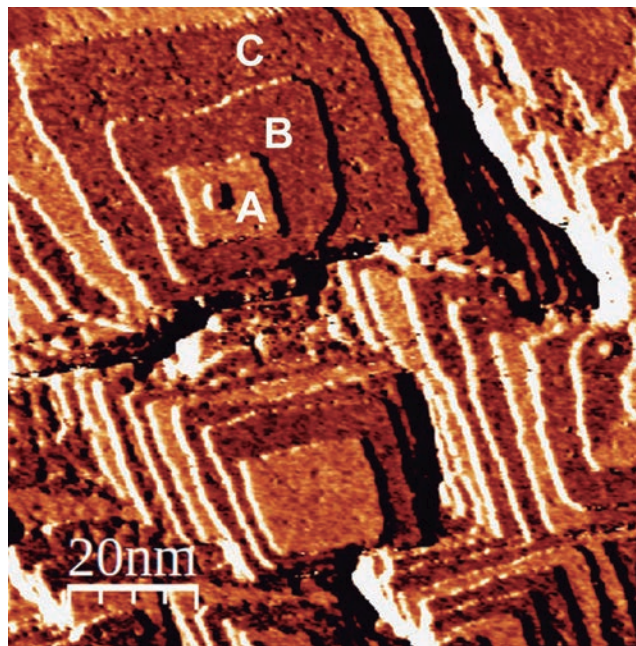


Figura 4. Nanopirámides de nitruro de manganeso. Imagen cortesía de A.-O. Mandru y A.R. Smith.

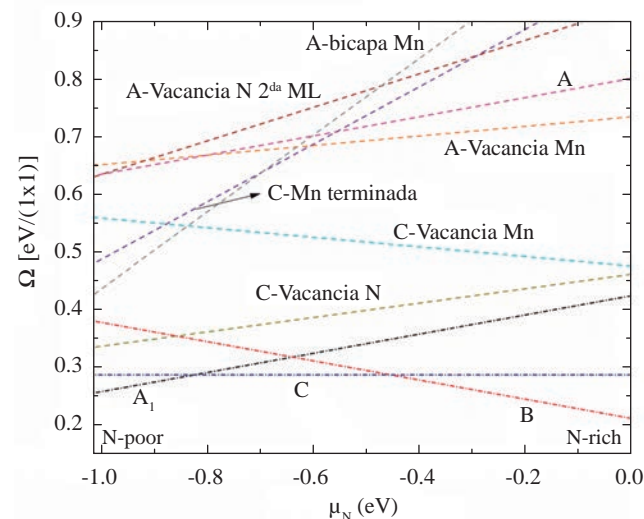


Figura 5. Energía de formación superficial en función del potencial químico del nitrógeno.

Conclusiones

Las simulaciones por computadoras son una manera para estudiar el nanomundo. En particular la Teoría del Funcional de Densidad es un método muy preciso que permite el estudio de diferentes sistemas. En este artículo hemos revisado particularmente el estudio de la formación de nanoestructuras y de la adsorción de moléculas orgánicas sobre superficies semiconductoras. Además, algunos de estos resultados han sido comparados con aquellos obtenidos a través de pruebas de laboratorio.

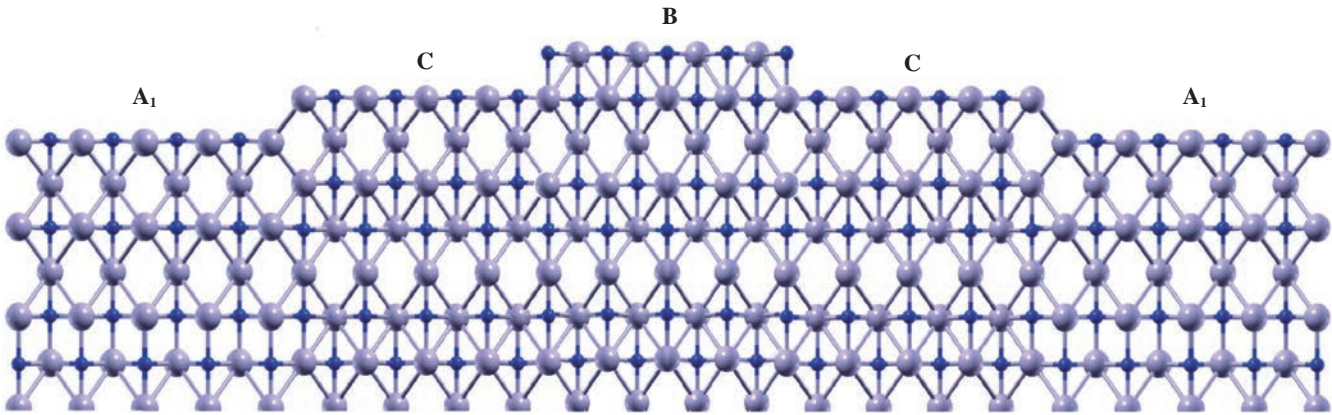


Figura 6. Modelo de las nanopirámides de nitruro de manganeso (Mn_3N_2)

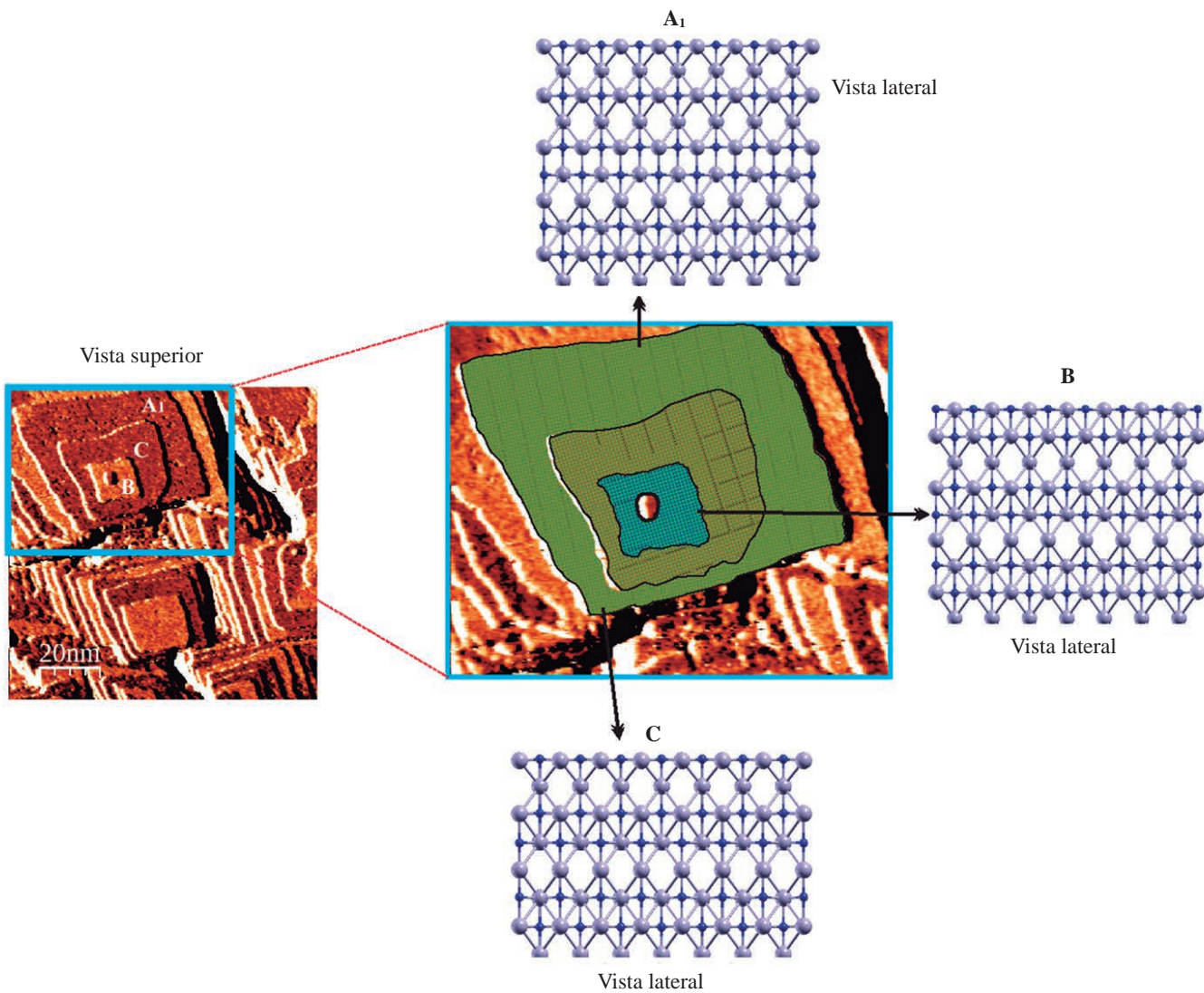


Figura 7. Imágenes simuladas de microscopía de tunelamiento de electrones (panel central) comparadas con imágenes experimentales. Se observa un buen acuerdo entre ambas.

Agradecimientos

A la DGAPA-UNAM, Proyecto IN100316 y a Conacyt, Proyecto 281052, por su apoyo financiero. Los cálculos se realizaron en el Centro de Supercómputo de la DGCTIC-UNAM con Proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-051.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

- Bent, S. F.** (2002). Organic functionalization of group IV semiconductor surfaces: principles, examples, applications, and prospects. *Surface Science*. **500** (1): 879-903.
- Buriak, J. M.** (2002). Organometallic chemistry on silicon and germanium surfaces. *Chemical reviews*. **102** (5): 1271-1308.
- Cicero, R. L., Chidsey, C. E., Lopinski, G. P., Wayner, D. D., & Wolkow, R. A.** (2002). Olefin additions on H-Si (111): Evidence for a surface chain reaction initiated at isolated dangling bonds. *Langmuir*. **18** (2): 305-307.
- Guerrero-Sánchez, J., Mandru, A.O., Wang, K., Takeuchi, N., Cicoletzi, G.H., Smith, A.R.** (2015). Structural, electronic and magnetic properties of $Mn_3N_2(001)$ surfaces, *Applied Surface Science*. **355**: 623-630.
- Hohenberg, P., & Kohn, W.** (1964). Inhomogeneous electron gas. *Physical review*. **136** (3B): B864.
- Kanai, Y. & Takeuchi, N.** (2009). Toward Accurate Reaction Energetics for Molecular Line Growth at Surface: Quantum Monte Carlo and Density Functional Theory Calculations. *Journal of Chemical Physics*. **131** (21): 214708.
- Kanai, Y., Takeuchi, N., Car, R., & Selloni, A.** (2005). Role of molecular conjugation in the surface radical reaction of aldehydes with H-Si (111): First principles study. *The Journal of Physical Chemistry B*. **109** (40): 18889-18894.
- Kohn, W., & Sham, L.J.** (1965). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*. **140** (4A): A1133.
- Lopinsky, G.P., Wayner, D.D.M., Wolkow, R.A.** (2000). Self-directed growth of molecular nanostructures on silicon. *Nature*. **406**: 48-51.
- Moller, S., Pelov, C., Jackson, W., Taussig, C., & Forrest, S.R.** (2003). A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory, *Nature*. **426**: 166-169.
- Rubio-Pereda, P., Takeuchi, N.** (2013a). Density functional theory study of the organic functionalization of hydrogenated silicene. *Journal of Chemical Physics*. **138** (19): 194702.
- Rubio-Pereda, P., Takeuchi, N.** (2013b). Density functional theory study of the organic functionalization of hydrogenated graphene. *Journal of Physical Chemistry C*. **177** (36): 18738-18745.
- Rubio-Pereda, P., Takeuchi, N.** (2015). Adsorption of Organic Molecules on the Hydrogenated Germanene: A DFT Study, *Journal of Physical Chemistry C*. **119** (50): 27995-28004.
- Rubio-Pereda, P., Takeuchi, N.** (2016a) Una mirada al nanomundo Con simulaciones computacionales de materiales, nanoestructuras y virus. México: Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 9786070279850.
- Rubio-Pereda, P., Takeuchi, N.** (2016b). Surface reactivity of Ge[111] for organic functionalization by means of a radical-initiated reaction: a DFT study. *Applied Surface Science*. **379**: 14-22.
- Takeuchi, N.** (2002a). First principles calculations of the ground state properties and stability of ScN. *Physical Review B*. **65** (4): 045204.
- Takeuchi, N.** (2002b). Surface properties of YN(001): A first-principles calculation. *Physical Review B*. **66** (5): 153405.
- Takeuchi, N.** (2009). Nanociencia y Nanotecnología: la construcción de un mejor mundo átomo por átomo. México: Fondo de Cultura Económica y Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 9786071601544.
- Takeuchi, N., & Selloni, A.** (2005). Density functional theory study of one-dimensional growth of styrene on the hydrogen-terminated Si (001)-(3×1) surface. *The Journal of Physical Chemistry B*. **109** (24): 11967-11972.
- Takeuchi, N., Kanai, Y. & Selloni, A.** (2004). Surface reaction of alkynes and alkenes with H-Si (111): A density functional theory study. *Journal of the American Chemical Society*, **126** (48): 15890-15896.
- Takeuchi, N., Kanai, Y. & Selloni, A.** (2010). Surface Radical Chain Reaction Revisited: Comparative Investigation of Styrene and 2, 4-Dimethyl-Styrene on Hydrogenated Si (001) Surface from Density Functional Theory Calculations. *The Journal of Physical Chemistry C*. **114** (9): 3981-3986.
- Tong, X., DiLabio G. A., Wolkow, R. A.** (2004). A Self-Directed Growth Process for Creating Covalently Bonded Molecular Assemblies on the H-Si(100)-3×1 Surface. *NanoLett.* **4** (5): 979-983.
- Wang, K., Smith, A.** (2012). Three-Dimensional Spin Mapping of Antiferromagnetic Nanopyramids Having Spatially Alternating Surface Anisotropy at Room Temperature. *Nanoletters*. **12** (11): 5443-5447.

Síntesis del superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ mediante sinterización por descarga luminiscente anormal

Erika Yazmin Soto-Gómez^{1,2,*}, Armando Sarmiento-Santos², Carlos Arturo Parra-Vargas³

¹ Grupo de Investigación en Ciencias Básicas Aplicación e Innovación (CIBAIN),
Fundación Universitaria Internacional del Trópico Americano, Yopal, Casanare, Colombia

² Grupo de Superficies Electroquímica y Corrosión (GSEC), Escuela de Física,
Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

³ Grupo de Física de Materiales (GFM), Escuela de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

Resumen

En este trabajo se reporta la síntesis del superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ mediante el método no convencional de sinterización por plasma en el rango de descarga luminiscente anormal (DLA). Las muestras se sometieron a diferentes temperaturas y tiempos de sinterización. Como referencia se usó una muestra superconductora obtenida por el método convencional (horno resistivo). La caracterización estructural de estas muestras se hizo por difracción de rayos X y refinamiento con el método de Rietveld. El comportamiento superconductor se determinó mediante el análisis de las curvas de magnetización en función de la temperatura según los procedimientos experimentales de enfriado en campo magnético cero (*zero field cooling*, ZFC) y enfriado con campo magnético aplicado (*field cooling*, FC). Las muestras sinterizadas por DLA presentaron características estructurales (ortorrómbica Pmmm) y superconductoras con una temperatura crítica de $T_c \sim 92$ K, similares a las obtenidas por el método convencional, pero con una significativa reducción en las temperaturas y tiempos, bajo un ambiente adecuado de presión en el proceso de sinterización. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Sinterización; Horno resistivo; Descarga luminiscente anormal; Superconductividad.

Synthesis of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor through abnormal glow discharge sintering

Abstract

In this study we synthesized the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor using the unconventional method of plasma sintering in the range of abnormal glow discharge (AGD). The samples were treated with different sintering temperatures and times. As reference we used a superconductor sample obtained by using the conventional method (resistive furnace). The structural characterization of these samples was performed by X-ray diffraction measurements and Rietveld refinements. Superconductivity behavior was determined by analyzing magnetization curves as a function of the temperature according to zero field cooling (ZFC) and field cooling (FC) experimental procedures. The samples sintered by AGD presented structural characteristics (orthorhombic Pmmm) and superconductivity with a critical temperature of $T_c \sim 92$ K, which were similar to those obtained by the conventional method, but with a significant reduction of temperature and time under proper pressure environment during the sintering process. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Sintering; Resistive furnace; Abnormal glow discharge; Superconductivity.

Introducción

El YBaCuO es un cerámico superconductor de alta temperatura crítica (92 K) (Baquero, R. 2014), con gran importancia por sus aplicaciones tecnológicas (Chiang, Dunbar & Kingey, 1997; Pathakand, & Mishra, 2005; Kovalev, & Ket, 2002; Zhang, Y., Postrekhin, Ma, & Chu, 2002; Tomita, Murakam, Nariki, & Sawa, 2002). El procedimiento convencional (Smith, 1998) en la preparación de estos materiales cerámicos consiste en mezclar los agentes químicos precursores en proporciones estequiométricas, descarboxilar, calcinar y sinterizar a altas temperaturas

(horno resistivo). Durante el proceso de sinterización se presenta transporte de materia térmicamente activada a escala atómica entre las partículas en contacto (German, 1996). Este proceso requiere de ciclos térmicos durante tiempos prolongados y por ende, gran consumo de energía. Por esta razón, investigaciones sobre la producción de este

*Correspondencia:

Erika Yazmin Soto-Gómez, erikasoto@unitropico.edu.co

Recibido: 02 de noviembre de 2016

Aceptado: 14 de febrero de 2017

tipo de material, buscan disminuir el tiempo de dichos ciclos utilizando métodos no-convencionales para la sinterización de materiales superconductores (Badica, *et al.*, 2011).

Dentro de las metodologías no-convencionales se encuentra el método de sinterización por plasma en el rango de descarga luminiscente anormal (DLA). Dicha DLA se genera en un medio gaseoso a baja presión entre dos electrodos, a los cuales se les aplica una alta diferencia de potencial (Pavanati, Maliska, Klein, & Muzart, 2005). Su estudio se abordó como un procedimiento novedoso para la sinterización de materiales como el hierro (Brunatto, Kühn, Klein & Muzart, 2003; Lourenço, Maliska, Klein, & Muzart, 2004; Pavanati, *et al.*, 2005), en donde se demostró la reducción en la porosidad de las muestras, disminuyendo tiempos de sinterización y gastos energéticos.

En un trabajo previo (Sarmiento, *et al.*, 2011) se evidenció la viabilidad de la sinterización vía DLA en muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Allí se mostró que para temperaturas de sinterización de 510 °C alcanzan una cristalización adecuada.

En este trabajo se reporta la producción de muestras superconductoras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, a diferentes temperaturas y tiempos de sinterización vía DLA. La caracterización estructural de las muestras cristalinas se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) y refinamiento empleando el método Rietveld. Las temperaturas críticas fueron determinadas a través del análisis de las curvas de magnetización en función de la temperatura de acuerdo con los procedimientos experimentales ZFC (enfriado en campo magnético cero) y FC (enfriado con campo magnético aplicado).

Materiales y métodos

La figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/428/1807>, presenta el detalle de la producción y medidas experimentales de las muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. En la producción de muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ se utilizaron óxidos precursores de Y_2O_3 (99,99%), BaCO_3 (99,995%) y CuO (99,9%), siendo secados y pesados de acuerdo a la estequiometría del sistema $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Smith, 1998). Estos precursores se mezclaron y maceraron por 3 horas, se descarboxilaron en polvo durante un tiempo de 34 horas hasta una temperatura máxima de 750 °C. Las muestras se maceraron durante 2 horas y empastillaron con una carga de 5 ton, posteriormente se calcinaron a una temperatura de 900 °C durante un tiempo de 50 horas con una tasa de calentamiento de 1.47 °C/min. Como referencia (MR) se produjo una muestra sinterizada por horno resistivo con tasa de calentamiento de 1.63 °C/min a una temperatura de 900 °C en una atmósfera de aire a presión ambiente (562.86 torr) durante 26 horas.

El proceso de sinterización vía DLA se realizó a temperaturas de 550 °C, 600 °C y 650 °C, durante tiempos de 30 min y 60 min, respectivamente. La medida de dichas temperaturas se realizó usando una termocupla. La DLA fue generada en una atmósfera de aire con un flujo de 50ml/min a 3 torr de presión.

La figura 2S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/428/1808>, presenta la imagen y diagrama de la cámara de DLA que se utilizó para realizar la sinterización de las muestras. En la tabla 1 se indican las temperaturas y tiempos de sinterización, el proceso térmico y la nomenclatura utilizada para cada muestra.

Con el objetivo de evaluar los efectos estructurales de la sinterización vía DLA con respecto a la muestra de referencia, por medio de DRX se obtuvieron los difractogramas para cada una de las muestras.

Posteriormente todas las muestras fueron llevadas al procedimiento de oxigenación en horno resistivo, a una temperatura de 880 °C, durante 30 h. Se continuó con la disminución gradual de la temperatura durante 24 h hasta los 600 °C. Finalmente, las muestras permanecieron a esta temperatura durante 8h en la misma atmósfera con flujo de oxígeno.

Después de los procesos de sinterización y oxigenación, las propiedades estructurales de las muestras fueron analizadas por DRX utilizando la geometría Bragg-Brentano, barriendo el ángulo 2θ entre 10° y 90°, con radiación de cobalto de una longitud de onda $\lambda_{\text{CoK}\alpha}=1.789 \text{ \AA}$. Los difractogramas obtenidos para cada muestra fueron analizados por el método de refinamiento Rietveld, empleando el código de sistemas generales para análisis estructurales (GSAS).

Por último, se realizaron las medidas de magnetización en función de la temperatura de acuerdo con los procedimientos experimentales ZFC (enfriado en campo magnético cero) y FC (enfriado con campo magnético aplicado), utilizando un magnetómetro tipo VERSALAB, con el objetivo de corroborar el comportamiento superconductor y determinar la temperatura de transición al estado superconductor (T_c) de cada muestra (Foner S., 1959; Chiang, Dunbar & Kingey, 1997).

Resultados y discusión

En la figura 1 se representan los difractogramas de las muestras después de ser sinterizadas vía DLA y su comparación con la muestra de referencia (horno resistivo). Aquí podemos observar, como comportamiento general, que

Tabla 1. Temperaturas (T_{sint}) y tiempos (t_{sint}) de sinterización vía descarga luminiscente anormal (DLA) y horno resistivo. La DLA se generó a 3 torr de presión.

Muestra	T_{sint} (°C)	t_{sint} (min)	Proceso térmico
M1	650	60	DLA
M2	650	30	DLA
M3	600	60	DLA
M4	600	30	DLA
M5	550	60	DLA
M6	550	30	DLA
MR	900	1.560	Horno resistivo

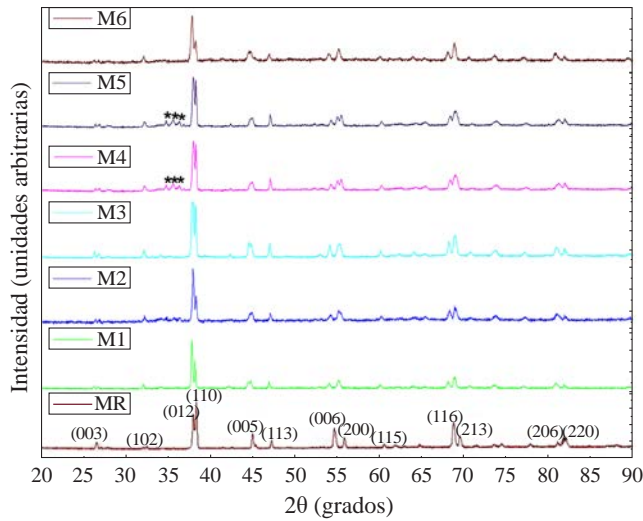


Figura 1. Difractogramas de muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sinterizadas vía descarga luminiscente anormal (DLA) y horno resistivo (MR).

para todas las temperaturas y tiempos de sinterización vía DLA, los difractogramas revelan un aceptable grado de cristalinidad con una estructura similar a la que presenta la muestra obtenida por el método convencional, revelando la característica de la estructura tetragonal con grupo espacial $P4/mmm$ del YBCO sin oxigenización, tal como se he reportado en la literatura (Roth, G., *et al.*, 1987). La característica principal entre los métodos, en este punto del tratamiento, se observa en las diferencias de intensidades y el ancho medio de algunos picos característicos. Sin embargo, las muestras M4 y M5, exhiben pequeños picos adicionales (marcados con asteriscos), los cuales corresponden a una fase minoritaria de BaCuO_2 (Eremin, Leonyuk, & Urusov, 2001).

Observando con mayor detalle (Figura 2), se evidencia que, en la mayoría de las muestras sinterizadas vía DLA muestran un crecimiento preferencial en el plano (012), a diferencia de la muestra de referencia (MR) que creció preferencialmente sobre el plano (110). Por otro lado, las muestras que revelan la fase BaCuO_2 , M4 y M5, crecen en similar proporción en los planos (012) y (110). Las muestras M1, M2, M3, M4 y M5 revelan la tendencia de un aumento progresivo en la intensidad del pico asociado al plano (110), hasta casi igualar la intensidad del plano (012). M6, que es la muestra tratada a la menor temperatura y tiempo de sinterización, no siguió dicha tendencia.

En este punto del proceso es importante resaltar, que el método de sinterización vía DLA alcanza características estructurales similares a la del método convencional (horno resistivo), con una muy importante disminución en las temperaturas y tiempos de tratamiento, bajo una condición de 3 torr de presión.

Después del proceso de oxigenación, el cual es necesario para que las muestras alcancen un óptimo comportamiento superconductor, todas las muestras fueron analizadas por

DRX con el fin de comparar la estructura cristalina de las muestras sinterizadas vía DLA con la de referencia. La figura 3 presenta los difractogramas de las muestras, después del proceso de oxigenación.

El difractograma de la muestra MR se comparó con el modelo ideal de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ reportado en la Crystallography Open Database y construido en PCW23, presentando las características de una estructura ortorrómbica ($Pmmm$)

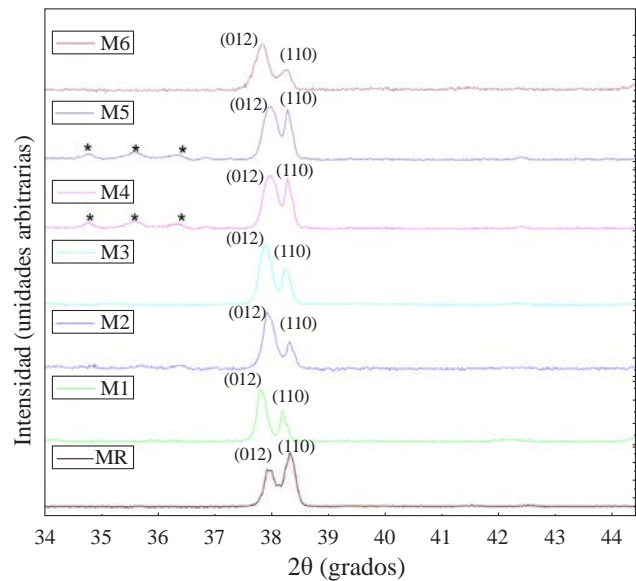


Figura 2. Ampliación de los picos asociados a los planos (012) y (110) de los difractogramas de muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sinterizadas vía descarga luminiscente anormal (DLA) y horno resistivo (MR).

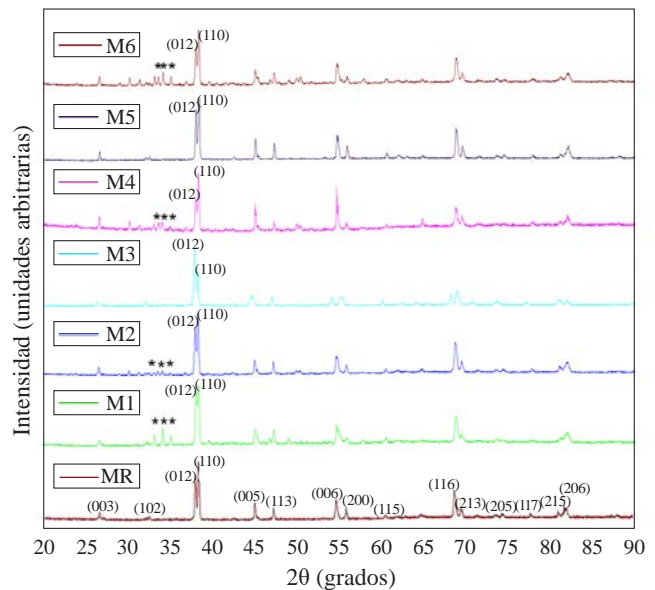


Figura 3. Difractogramas de muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sinterizadas vía descarga luminiscente anormal (DLA) y horno resistivo (MR) después del proceso de oxigenación.

propia del YBCUO después del proceso de oxigenación, corroborando que la muestra sinterizada en horno resistivo presenta la estructura esperada (Williams, *et al.*, 1988).

Los difractogramas de las muestras sinterizadas vía DLA y posteriormente oxigenadas (Figura 3) revelan un comportamiento similar al de la muestra obtenida por el método convencional, es decir YBCUO en una fase ortorrómbica (Pmmm), tal como se reporta en la literatura. Las muestras M1, M2, M4 y M6, revelan la presencia de una fase minoritaria de BaCuO₂ (marcados con asteriscos), la cual no se observa en las muestras M3 y M5. Los parámetros de red de las muestras, fueron obtenidos por el método de refinamiento Rietveld (Young, 1993) a través del software GSAS+EXPGUI (Larson, & Von Dreele, 2000; Toby, 2001) utilizando los patrones de DRX de la figura 3, estos parámetros se reportan en la tabla 2. Se puede observar que los parámetros de red no revelan diferencias importantes, menores al 2%, con respecto a la muestra de referencia. Estos parámetros de red presentan un buen acuerdo con los reportados en la literatura (Beno, *et al.*, 1987). En la tabla 2 se observa que los criterios de ajuste del refinamiento Rietveld, χ^2 y R, de las muestras M1, M2, M4 Y M6 resultan un poco elevados debido a que en el refinamiento no se tuvo en cuenta las impurezas debidas a la fase minoritaria de BaCuO₂.

En la figura 4 se presentan las curvas de magnetización en función de la temperatura de acuerdo con los procedimientos experimentales ZFC (enfriado en campo magnético cero) y FC (enfriado con campo magnético aplicado) para cada una de las muestras. Se comprobó, con este procedimiento, el comportamiento superconductor de todas las muestras y se determinó su respectiva temperatura crítica (T_c). Las T_c's calculadas se reportan en la tabla 2.

Se observa que las muestras sinterizadas vía DLA presentan temperaturas críticas que oscilan entre 90.39 K y 92.84 K, alrededor de los 92.17 K que presenta la muestra de referencia, es decir diferencias no mayores al 2%. Estos valores de T_c concuerdan con los reportados en la literatura para el YBCUO (Cyrot, & Pavuna, 1992).

Tabla 2. Parámetros de red de la estructura (Pmmm), criterios de ajuste del refinamiento Rietveld, χ^2 y R, y temperaturas críticas de las muestras oxigenadas de YBa₂Cu₃O_{7- δ} , sinterizadas vía descarga luminiscente anormal y horno resistivo (MR).

Muestra	a (Å)	b (Å)	c (Å)	χ^2	R	T _c (K)
M1	3,88(3)	3,83(7)	11,70(5)	4,68(0)	0,19(4)	92.64
M2	3,82(5)	3,88(4)	11,69(4)	3,34(6)	0,22(3)	92.82
M3	3,82(3)	3,88(8)	11,69(2)	1,26(6)	0,16(7)	92.09
M4	3,83(0)	3,88(8)	11,70(5)	2,12(5)	0,23(5)	90.39
M5	3,82(0)	3,88(6)	11,69(3)	1,95(9)	0,16(4)	92.84
M6	3,83(0)	3,89(0)	11,70(7)	6,04(7)	0,23(0)	92.52
MR	3,82(6)	3,89(2)	11,70(8)	1,14(4)	0,16(2)	92.17

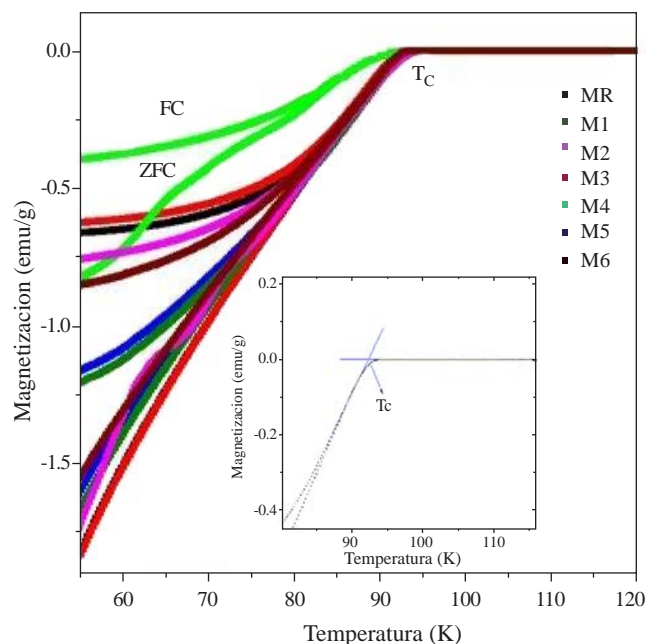


Figura 4. Magnetización en función de la temperatura de las muestras oxigenadas de YBa₂Cu₃O_{7- δ} sinterizadas vía descarga luminiscente anormal (DLA) y horno resistivo (MR).

De esta forma se comprueba que las muestras sinterizadas vía DLA a diferentes temperaturas y tiempos debidamente oxigenadas, presentan características estructurales y superconductoras similares a las obtenidas por el método convencional, con una significativa reducción en las temperaturas y tiempos, bajo un ambiente adecuado de presión, en el proceso de sinterización. La condición de presión está sujeta únicamente a la generación de DLA y no como una variable asociada del proceso de sinterización.

Conclusiones

En este trabajo se reporta la producción del superconductor de YBa₂Cu₃O_{7- δ} , usando el método no-convencional de sinterización por plasma en el rango de descarga luminiscente anormal (DLA). Las muestras fueron sinterizadas a temperaturas de 550 °C, 600 °C y 650 °C, durante tiempos de 30 min y 60 min, respectivamente. Como referencia se generó una muestra obtenida por el método convencional.

Las propiedades estructurales y superconductoras fueron determinadas por análisis de difracción de rayos X con refinamiento Rietveld y curvas de magnetización en función de la temperatura de acuerdo a los procedimientos experimentales ZFC (enfriado en campo magnético cero) y FC (enfriado con campo magnético aplicado), respectivamente. Todas las muestras presentaron características estructurales, ortorrómbicas con grupo espacial Pmmm, y superconductoras, T_c ~92 K, similares a las obtenidas por el método convencional, con una significativa reducción en las temperaturas y tiempos, bajo un ambiente adecuado de presión, en el proceso de sinterización.

Información suplementaria

Figura 1S. Detalle de la producción y medidas experimentales de las muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Vea la figura 1S en: <http://www.racecfyn.co/index.php/racecfyn/article/downloadSuppFile/428/1807>

Figura 2S. Imagen y diagrama esquemático de la cámara de DLA. Vea la figura 2S en: <http://www.racecfyn.co/index.php/racecfyn/article/downloadSuppFile/428/1808>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

- Badica, P., Crisan, A., Aldica, G., Endo, K., Borodianska, H., Togano, K., Awaji, S., Watanabe, K., Sakka, Y., & Vasyukiv, O.** (2011). 'Beautiful' unconventional synthesis and processing technologies of superconductors and some other materials. *Science And Technology Of Advanced Materials*. **12** 013001 (13pp).
- Baquero, R.** (2014). La Superconductividad: sus orígenes, sus teorías, sus problemas candentes hoy. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*. **38** (supl.): 18-33.
- Beno M. A., Beno, M. A., Soderholm, L., Capone II, D. W., Hinks, D. G., Jorgensen, J. D., Grace, J. D., Schuller, I.K., Segre, C. U., & Zhang K.** (1987). Structure of the single-phase high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. *Applied Physics Letters*. **51** (1): 57-59.
- Brunatto, S.F., Kühn, I., Klein, A.N., & Muzart, J.L.R.** (2003). Sintering iron using a hollow cathode discharge. *Materials Science and Engineering: A*. **343**: 163-169.
- Buschow K. H. J. y de Boer F.R.** (2004). *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*. (Kluwer Academic/Plenum Publisher). Chapter 9. Measurement Techniques. pp 85-89.
- Chiang, Y., Dunbar, P., & Kingey, W. D.** (1997). *Physical Ceramics*, (John Wiley & Sons). Chapter 1. Structure of Ceramics 1. pp 59-65.
- Cyrot, M., & Pavuna, D.** (1992). *Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials*, (World Scientific Publishing Co. Pvt. Ltd.). Estados Unidos.
- Eremin, N.N., Leonyuk, L.I., & Urusov, V.S.** (2001). Interatomic potentials for structure simulation of alkaline-earth cuprates. *Journal of Solid State Chemistry*. **158**: 162-168.
- Foner S.** (1959). Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. *The review of scientific instruments*. **30** (7): 548-557.
- German, R.M.** (1996). *Sintering theory and practice*. (John Wiley & Sons, Inc., N.Y.).
- Kovalev, & Ket.** (2002). High output power reluctance electric motors with bulk high-temperature superconductor elements. *Superconductor Science and Technology*. **15**: 817- 822.
- Larson, A.C., & Von Dreele, R.B.** (2000). *General structure analysis system (GSAS)*. Los Alamos National Laboratory Report LAUR. 86-748.
- Lourenço, J.M., Maliska, A.M., Klein, A.N., & Muzart, J.L.R.** (2004). Plasma Sintering of Unalloyed Iron: A Study of Surface Porosity. *Materials Research*. **7** (2): 269-275.
- Pathakand, L.C., & Mishra, S.K.** (2005). A review on the synthesis of Y-Ba-Cu-oxide powder. *Superconductor Science and Technology*. **18**: R67-R89.
- Pavanati, H.C., Maliska, A.M., Klein, A.N., & Muzart, J.L.R.** (2005). Sintering unalloyed iron in abnormal glow discharge with superficial chromium enrichment. *Materials Science and Engineering; A*. **392**: 313-319.
- Roth, G., Renker, B., Heger, G., Hervieu, M., Domenges, B., Raveau, B.** (1987). On the structure of non-superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$. *Zeitschrift fuer Physik, B* (1984). **69**: 53-59.
- Sarmiento Santos, A., Fuentes Guerrero, U., Roa Rojas, J., Martínez Buitrago, D., Vera López, E., & Parra Vargas, C.A.** (2011). Plasma Sintering of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconductor. *Journal Chem. Chem. Eng.* **5**: 1122.
- Smith, W.F.** (1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mc. Graw Hill (3rd. ed).
- Toby, B.H.** (2001). EXPGUI, a graphical user interface for GSAS. *Journal Appl. Crystallogr.* **34**: 210.
- Tomita, M., Murakami, M., Nariki S., & Sawa, K.** (2002). Mechanical persistent current switch made of resin-impregnated bulk superconductors. *Superconductor Science and Technology*. **15**: 846-849.
- Williams, A., Kwei, G.H., Von Dreele, R.B.A., Larson, C.I., Raistrick, D., & Bish, D.L.** (1988). Joint X-ray and neutron refinement of the structure of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: precision structure, anisotropic thermal parameters, strain and cation disorder. *Physical Review*, (Serie 3. B-Condensed Matter). **37** (13): 7960-7962.
- Young, R.A.** (1993). *The Rietveld Method*. Oxford University Press.
- Zhang, Y., Postrekhin, Y., Ma, K.B., & Chu W.K.** (2002). Reaction wheel with HTS bearings for mini-satellite attitude control *Superconductor Science and Technology*. **15**: 823-825.

Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá

Paulo César Pulido-López^{1,*}, Gabriel Antonio Pinilla-Agudelo²

¹ Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia

² Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

El Distrito Capital de Bogotá cuenta con 15 humedales reconocidos como parte del sistema de áreas protegidas de la ciudad, la mayoría de los cuales se encuentran seriamente afectados debido a la presión ejercida por el acelerado crecimiento urbano. A diferencia de los otros sistemas del mismo tipo, el humedal El Salitre, recientemente declarado como Parque Ecológico Distrital de Humedal, no se ha visto afectado por vertimientos de aguas residuales. En este estudio se determinó el estado trófico de dicho humedal a partir de la concentración de nutrientes y clorofila a fitoplanctónica, el cálculo de los índices del estado trófico y la composición taxonómica del fitoplancton. El nutriente limitante fue el nitrógeno. Las bajas concentraciones de compuestos nitrogenados, los índices fitoplanctónicos y la dominancia de desmicias (*Conjugatophyceae*), indicaron que el humedal El Salitre presentó condiciones de oligotrofia a mesotrofia en los dos periodos climáticos durante los cuales se estudió. Los resultados sugieren que este humedal podría servir como sistema de referencia para los demás humedales de Bogotá. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Nutrientes; Clorofila a; Fitoplancton; Sistema palustre; Índices de estado trófico; Humedal conservado.

Evaluation of the trophic state of El Salitre, the last urban reference wetland of Bogotá

Abstract

The Capital District of Bogotá has 15 wetlands recognized within the system of protected areas of the city, most of which are seriously affected due to the pressure exerted by the rapid urban growth. Unlike other systems of the same type, El Salitre wetland, recently declared as a Wetland District Ecological Park, has not been affected by wastewater discharges. In this study, we determined its trophic state based on the concentrations of nutrients and phytoplanktonic chlorophyll a, trophic state indices calculation and the taxonomic composition of phytoplankton. Nitrogen was the limiting nutrient. Low concentrations of nitrogen compounds, phytoplankton indices, and dominance of desmids (*Conjugatophyceae*) indicated that El Salitre wetland presented an oligotrophic to mesotrophic condition in the two climatic periods during which it was studied. These results suggest that it could serve as reference system for other wetlands in Bogotá. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Nutrients; Chlorophyll a; Phytoplankton; Palustrine system; Trophic state index; Preserved wetland.

Introducción

El humedal El Salitre hace parte de la estructura ecológica principal de la ciudad de Bogotá, pero aún no se tiene información sobre sus características limnológicas, ni cuenta con un Plan de Manejo Ambiental aprobado. Este ecosistema es distinto a la mayoría de humedales de la ciudad, debido a que no presenta vertimientos de aguas residuales y solo es alimentado por aguas lluvias y de escorrentía (EAAB, 2011). En consecuencia, El Salitre tiene condiciones particulares que podrían ser similares a las de los ecosistemas palustres presentes en la Sabana de Bogotá antes del impacto generado por el rápido desarrollo de la ciudad. El extenso sistema de humedales que existió en el pasado reciente (50 mil hectáreas a principios del siglo XX) se ha reducido drásticamente

y en la actualidad solo permanecen entre 800 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2000) y 1500 hectáreas (Moreno, García & Villalba, 2005), es decir, que solo se conserva un 2 a 3% de estos ecosistemas estratégicos. Es por tanto de suma importancia contar con un sistema que sirva como ambiente de referencia en futuros planes de seguimiento y restauración de humedales de la ciudad de Bogotá. En este sentido, un ecosistema de referencia sirve como modelo para restaurar otros ecosistemas, lo cual implica que el sitio de referencia tiene procesos ecológicos mejor conservados,

*Correspondencia:

Paulo Pulido-López, pauloc.pulidol@utadeo.edu.co

Recibido: 19 de septiembre de 2016

Aceptado: 20 de febrero de 2017

mayor funcionalidad, estructura más compleja y mayor diversidad que el sistema a restaurar (SER, 2004). Desde una perspectiva urbana, el sistema de referencia puede ser una porción menos perturbada de una matriz más alterada.

Un aspecto limnológico importante en el estudio de los ecosistemas acuáticos es el estado trófico, el cual se relaciona con las características fisicoquímicas del agua, principalmente con la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y con la abundancia y composición de las comunidades planctónicas. De éstas, el fitoplancton permite conocer las condiciones del momento, pues responde rápidamente a diversos cambios en las características abióticas de la columna de agua. Esto se debe al pequeño tamaño de las microalgas y a sus ciclos de vida cortos, que las hacen altamente susceptibles a las variaciones físicas y químicas del agua (Ramírez, 2000; Vásquez, Ariza & Pinilla, 2006).

Se han realizado estudios sobre el estado trófico de varios humedales de la Sabana de Bogotá (Vásquez, *et al.*, 2006; Malagón, 2008; Pinilla, 2010; López, 2012; Rodríguez, 2012; Beltran & Rangel, 2013; Rivera-Usme, Pinilla-Agudelo & Rangel-Ch, 2013), pero en ninguno se incluye el humedal El Salitre. En el presente documento, se describe el estado trófico del humedal El Salitre en dos periodos hidroclimáticos contrastantes, con base en cuatro criterios específicos: la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo), la concentración de clorofila *a* fitoplanctónica, la composición del fitoplancton y el cálculo de índices propuestos para ecosistemas lénticos. La hipótesis propuesta, dadas las características de limitada intervención antrópica que presenta este ecosistema, fue que sus aguas tienden hacia un menor contenido de nutrientes, condición que se reflejará en una comunidad fitoplanctónica propia de aguas oligo a mesotróficas.

Materiales y Métodos

Área de estudio. El humedal El Salitre está ubicado en la localidad de Barrios Unidos (Bogotá D.C., Colombia), dentro del Parque Recreio deportivo El Salitre (4°40'6"N 74°5'17"W). Es un humedal artificial (DAMA, 2002) que se encuentra a 2600 msnm, tiene una extensión de 6,4 hectáreas y su zona inundable es de 13208,85 m². La profundidad media es menor a 1,5 m. La temperatura promedio anual es de 14,2 °C, con fluctuaciones entre 9 y 22 °C y la precipitación total es de 900 a 1000 mm al año (Alcaldía Local de Barrios Unidos, 2014). El régimen de lluvias, común para toda la Sabana de Bogotá, es bimodal, con dos periodos de máxima precipitación (marzo-mayo y octubre-noviembre) y dos periodos secos (enero-febrero y julio-agosto) (López, 2012).

Los sitios de colección se ubicaron y georreferenciaron en un pre muestreo realizado en noviembre de 2013. Las muestras se tomaron en tres puntos del humedal en febrero (baja precipitación) y mayo (alta precipitación) de 2014. En el costado norte del humedal se ubicó el punto uno (4°40'5,8"N 74°5'7,9"W). Este sector se encontró en un

avanzado proceso de terrificación, con poca profundidad, abundante pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y gran cantidad de macrófitas sumergidas y flotantes, principalmente *Utricularia* spp. y *Marsilea* spp., respectivamente. En el sector medio del humedal se ubicó el punto dos (4°40'4,2"N 74°5'17,3"W), el cual tuvo predominio de aguas libres, presencia de algunas macrófitas sumergidas (principalmente *Utricularia* spp.) y mayor profundidad. En el costado sur del humedal se ubicó el punto tres (4°40'00,4"N 74°5'18,0"W), en el que también prevalecieron las aguas libres con macrófitas sumergidas (*Utricularia* spp.) y una profundidad similar a la del punto dos; el litoral de este sitio estuvo rodeado por juncos (*Juncus effusus*).

Parámetros fisicoquímicos. La temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, el porcentaje de saturación de oxígeno y la profundidad del sistema se midieron *in situ* con equipos portátiles (HACH) siguiendo los protocolos indicados en APHA, AWWA & WPCF (2012). La transparencia del agua se estableció con un disco Secchi. En cada punto se tomaron además dos muestras de agua con una botella Alpha horizontal de 2 L a 15 cm de profundidad, las cuales se preservaron y se refrigeraron a 4 °C hasta su traslado a un laboratorio acreditado por el IDEAM, en donde se analizaron los nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fosfatos) empleando métodos estándar (APHA, *et al.*, 2012).

Concentración de clorofila *a* fitoplanctónica. Para este análisis cada muestra se tomó por triplicado con una botella Alpha horizontal de 2 L a 15 cm de profundidad y se guardaron en frascos de vidrio color ámbar de 1 L, refrigerándolas a 4 °C en oscuridad hasta su traslado al laboratorio. La metodología y los cálculos para estimar la concentración de clorofila *a* del fitoplancton siguieron los procedimientos espectrofotométricos indicados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (2005).

Estudio del fitoplancton. Para recolectar las muestras de fitoplancton se siguieron las metodologías propuestas por Wetzel & Likens (2000), Ramírez (2000) y Roldán & Ramírez (2008). Las muestras para el análisis cualitativo se obtuvieron por filtración de 30 L de agua de los primeros 30 cm a través de una red de fitoplancton de 20 µm de criba. Se concentraron 250 mL de cada muestra, los cuales se fijaron con un volumen igual de solución Transeau (formol 40 %, etanol 90 %, agua destilada en proporciones 1:3:6 en volumen) en frascos de vidrio de 500 mL. Para este análisis, cada muestra se tomó por duplicado. La observación del fitoplancton se realizó en un microscopio óptico marca Nikon Eclipse 50i. Para la identificación se emplearon claves taxonómicas especializadas como las de Prescott, Croasdale & Vinyard (1972, 1975, 1977), Prescott, Croasdale, Vinyard & Bicudo (1981), Prescott, Bicudo & Vinyard (1982), Parra, González, Dellarossa, Rivera & Orellana (1982), Tell & Conforti (1986), Wehr, Sheath & Kocielek (2003), Bicudo & Meneses (2006) y Bellinger & Sigeo (2010), entre otras. El sistema de clasificación se basó en Guiry & Guiry (2015).

Las muestras para el análisis cuantitativo se tomaron por triplicado con una botella Alpha horizontal de 2 L a 15 cm de profundidad. Previa homogenización, se guardaron 400 mL de muestra en frascos de vidrio de color ámbar y se fijaron con solución de Lugol (0,5 mL por cada 100 mL de muestra). La cuantificación se realizó con el método de sedimentación y observación al microscopio invertido (Karlson, Cusack & Bresnan, 2010), utilizando cámaras tipo Utermöhl de 10 mL. El periodo de sedimentación fue de 24 h y la observación se hizo en un microscopio invertido marca Advanced Optical en 400 X, realizando un conteo parcial mediante el método de campos aleatorios, hasta llegar a un mínimo de 400 individuos de la especie más frecuente, lo cual permite tener un límite de confiabilidad de 0,95 (Wetzel & Likens, 2000). Al llegar a 400 individuos se realizó el barrido de toda la placa para registrar las morfoespecies que no habían sido observadas. Para esta investigación, se consideró cada individuo algal como una unidad (unicelular, colonial o filamentosa). Los valores se reportan en individuos por mL, para lo cual se empleó la fórmula indicada en APHA, et al. (2012).

Análisis de datos. Se realizó un análisis estadístico descriptivo de cada una de las variables físicas, químicas y biológicas a partir de los promedios de las réplicas obtenidas en campo y observadas en laboratorio. La determinación del estado trófico se hizo con el promedio de los datos de los tres puntos de muestreo, para cada época climática. Se calcularon los índices de Nygaard para el fitoplancton (Ramírez, 2000; Bellinger & Sigee, 2010), el índice trófico plantónico de Barbe (ITP) (De la Fuente, 2004) y el índice de estado trófico ponderado de Carlson (IET) (Ramírez, 2000). Los cálculos se realizaron en la hoja de cálculo Excel de Microsoft.

Resultados

Concentración de nutrientes y de clorofila a fitoplanctónica.

En la tabla 1 se muestran las concentraciones de los compuestos nitrogenados, los ortofosfatos y la clorofila *a*, y se indica su relación con el estado trófico que presentó el humedal El Salitre durante cada periodo climático, en cada punto de muestreo. Se utilizaron como valores de referencia los indicados por la OCDE (1982) para nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), por Dabrowski (2014) para ortofosfatos (PO_4^{3-}), y por Esteves (1998) para clorofila *a* (Chl *a*). Se debe tener en cuenta que estos datos de referencia están dados para ecosistemas lénticos de zonas templadas.

Como se observa, las concentraciones de compuestos nitrogenados indican una condición de oligotrofia a mesotrofia en ambos periodos climáticos, mientras que las concentraciones de clorofila *a* y de ortofosfatos señalan ambientes eutróficos en los tres puntos de muestreo, en las dos épocas climáticas. Según las cantidades de nitrógeno amoniacal, el estado oligotrófico de la época seca pasó a mesotrófico en el periodo de lluvias, mientras que, con base en los nitritos y los nitratos, el humedal mantuvo su condición oligotrófica en los dos periodos climáticos.

Índices de estado trófico. La tabla 2 presenta el estado trófico que tuvo el humedal El Salitre en los dos periodos climáticos, con base en los índices de Nygaard, de Barbe y de Carlson. Para el cálculo de éste último índice se emplearon los valores de transparencia Secchi ($0,38 \pm 0,06$ y $0,49 \pm 0,09$) obtenidos en las épocas seca y de lluvias, respectivamente. El índice de diatomeas no se pudo calcular, debido a que no se registraron especies de bacilariofíceas centrales. Los índices cianofíceo, euglenofíceo y compuesto de Nygaard

Tabla 1. Estado trófico del humedal El Salitre en los tres puntos de muestreo según la concentración de nutrientes y de clorofila *a*.

Sitio	Estado Trófico basado en el amonio		Estado Trófico basado en el nitrito		Estado Trófico basado en el nitrato		Estado Trófico basado en el fosfato		Estado Trófico basado en la clorofila	
	[NH_4^+]	Categoría	[NO_2^-]	Categoría	[NO_3^-]	Categoría	[PO_4^{3-}]	Categoría	[Chl <i>a</i>]	Categoría
S_1	0,025	O	0,024	O	0,05	O	0,045	E	54,32	E
S_2	0,025	O	0,014	O	0,05	O	0,045	E	29,98	E
S_3	0,025	O	0,011	O	0,05	O	0,045	E	31,61	E
Promedio S	0,025±0*	O	0,0163±0,006*	O	0,05±0*	O	0,045±0*	E	38,64±13,6*	E
L_1	0,46	M	0,0035	O	0,05	O	0,13	E	65,28	E
L_2	0,45	M	0,0035	O	0,05	O	0,19	E	19,86	E
L_3	0,45	M	0,0035	O	0,05	O	0,26	E	50,51	E
Promedio L	0,453±0,005*	M	0,0035±0*	O	0,05±0*	O	0,193±0,065*	E	45,21±23,1*	E

S= época seca, L= época lluviosa, 1, 2, 3= puntos de muestreo

O= oligotrófico, M= mesotrófico, E= eutrófico

La clasificación se basa en los valores de referencia de OCDE (1982) para nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), de Dabrowski (2014) para ortofosfatos (PO_4^{3-}) y de Esteves (1998) para clorofila *a* (Chl *a*). Las concentraciones de los nutrientes se registran en mg L^{-1} y la de clorofila *a* en mg m^{-3}

*Desviación estándar de cada variable en cada época de muestreo

tienen en cuenta la relación entre los taxones de microalgas presentes en el fitoplancton. Según los dos primeros índices, se encontró una condición de oligotrofia en ambos periodos climáticos, mientras que con el índice compuesto la condición hallada fue de mesotrofia. Así mismo, los resultados del índice trófico planctónico de Barbe (ITP) indicaron un estado de mesotrofia en la época seca y otro de oligotrofia en el periodo de lluvias. El índice de estado trófico ponderado de Carlson (IET) señaló condiciones de mesotrofia en la época seca y de eutrofia en la temporada lluviosa.

La relación N: P se calculó en función de las formas iónicas disueltas en el agua y no con base en las concentraciones totales, en concordancia con lo sugerido por Sierra (2011). Cuando esta relación es mayor a 9, se considera que el fósforo soluble limita el desarrollo de los organismos en el ecosistema acuático (Ramírez & Viña, 1998). La relación N: P fue menor a 9 en las dos épocas climáticas, lo cual sugiere

Tabla 2. Estado trófico del humedal El Salitre en las dos épocas climáticas según diferentes índices

Índice	Época seca	Estado trófico	Época lluviosa	Estado trófico
Cianofíceo	0,24	Oligotrófico	0,23	Oligotrófico
Euglenofíceo	0,32	Oligotrófico	0,35	Oligotrófico
Compuesto	1,48	Mesotrófico	1,43	Mesotrófico
ITP	37,00	Mesotrófico	7,00	Oligotrófico
IET ponderado	53,82	Mesotrófico	68,06	Eutrófico
N:P	2,42	No aplica	5,80	No aplica

Los tres primeros corresponden a los índices de Nygaard
ITP= índice trófico planctónico de Barbe, IET= índice ponderado de estado trófico de Carlson, N:P= relación nitrógeno: fósforo

que en el humedal El Salitre el nitrógeno fue limitante para el crecimiento del fitoplancton. Estos resultados evidencian una deficiencia de nitrógeno, particularmente en la época seca y coinciden con lo reportado para lagos tropicales por Lewis (2002). Los promedios de otras variables físicas y químicas de El Salitre y de otros humedales urbanos de Bogotá se presentan en la tabla 3.

Composición y abundancia del fitoplancton. Durante el estudio se identificaron 114 morfoespecies de algas, pertenecientes a 53 géneros, 33 familias, 24 órdenes y 9 clases. La mayor riqueza se presentó en las clases Conjugatophyceae (=Zignematophyceae, 28%) y Chlorophyceae (27%), seguidas por las clases Bacillariophyceae (15%) y Euglenophyceae (11%). Las cinco clases restantes presentaron pocos taxones (18%). Las clases con mayor abundancia de individuos fueron Conjugatophyceae (=Zignematophyceae) y Chlorophyceae; las menos abundantes fueron Xanthophyceae y Chrysophyceae (Tabla 4). La clase Conjugatophyceae alcanzó los mayores promedios de abundancia con 2757 ind mL⁻¹ (43%) en la temporada seca y 11209 ind mL⁻¹ (78%) en la época lluviosa. Para todo el humedal, las especies más representativas fueron la desmidia *Heimansia pusilla* (5745 inds mL⁻¹ en promedio), la euglenofícea *Trachelomonas volvocinopsis* (764 ind mL⁻¹) y la clorofícea *Monoraphidium* aff. *circinale* (750 ind mL⁻¹). En el sitio uno, donde la profundidad fue menor y pH fue un poco más alto, abundaron *Lepocinclis* spp., *Staurastrum* spp. y *Closterium kuetzingii*. En el punto dos, con una mayor transparencia del agua, fueron importantes *Scenedesmus* spp., *Strombomonas* spp. y *Eunotia* spp. Los taxones *Stauroneis* spp, *Cosmarium* spp. y *Desmodesmus* spp. tuvieron mayor representación en el punto tres, donde la saturación de oxígeno fue menor.

Tabla 3. Parámetros físicos y químicos del humedal El Salitre y de otros humedales urbanos de Bogotá muestreados en periodos climáticos similares

Variable	El Salitre		Tibanica		Jaboque		Juan Amarillo		Santa María del Lago		Guaymaral		Meridor	
	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L
pH (unidades)	6,99	6,71	6,8	7,04	8,82	9,33	7,06	7,42	7,3	7,28	7,3	7,43	7,74	7,63
Temperatura (°C)	17,4	18,8	19,1	18,7	22,5	17,4	16,5	19,3	21,3	18,7	15,7	17,0	20,1	19,3
Conductividad (µS cm ⁻¹)	98,6	98,8	1840	804	168	173	585	648	294	241	485	395	1339	1351
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	6,2	6,6	1,05	2,04	8,57	7,94	1,3	2,43	1,94	6,88	3,19	1,23	3,5	7,21
Alcalinidad (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	55,3	48,6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Acidez total (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	10,6	16,0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Dureza total (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	56,0	83,3	179	137	62	54	136	105	120	100	176	84	262	394
DBO ₅ (mg L ⁻¹ O ₂)	9,7	11,0	8	9	16	19	25	147	10	7	20	198	8	48
NO ₂ (mg L ⁻¹)	0,016	0,004	0	0,001	0,3	0,006	7	0,008	1	0,002	0	0,004	0	0,103
NO ₃ (mg L ⁻¹)	0,05	0,05	0	0,03	0,3	0,18	0,3	0	0	0,03	0	0,04	0,2	1,33
NH ₄ (mg L ⁻¹)	0,025	0,453	0,6	1,62	0,6	1,39	14	33,84	0,7	0,48	1	0,36	0	3,4
PO ₄ (mg L ⁻¹)	0,045	0,193	1,4	0,71	0,5	0,34	9,9	0,77	0	0,21	0,3	1,45	0,2	0,1

S= época seca, L= época lluviosa
Datos de los humedales Tibanica, Jaboque, Juan Amarillo, Santa María del Lago, Guaymaral y Meridor tomados de Castro & Pinilla (2014)

Tabla 4. Abundancia promedio relativa (%) de las clases de algas planctónicas encontradas en el humedal El Salitre en los dos periodos climáticos

Clase	Época seca	Época lluviosa
Cyanophyceae	3,7	1,8
Chrysophyceae	0,1	0,1
Xanthophyceae	0,0	0,1
Bacillariophyceae	9,6	6,5
Cryptophyceae	2,6	2,1
Dinophyceae	1,8	0,8
Euglenophyceae	14,1	2,2
Chlorophyceae	24,8	7,7
Conjugatophyceae	43,3	78,6
Total	100,0	100,0

Discusión

Para definir el estado trófico del humedal El Salitre se tuvieron en cuenta cuatro métodos de análisis. El primero consistió en determinar las características fisicoquímicas del agua, particularmente las concentraciones de nutrientes y el segundo se basó en la medición de la concentración de clorofila *a* fitoplanctónica. En los dos casos, el estado trófico se estableció mediante comparación con escalas definidas en la literatura para cada parámetro. El tercer método se fundamentó en el cálculo de índices basados en distintos parámetros. La cuarta estrategia consistió en relacionar la composición del fitoplancton con el estado trófico del humedal.

La alcalinidad registrada en el humedal El Salitre en ambos periodos climáticos (Tabla 3) indica una baja reserva alcalina y una reducida capacidad buffer del sistema. Esto implica que la adición o extracción de CO₂ por procesos respiratorios o fotosintéticos, respectivamente, puede generar variaciones importantes en el pH (Roldán & Ramírez, 2008). Por otro lado, teniendo en cuenta que el pH fue cercano a 7,0 se puede deducir que la alcalinidad total estuvo representada fundamentalmente por bicarbonatos (Esteves, 1998; Romero, 2009). La baja acidez registrada en las dos épocas podría indicar una alta actividad fotosintética por parte no solo del fitoplancton, sino también de las macrófitas sumergidas, dado que en el proceso de fotosíntesis el CO₂ se utiliza como fuente de carbono (Romero, 2009), lo que reduce la formación de ácido carbónico en el agua. De esta manera, y de acuerdo con el pH registrado en ambos periodos climáticos, la reducida acidez se debería a la escasa presencia de CO₂ disuelto (Romero, 2009).

Según la dureza total, las aguas del humedal El Salitre se clasifican como blandas a moderadamente duras (Romero, 2009), lo cual se relaciona también con la baja alcalinidad medida (Sierra, 2011). De acuerdo con Roldán & Ramírez (2008), las aguas con baja dureza son poco productivas a nivel biológico. Sin embargo, los resultados de biomasa de clorofila fitoplanctónica muestran que El Salitre tiene una

productividad algal importante. Se observó que, al aumentar los valores de dureza en la época de lluvias, también se incrementó la biomasa de clorofila *a* en este periodo. En relación con otros humedales, la dureza total de El Salitre fue baja, con excepción del humedal Jaboque, donde se han registrado valores similares (Tabla 3).

La conductividad eléctrica fue baja en comparación con la reportada para otros humedales de la ciudad (Tabla 3), lo cual indica un nivel de mineralización relativamente bajo y menor presencia de iones disueltos en el agua. Parámetros como el oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación de este gas, que es fundamental para el desarrollo de los organismos y para la degradación de la materia orgánica, tuvieron en ambos periodos climáticos valores superiores a los 6 mg L⁻¹ y saturaciones cercanas al 100%. Esta elevada oxigenación del sistema puede deberse en buena parte al proceso de fotosíntesis que realizan tanto las algas fitoplanctónicas como las macrófitas sumergidas (García & Cruz, 2013). El mantener estos altos niveles de oxígeno en el agua favorece notablemente el desarrollo de las comunidades acuáticas. Como se observa en la tabla 3, las medidas de oxígeno de El Salitre fueron altas en relación con las de otros humedales de Bogotá (<5,5 mg L⁻¹), excepto en Jaboque, donde se registró un promedio de 8,57 mg L⁻¹ en la época seca (Castro & Pinilla, 2014).

Con respecto a los nutrientes, el incremento del nitrógeno amoniacal en la época de lluvias puede deberse a un aumento en la descomposición de la materia orgánica en condiciones anóxicas (Wetzel, 2001; Sierra, 2011), lo que posiblemente ocurre en el fondo del humedal. Sin embargo, al no tener mediciones de oxígeno disuelto del fondo, esta explicación se plantea a manera de hipótesis. En relación con lo anterior, como se observa en la tabla 3, en todos los humedales (excepto en Guaymaral) se evidenció el incremento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal durante la época de lluvias, lo cual indica que probablemente en este periodo se favorecen los procesos de descomposición de nitrógeno orgánico (Romero, 2009). De acuerdo con el pH (menor a 9), se deduce que en el nitrógeno amoniacal registrado predomina el ión amonio, lo cual es común en aguas naturales (Romero, 2009). Así mismo, teniendo en cuenta que el nitrógeno total también se incrementó en la época de lluvias, se debe considerar que en este periodo el humedal posiblemente recibió aportes de compuestos nitrogenados a través de la escorrentía superficial y del aporte natural de la lluvia (Romero, 2009).

Por otro lado, las bajas concentraciones de nitritos encontradas en las dos épocas climáticas, especialmente en la temporada de lluvias, pueden estar relacionadas con los altos niveles de oxígeno disuelto registrados, lo cual pudo favorecer la oxidación de los nitritos, que de esta manera pasan a nitratos. Se esperaría encontrar mayores niveles de nitratos en el agua, pero las concentraciones medidas en ambos periodos climáticos fueron bajas, lo que posiblemente se explica porque los nitratos se absorben y utilizan

directamente por parte de las algas y de la vegetación acuática para sintetizar proteínas (Sze, 1993; Roldán & Ramírez, 2008). Con respecto a otros humedales del Distrito Capital, la concentración de nitratos en El Salitre fue baja en ambos periodos climáticos, e indica que los problemas de eutroficación en este cuerpo de agua no son preocupantes (Sierra, 2011), siempre y cuando se mantengan sus condiciones de aislamiento de las fuentes urbanas de contaminación.

Por su parte, la concentración de ortofosfatos se incrementó durante la época de lluvias, y esto pudo favorecer el aumento de la biomasa fitoplanctónica durante éste periodo, dado que este nutriente se encuentra disuelto en el agua y es aprovechado directamente por las algas (Sierra, 2011; Roldán & Ramírez, 2008). Se debe considerar además que la asimilación de los fosfatos por parte del fitoplancton se realiza con rapidez (Roldán & Ramírez, 2008). El incremento de ortofosfatos que se registró en la época de lluvias puede estar relacionado con aportes provenientes de la escorrentía superficial (Romero, 2009) y con la resuspensión del fósforo liberado durante el proceso de descomposición de las macrófitas en el sedimento del ecosistema (Wetzel, 2001). No obstante, la tabla 3 muestra claramente que El Salitre es un humedal con una carga mucho menor de fósforo, en comparación con otros humedales bogotanos. Solo Meridor, ubicado en las afueras de la ciudad, y Santa María del Lago, que ha tenido un proceso de descontaminación de varios años (López, 2012), se asemejan en sus concentraciones bajas de ortofosfatos.

En general, teniendo en cuenta que las concentraciones de nutrientes fueron moderadamente bajas en ambos periodos climáticos (un poco mayores en la época de lluvias), es notable la alta abundancia de fitoplancton encontrada en el humedal, reflejada a su vez en la biomasa de clorofila *a* fitoplanctónica. Se ha demostrado que las macrófitas sumergidas reducen la abundancia de fitoplancton por la competencia directa por los nutrientes y por la provisión de hábitat para invertebrados fitoplanctófagos (Sipaúba-Tavares & Dias, 2014), así como por la reducción en la resuspensión del sedimento (Brothers, Hilt, Attermeyer, Grossart, Kosten, Lischke, *et al.*, 2013), e incluso por efectos alelopáticos (Hilt, 2015). Según Kluijver, Ning, Liu, Jeppesen, Gulati & Middelburg (2015) el establecimiento de macrófitas sumergidas (y de su perifitón asociado) constituye una manera de controlar el fitoplancton. En general, en los lagos someros dominados por macrófitas el fitoplancton desempeña un papel secundario en la producción de carbono, pero dada su elevada capacidad de respuesta a las oportunidades de crecimiento, en algunas ocasiones puede llegar a ser abundante, en especial si no hay peces planctívoros (Padisák & Reynolds, 2003). Por lo tanto, es destacable la abundancia de fitoplancton en El Salitre, si se tiene en cuenta la presencia importante de macrófitas sumergidas y emergentes en este ecosistema (García & Cruz, 2013). Esta situación puede explicarse por una o varias de las siguientes razones:

1. En cuerpos de agua someros se favorece la recirculación eficiente de los nutrientes, debido a que generalmente la columna de agua se mezcla con facilidad y esto remueve los sedimentos del fondo y promueve la resuspensión de compuestos inorgánicos, haciéndolos disponibles para el fitoplancton (Reynolds, 1997; Padisák & Reynolds, 2003). Así, en sistemas de poca profundidad como El Salitre y los demás humedales de la sabana de Bogotá, este ciclo podría repetirse con frecuencia. Este fenómeno se vería reforzado si estos humedales no cuentan con drenajes externos y están confinado por jarillones, como ocurre con El Salitre. Además, en este ecosistema la infiltración es lenta por la baja permeabilidad del subsuelo (EAAB, 2011).

2. En sistemas palustres como El Salitre y demás humedales de la sabana de Bogotá, existe una estrecha relación entre el fondo (bentos) y la columna de agua. Generalmente en estos ambientes no se presenta estratificación térmica y las macrófitas cubren una proporción importante del área del humedal (López, 2012; García & Cruz, 2013). Por lo tanto, la acumulación de materia orgánica en el fondo favorece la colonización de más macrófitas, las cuales a su vez ayudan a mantener las características funcionales del ecosistema con respecto al pH, los gases disueltos y los ciclos de nutrientes (Frodge, Thomas & Pauley, 1991). De esta manera, la actividad respiratoria y de mineralización en el bentos puede liberar las formas inorgánicas de los nutrientes, que pasan a la zona limnética y son aprovechados por las algas planctónicas.

3. Teniendo en cuenta que El Salitre no tiene conexiones de redes de alcantarillado que puedan aportar aguas residuales al sistema (EAAB, 2011), es posible que parte del incremento de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) durante la época de lluvias sea generado por la escorrentía de la micro cuenca local, lo cual implica el lavado y transporte de los nutrientes presentes en el suelo circundante hasta el humedal (Romero, 2009); esto favorecería el desarrollo del fitoplancton.

4. Ciertos grupos de algas abundantes en El Salitre, como las desmidiáceas, algunas clorofíceas clorococales y las crisofíceas flageladas, se encuentran generalmente en cuerpos de agua con baja concentración de nutrientes (Bellinger & Sigee, 2010). Son taxones muy productivos y eficientes con menores cantidades de nitrógeno y fósforo (Reynolds, 2006). La composición biótica fitoplanctónica reflejaría entonces un sistema productivo con una carga no tan elevada de estos elementos.

De acuerdo con lo anterior, la relativamente baja concentración de nutrientes en ambos periodos climáticos indicaría una condición de oligotrofia a mesotrofia en el sistema. Esto parece deberse a que el humedal solamente es alimentado por aguas lluvias y de escorrentía, lo que limita la entrada de nutrientes al cuerpo de agua. Sin embargo, al tener en cuenta los criterios establecidos por Dabrowski (2014) para el ortofosfato y por Esteves (1998) para la clorofila *a* fitoplanctónica, El Salitre sería

eutrófico (Tabla 1); la profundidad Secchi (0,38-0,49 m), por su parte, lo clasificaría como hipereutrófico (OCDE, 1982). Es importante tener en cuenta que los criterios con los cuales se comparan las variables medidas en El Salitre se definieron para zonas templadas y que su aplicación no es clara para cuerpos de agua tropicales (Esteves, 1998). Además, Huszar, Silva, Domingos, Marinho & Melo (1998) señalan que la concentración de clorofila *a* fitoplanctónica no es un atributo adecuado para evaluar el estado trófico de los ambientes tropicales poco profundos, bajo los criterios dados para zonas templadas. Es claro que en estos ambientes andinos tropicales someros, como los humedales del altiplano Cundiboyacense, la resuspensión de fósforo mantiene un grado de trofia elevado que podría considerarse como normal. A este respecto aún no se han definido con certeza los límites de las categorías tróficas en la región tropical con base en el fósforo, pero los datos de El Salitre sugieren que sería necesario incrementar dichos límites. El trabajo de Salas & Martino (1991) establece una concentración de 0,118 mg L⁻¹ de fósforo total como límite inferior del estado eutrófico, lo cual parece más adecuado para los lagos tropicales. Más recientemente Ortiz-Jiménez, De Anda & Maniak (2006) señalan que los valores límites para los estados tróficos en lagos cálidos tropicales de América Latina son cuatro veces más altos que los estimados en los lagos templados del hemisferio norte. De esta manera, la clasificación de El Salitre sería de mesotrofia o incluso oligotrofia. Algo similar podría ocurrir con la concentración de clorofila *a*, cuyas concentraciones en los sistemas tropicales podrían ser naturalmente más altas, con lo cual el estado trófico basado en esta variable se debería revisar.

No hay que olvidar que la condición normal de los humedales es la eutrofia y que esta es una característica propia de estos ambientes, bajo la cual funcionan adecuadamente. Precisamente, la biota de los humedales es la encargada de digerir toda la carga orgánica y de nutrientes que tienen este tipo de ecosistemas, razón por la cual los humedales se consideran los riñones de los paisajes en que se encuentran (Mitchell, 1994).

El humedal El Salitre tiene poca profundidad (<1,5 m) y como se mencionó, hay una mayor probabilidad de interacción entre el sedimento y la columna de agua. Según Esteves (1998), la disponibilidad de nutrientes en este tipo de ambientes no es un buen indicador del nivel trófico y esto se debe a que las concentraciones de las formas disueltas de nutrientes no reflejan su verdadera disponibilidad, debido a las altas tasas de absorción y ciclado que tienen los cuerpos de agua tropicales poco profundos. Sumado a esto, el efecto de la disponibilidad de nutrientes sobre el fitoplancton es usualmente complejo de medir, debido a la dificultad de su detección y a las bajas concentraciones de nutrientes que requieren las algas para su crecimiento (Reynolds, 1992).

Los índices basados en las proporciones de taxones de algas se sustentan en la idea de que los atributos del fitoplancton se relacionan con el estado trófico (Huszar, et

al., 1998). En El Salitre estos índices indicaron un estado oligotrófico a mesotrófico, coincidente en buena parte con los resultados físicos y químicos. Por su parte, el índice de estado trófico ponderado de Carlson (IET) señaló condiciones de mesotrofia a eutrofia. El IET ponderado contempla para su cálculo parámetros como la profundidad Secchi y la concentración de clorofila *a* fitoplanctónica, variables que como se discutió, no parecen mostrar adecuadamente el estado trófico en los sistemas tropicales poco profundos. Por esta razón, la composición del fitoplancton puede ser más útil que estos índices tróficos al momento de clasificar el grado de enriquecimiento con nutrientes de los ecosistemas acuáticos tropicales (Huszar, et al., 1998). Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede decir que términos generales, los distintos índices calculados señalan cierta tendencia del humedal El Salitre a la oligotrofia o a la mesotrofia en ambos periodos climáticos.

La buena capacidad del fitoplancton como indicador trófico se debe a que las algas responden a las concentraciones de nutrientes de manera rápida, pues están embebidas directamente en el agua y las condiciones físicas y químicas del medio las afectan directamente (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2005). Así, los ensamblajes que forman ciertos grupos de especies del fitoplancton pueden utilizarse para clasificar el estado trófico de los ecosistemas acuáticos, debido a que las especies reflejan la complejidad de los procesos que se dan en el sistema (Huszar, et al., 1998). Por esta razón, la composición y abundancia de esta comunidad en el humedal El Salitre puede ser un indicador adecuado de su condición trófica.

La dominancia de desmicias en El Salitre es un indicativo evidente de ambientes oligotróficos (Huszar, et al., 1998). Los ensamblajes fitoplanctónicos de especies de los géneros *Staurodesmus*, *Staurastrum*, *Cosmarium* y *Closterium*, que fueron representativos en el humedal, son propios de aguas pobres en nutrientes, ligeramente ácidas y de baja alcalinidad (Reynolds, 1998; Huszar, et al., 1998; Bicudo & Menezes, 2006; Bellinger & Sigee, 2010; Guiry & Guiry, 2015). Lo anterior coincide con la clasificación de Hutchinson (1967), ya que en El Salitre fue característico el tipo *oligotrófico desmiciáceo*. De igual manera, *Heimansia pusilla*, la especie más abundante durante el estudio, se ha registrado en sistemas mesotróficos de aguas ácidas (Coesel, 1993; Pinilla, 2000). Esta desmicia es de hábitos ticoplanctónicos (asociada a raíces de plantas acuáticas) y con preferencia por aguas no muy mineralizadas (Negro, De Hoyos & Aldasoro, 2003), como es el caso del humedal El Salitre.

De las clorofíceas, las clorococales tuvieron una gran representatividad a nivel de riqueza, y dos especies del género *Monoraphidium* fueron las más abundantes de este grupo. Aunque éste es uno de los géneros más cosmopolita entre las clorococales, predomina principalmente en ambientes oligo a mesotróficos (Bicudo & Menezes, 2006). Dentro de las euglenofitas, el género *Trachelomonas*, que está asociado con aguas mesotróficas poco profundas

(Reynolds, 2006), tuvo la mayor abundancia dentro de esta clase, en especial *T. volvocinopsis* en la época seca. A pesar de que los géneros *Dinobryon* (Chrysophyceae) y *Mallomonas* (Xanthophyceae) tuvieron baja abundancia, se debe tener en cuenta que generalmente se encuentran en ambientes oligotróficos o mesotróficos de aguas blandas (Reynolds, 1997; Reynolds, 2006).

El humedal Santa María del Lago, que según López (2012) es mesotrófico a eutrófico, Rodríguez (2012) encontró que las euglenofitas fueron la clase más abundante (>80%), con las especies *Trachelomonas volvocina*, *Phacus longicauda*, *P. orbicularis*, *P. helikoides* y *Lepocinclis ovum* como las más representativas, seguidas por las clorofíceas *Crucigenia quadrata*, *Dictyosphaerium pulchellum* y *Oocystis* sp. Este ensamblaje tiene cierta similitud con la composición de El Salitre, pero es evidente que en Santa María la dominancia de euglenofitas señala un trofismo de mayor grado. En el humedal Córdoba se han hallado condiciones de eutrofia a hipereutrofia (SDA & UMNG, 2008), con prevalencia de taxones perifíticos de las clases Bacillariophyceae, Cyanophyceae y Euglenophyceae. Los géneros más representativos en Córdoba fueron *Synechococcus*, *Merismopedia* y *Nitzschia*. En el humedal Jaboque, Arcos & Gómez (2006) utilizaron sustratos artificiales para evaluar la colonización de algas perifíticas y encontraron que las clases más representativas fueron Euglenophyceae, Cyanophyceae y Bacillariophyceae, resultados que asociaron con la condición de eutrofia de ese cuerpo de agua. En el humedal Juan Amarillo, considerado como eutrófico (CIC & EAAB, 2008), Rodríguez (2012) encontró que en la época seca dominaron las clases Dinophyceae y Euglenophyceae, mientras que en la época lluviosa fueron más representativas las Chlorophyceae (>50%), Euglenophyceae, Dinophyceae y Bacillariophyceae. Entre las especies más importantes en Juan Amarillo, Rodríguez (2012) registró a *Ceratium furcoides*, *Peridinium cinctum*, *Trachelomonas hispida*, *T. volvocina*, *Lepocinclis salina*, *P. longicauda*, *Monoraphidium* sp, *Closteriopsis* sp. y *Oocystis* sp. Como se ve, en Córdoba, Jaboque y Juan Amarillo, considerados como humedales urbanos de Bogotá eutróficos o hipereutróficos, la composición fitoplanctónica fue muy diferente a la de El Salitre, un sistema con un grado de trofia menor.

Los estudios disponibles muestran que la composición algal de la mayoría de los humedales de Bogotá, con predominio de las clases Euglenophyceae y Cyanophyceae, está asociada a condiciones de eutrofia. Generalmente estos grupos prosperan en ambientes acuáticos con altas concentraciones de nutrientes y ricos en materia orgánica (Ramírez, 2000). Son notorias las diferencias en la composición y dominancia de las especies del fitoplancton de El Salitre con respecto a las de otros humedales del Distrito Capital. En El Salitre las clases con mayor riqueza fueron Conjugatophyceae, particularmente las desmicias, y Chlorophyceae, con predominio de las clorococales. La

ausencia de aportes urbanos de nutrientes y el ingreso de aguas lluvias y de escorrentía (EAAB, 2011) explicarían esta situación ecológicamente más saludable del humedal El Salitre. Los demás humedales de la ciudad reciben en mayor o menor grado cargas de contaminación por aguas residuales, tanto de origen doméstico como industrial (SDA, 2008), lo cual acelera los procesos de eutrofización en estos ecosistemas, que se reflejan en la composición de sus comunidades de algas planctónicas.

Conclusiones

Las concentraciones de nutrientes del humedal El Salitre fueron bajas en relación con otros humedales urbanos de Bogotá D.C. e indicaron una condición de oligotrofia a mesotrofia para los compuestos nitrogenados y de supuesta eutrofia para los ortofosfatos, siendo el nitrógeno el nutriente limitante. Las clases dominantes del fitoplancton fueron Conjugatophyceae (desmiciáceas) y Chlorophyceae (clorococales), con especies que indicaron condiciones de oligotrofia a mesotrofia en el sistema. La hipótesis propuesta inicialmente se pudo comprobar en cuanto al estado trófico menor del humedal El Salitre, en comparación con los demás humedales de Bogotá. Los grupos fitoplanctónicos dominantes en este humedal corresponden a taxones algales específicos de aguas con poca a moderada cantidad de nutrientes. Esto hace de El Salitre un sistema que podría servir de referencia para los demás humedales de la ciudad y que por lo tanto requiere un manejo que preserve sus condiciones actuales. Sus características físicas, químicas y fitoplanctónicas podrían servir de meta a alcanzar en la planificación de proyectos de rehabilitación ambiental de otros humedales y para la posterior evaluación de dichos proyectos, como lo sugieren los principios de restauración ecológicos de SER (2004).

Agradecimientos

El proyecto fue financiado en parte por el Programa de Estímulos a la Investigación “Thomas van der Hammen” del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Además, los autores agradecen al grupo de investigación “Biodiversidad, biotecnología y conservación de ecosistemas” del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo logístico y al Laboratorio de Limnología de la Universidad Jorge Tadeo Lozano donde se hicieron los análisis químicos y biológicos. Se agradece también a la Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá por los permisos otorgados para la toma de muestras.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

Alcaldía Local de Barrios Unidos. 2014. Plan Ambiental Local 2013-2016. Bogotá: Alcaldía Local de Barrios Unidos.

- Alcaldía Mayor de Bogotá.** 2000. Historia de los humedales de Bogotá. Disponible en: www.bogota.gov.co/guia/interfaz/usuario/anexos/Humedales.doc, accedido en septiembre de 2016.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF).** 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater (22nd ed.). Washington: USA: American Public Health Association.
- Arcos, M.P., Gómez, A.C.** 2006. Microalgas perifíticas como indicadores del estado de las aguas de un humedal urbano: Jaboque, Bogotá D.C., Colombia. *Nova*. **4** (6): 60-79.
- Belling, E., Sige, D.** 2010. Freshwater algae: identification and use as bioindicators. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Beltrán, B.J., Rangel, J.E.** 2013. Modelación del estado trófico del humedal de Jaboque, Bogotá D.C., Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **18** (1): 149-164.
- Bicudo, C., Meneses, M.** 2006. Géneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições (2da ed.). São Carlos, Brasil: Rima.
- Brothers, S.M., Hilt, S., Attermeyer, K., Grossart, H.P., Kosten, S., Lischke, B., Mehner, T., Meyer, N., Scharnweber, K., Köhler, J.** 2013. A regime shift from macrophyte to phytoplankton dominance enhances carbon burial in a shallow, eutrophic lake. *Ecosphere*. **4** (11): 1-17.
- Castro, D., Pinilla, G.A.** 2014. Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnética*. **33** (2): 297-312.
- Conservación Internacional Colombia (CIC), Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).** 2008. Convenio "Investigación aplicada en restauración ecológica". Humedal Juan Amarillo. Informe final. Bogotá, Colombia: Conservación Internacional Colombia y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Coesel, P.F.** 1993. Taxonomic notes on Dutch desmids II. Cryptogamie, Algologie. **14**: 105-114.
- Confederación Hidrográfica del Ebro.** 2005. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para fitoplancton. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente de España.
- Dabrowski, J.M.** 2014. Applying SWAT to predict orthophosphate loads and trophic status in four reservoirs in the upper Olifants catchment, South Africa. *Hydrology and Earth Systems Science*. **18**: 2629-2643.
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA).** 2002. Los humedales del altiplano en Bogotá, bases técnicas para su conservación, restauración y manejo. Documento Técnico. Bogotá: Departamento Administrativo del Medio Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá.
- De la Fuente, M.J.** (ed). 2004. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza: Ministerio de Medio Ambiente de España. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/Protocolos_muestreo_biologico_con_portada_tcm7-16059.pdf
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).** 2011. Balance hidroclimático del cuerpo de agua ubicado en el Parque El Salitre de la ciudad de Bogotá. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Esteves, F.A.** 1998. Fundamentos de limnología (2da ed.). Rio de Janeiro: Interciência/FINEP.
- Frodge, J.D., Thomas, G.L., Pauley, G.B.** 1991. Sediment phosphorus loading beneath dense canopies of aquatic macrophytes. *Lake and Reservoir Management*. **7** (1): 61-71.
- García, B.D., Cruz, A.S.** 2013. Propuesta de un plan de manejo ambiental del humedal El Salitre, Bogotá D.C. (Tesis de especialistas). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.
- 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.
- Hilt, S.** 2015. Regime shifts between macrophytes and phytoplankton – concepts beyond shallow lakes, unravelling stabilizing mechanisms and practical consequences. *Limnética*. **34** (2): 467-480.
- Huszar, V., Silva, L.H., Domingos, P., Marinho, M., Melo, S.** 1998. Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes. *Hydrobiologia*. **369/370**: 59-71.
- Hutchinson, G.E.** 1967. A treatise on limnology, Vol II. Introduction to lake biology and the limnoplankton. New York: John Wiley & Sons.
- Karlson, B., Cusack, C., Bresnan, E.** (eds). 2010. Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis. Paris: UNESCO (IOC Manuals and Guides, N° 55.) (IOC/2010/MG/55).
- Kluijver, A. Ning, J., Liu, Z., Jeppesen, E., Gulati, R.D., Middelburg, J.J.** 2015. Macrophytes and periphyton carbon subsidies to bacterioplankton and zooplankton in a shallow eutrophic lake in tropical China. *Limnology and Oceanography*. **60**: 375-385.
- Lewis, W.M.** 2002. Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie*. **28**: 210-213.
- López, P.R.** 2012. Estado trófico de un humedal urbano andino tropical: Santa María del Lago Bogotá D.C., Colombia. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Malagón, A.** 2008. Descripción del estado trófico de cuatro humedales de la Sabana de Bogotá, a partir de la composición, biomasa y producción del fitoplancton (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Moreno, V., García, J.F., Villalba, J.C.** 2005. Descripción general de los humedales de Bogotá. Bogotá: Sociedad Geográfica de Colombia. Disponible en: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/humed.pdf>, accedido en septiembre de 2016.
- Mitchell, D.S.** 1994. Floodplain wetlands of the Murray-Darling Basin: management, issues and challenges. In: T. Sharley, C. Huggin (eds.). Murray-Darling Basin floodplain wetlands management. (pp. 1-5). Albury, Australia: Proceedings of the Floodplain Wetlands Management Workshop.
- Negro, A.I., De Hoyos, C., Aldasoro, J.J.** 2003. Diatom and desmid relationships with the environment in mountain lakes and mires of NW Spain. *Hydrobiologia*. **505**: 1-13.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).** 1982. Eutrophication of waters. Monitoring assessment and control. Paris: Organisation de Coopération et Développement Économiques.

- Ortiz-Jiménez, M.A., De Anda, J., Maniak, U.** 2006. Estimation of trophic states in warm tropical lakes of reservoirs of Latin America by using GPSS simulation. *Interciencia*. **31** (5): 345-350.
- Padisák, J., Reynolds, C.S.** 2003. Shallow lakes: the absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiologia*. **506-509**: 1-11.
- Parra, O., González, M., Dellarossa, V., Rivera, P., Orellana, M.** 1982. Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales con especial referencia al fitoplancton de Chile. I: Cyanophyceae, II: Chrysophyceae, III: Cryptophyceae, IV: Bacillariophyceae, V: Chlorophyceae. Concepción: Universidad de Concepción.
- Pinilla, G.** 2000. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Compilación bibliográfica. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Pinilla, G.** 2010. An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecological Indicators*. **10** (4): 848-856.
- Prescott, G.W., Croasdale, H., Vinyard, W.C.** 1972. North American Flora: Desmidiaceae. Part I. Saccodermatae, Mesotaeniaceae. New York: New York Botanical Garden.
- Prescott, G.W., Croasdale, H., Vinyard, W.C.** 1975. A synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermatae. Section 1. Lincoln, USA: University of Nebraska Press.
- Prescott, G.W., Croasdale, H., & Vinyard, W.C.** (1977). A synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermatae. Section 2. Lincoln: University of Nebraska Press.
- Prescott, G.W., Croasdale, H., Vinyard, W.C., Bicudo, C.E.M.** 1981. A synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermatae. Section 3. Lincoln: University of Nebraska Press.
- Prescott, G.W., Bicudo, C.E.M., Vinyard, W.C.** 1982. A synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermatae. Section 4. Lincoln: University of Nebraska Press.
- Ramírez, A., Viña, G.** 1998. Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Bogotá: BP Exploration Company (Colombia), Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Ramírez, J.** 2000. Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Reynolds, C.S.** 1992. Eutrophication and the management of planktonic algae: what Vollenweider couldn't tell us. In: D.W. Sutcliffe, J.G. Jones (eds.). *Eutrophication: research and application to water supply*. (pp. 4-29). Ambleside, UK: Freshwater Biological Association.
- Reynolds, C.S.** 1997. Vegetation process in the pelagic: a model for ecosystem theory. Oldendorf/Luhe, Germany: Ecology Institute.
- Reynolds, C.S.** 1998. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*. **369/370**: 11-26.
- Reynolds, C.S.** 2006. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rivera-Usme, J., Pinilla-Agudelo, G.A., Rangel-Ch, J.O.** 2013. Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables físicas y químicas en el humedal de Jaboque-Colombia. *Caldasia*. **35** (2): 389-408.
- Roldán, G., Ramírez, J.** 2008. *Fundamentos de limnología neotropical* (2da ed). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Romero, J.A.** 2009. *Calidad del agua* (3ra ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rodríguez, L.** 2012. Determinación del estado trófico de tres ecosistemas lénticos de la Sabana de Bogotá con base al fitoplancton, en dos periodos climáticos contrastantes (Tesis pregrado). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- Salas, H.J., Martino, P.** 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*. **25** (3): 341-350.
- Society for Ecological Restoration International (SER).** 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Tucson: Society for Ecological Restoration International. Disponible en <http://www.ser.org/docs/default-document-library/spanish.pdf>, accedida en junio de 2016.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).** 2008. Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Bogotá: Secretaria Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Universidad Militar Nueva Granada (UMNG).** 2008. Formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Salitre en el perímetro urbano del Distrito Capital. Informe de la fase de diagnóstico. Convenio interadministrativo No. 080 del 28 de diciembre de 2007. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente, Universidad Militar Nueva Granada.
- Sierra, C.A.** 2011. *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. Medellín: Editorial Universidad de Medellín.
- Sipaúba-Tavares, L.H., Dias, S.G.** 2014. Water quality and communities associated with macrophytes in a shallow water-supply reservoir on an aquaculture farm. *Brazilian Journal of Biology*. **74** (2): 420-428.
- Sze, P.** 1993. *A biology of the algae* (2nd ed.). Dubuque: Wm. C. Brown Publishers.
- Tell, G., Conforti, V.** 1986. *Euglenophyta pigmentadas de la Argentina*. Berlin-Stuttgart: J.Cramer.
- Vásquez, C., Ariza, A., Pinilla, G.** 2006. Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano Cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*. **11** (2): 61-75.
- Wehr, J.D., Sheath, R.G., Kociolek, R.P.** (eds.). 2003. *Freshwater Algae of North America*. San Diego: Academic Press.
- Wetzel, R.G.** 2001. *Limnology: lake and river ecosystems* (3th ed.). Philadelphia: San Diego: Academic Press.
- Wetzel, R.G., Likens, G E.** 2000. *Limnological analyses* (3rd ed.). New York: Springer-Verlag.

Trazabilidad de los registros de mamíferos en el marco del otorgamiento de licencias ambientales para proyectos de hidrocarburos en Colombia

Paul Andrés Gómez-Sandoval^{1,*}, José Iván Mojica-Corzo², Ofelia Mejía-Egas³

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

²Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

Se evaluó la trazabilidad de los registros de mamíferos informados en el marco del otorgamiento de licencias ambientales en el sector de hidrocarburos en Colombia, en una muestra de 43 proyectos con licencias otorgadas en el 2014. El análisis se hizo mediante un método propuesto por los autores, el cual se fundamenta en el concepto de *voucher* biológico. Los resultados demostraron la falta de evidencia biológica verificable, que permita poner a prueba o revisar la identidad y características de la fauna de mamíferos reportada. Bajo estas circunstancias, la información pierde confiabilidad, lo cual limita la posibilidad de usarla, revisarla o reinterpretarla en investigaciones futuras. Si esta condición resulta ser un rasgo común en las caracterizaciones de la fauna que se presentan para el otorgamiento de licencias a los proyectos, ello implicaría que se está desperdiciando una oportunidad única para el conocimiento de la diversidad biológica del país, y que las decisiones sobre la viabilidad ambiental de los proyectos de hidrocarburos estarían respaldadas por estudios de mamíferos con un grado significativo de incertidumbre, en cuanto a la identidad y las características de los taxones registrados. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Fauna de mamíferos; Estudios de impacto ambiental; Caracterización; Inventario; Evaluación del impacto ambiental; Industria del petróleo; *Voucher*.

Traceability of mammal records in the framework of environmental licensing of oil projects in Colombia

Abstract

We evaluated the traceability of mammalian records reported in the framework of environmental licensing in the oil sector in Colombia based on a sample of 43 projects licensed during 2014. Our analysis was done using the method we have proposed based on the concept of biological voucher. Our results showed a lack of the verifiable biological evidence that allows to test or review the identity and features of reported mammals. Under these circumstances, the information loses reliability and its eventual use, review or reinterpretation in future research work is restricted. If this condition proves to be a common feature in the studies of fauna presented for projects licensing, it would imply that a unique opportunity to increase the knowledge on the country's biological diversity is being wasted, and that decision-making on environmental viability of oil projects is supported on mammalian studies with a significant degree of uncertainty in terms of the identity and characteristics of the recorded taxa. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Mammals; Environmental impact statement; Inventory; Environmental impact assessment; Oil industry; *Voucher*.

Introducción

En los últimos años en Colombia, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) ha otorgado anualmente cerca de un centenar de nuevas licencias a proyectos de hidrocarburos (ANLA, 2012, 2013, 2014, 2015), lo que lo convierte en uno de los sectores con mayor representación en términos de trámites ante esta entidad.

Como parte de los Estudios de Impacto Ambiental (EIAs) requeridos para el otorgamiento de licencias de estos

proyectos (Decreto 1076 de 2015), se exigen caracterizaciones o inventarios biológicos, con los que en términos generales se busca estimar el estado de algunos atributos de la biota (e.g. riqueza, composición, amenazas) que podría verse afectada por la ejecución de estas actividades.

*Correspondencia:

Paul Andrés Gómez-Sandoval, pagomez@unal.edu.co

Recibido: 25 de noviembre de 2016

Aceptado: 25 de febrero de 2017

La información biótica incluida en los EIAs presentados para el otorgamiento de licencias ambientales de proyectos en el mundo, viene siendo sometida a exámenes críticos (e.g. **Lee & Colley**, 1990, **Atkinson, et al.**, 2000, **Mandelik, et al.**, 2005, **Bataineh**, 2007, **Khera & Kumar**, 2010, **Hallat, et al.**, 2015), que han revelado debilidades latentes en cuanto a la calidad y suficiencia de la información. Esto puede incidir de manera negativa en la toma de decisiones y el propósito de la conservación efectiva de la diversidad biológica, en las áreas de acción de los proyectos. Sin embargo, a escala nacional, no se dispone de publicaciones científicas orientadas a la evaluación de la información biótica que es presentada para el otorgamiento de licencias ambientales de proyectos.

En el marco de las caracterizaciones o inventarios de la biodiversidad, contar con *Vouchers* o evidencia verificable de los muestreos, resulta crucial porque constituyen la base tangible o intangible para la comprobación de los registros biológicos reportados (i.e. trazabilidad de la información) y garantizan el uso o análisis futuro de la información recolectada (i.e. revisión, reevaluación o reinterpretación; **Martin**, 1990, **Wheeler**, 2003, **Funk, et al.**, 2005, **Turney, et al.**, 2015, **Schilthuizen, et al.**, 2015). El *voucher* biológico es definido como: un espécimen, una muestra, o producto del mismo, y sus datos asociados, que documenta la existencia de un organismo en un lugar y tiempo determinado, de una manera consistente con estándares disciplinarios, para asegurar la repetibilidad de la investigación, que de otra forma no podría ser adecuadamente revisada o reevaluada” (**Kageyama, et al.**, 2006: 262).

Bajo este concepto, se puede deducir que la evidencia de un muestreo biótico debe cumplir con tres criterios primarios, para ser catalogada *voucher* biológico: a) Existencia y repetibilidad: corresponder a un espécimen, muestra o producto del mismo, susceptible de verificación, revisión o evaluación posterior; b) Espacial: tener información asociada del lugar dónde se registró el espécimen, muestra o producto del mismo; c) Temporal: tener información asociada del momento en el que se registró el espécimen, muestra o producto del mismo.

En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo el análisis de la trazabilidad de los registros de especies de la mastofauna, que se presentan en el marco del otorgamiento de licencias ambientales de proyectos de hidrocarburos en Colombia. Los mamíferos fueron elegidos como grupo de estudio, debido a la importancia que tienen estos organismos por su uso comercial, recreativo, valor simbólico (e.g. especies bandera o carismáticas; **Isasi-Catalá**, 2011) y por ser proveedores de servicios y reguladores de dinámicas ecosistémicas (**Ceballos & Erlich**, 2009, **Fleming, et al.**, 2009, **Boyles, et al.**, 2011, **Kunz, et al.**, 2011, **Medrano-Najera, et al.**, 2014, **Regan, et al.**, 2015).

Materiales y métodos

Muestra de la investigación. Se identificaron los proyectos de hidrocarburos que fueron licenciados durante el año

2014 en Colombia, a través de la consulta de los boletines de la Gaceta Ambiental (enero a diciembre), donde la Autoridad Nacional de Licencia Ambientales (ANLA) publica resoluciones, autos, certificaciones y permisos. Se hallaron 86 resoluciones relativas al otorgamiento de licencias ambientales del sector de hidrocarburos, de las cuales 49 correspondieron a nuevas licencias y 37 a modificaciones a las ya existentes.

La muestra de esta investigación fue determinada por aquellos EIAs de las nuevas licencias del sector de hidrocarburos, a los que fue posible acceder a toda su información en formato digital, bajo las directrices establecidas en la Resolución de la ANLA N° 0173 del 17 de febrero de 2015, “Por la cual se regula el cobro de copias expedidas por la entidad”. Bajo este criterio, la muestra consolidada se obtuvo de 43 EIAs (i.e. 87.8% del universo 2014), a partir de los cuáles se efectuó el escrutinio de las caracterizaciones de mamíferos, que fueron el grupo biológico modelo de esta investigación (Información suplementaria, anexo 1, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SupFile/439/1809>).

La localización geográfica de los proyectos analizados en este estudio, se presenta en la figura 1.

Análisis de datos. Los autores de esta investigación, diseñaron una metodología para analizar la trazabilidad de los registros de mamíferos en el marco del otorgamiento de licencias ambientales (Figura 2), que está fundamentada en el concepto de *Voucher* biológico (sensu **Kageyama, et al.**, 2006). El objetivo de esta propuesta operativa, fue determinar cuál información registrada en las caracterizaciones, es susceptible de ser catalogada como *Voucher* biológico de los reportes de la mastofauna y por ende tiene el potencial de ser revisada, reevaluada, refutada, reinterpretada o usada como evidencia científica de investigaciones futuras.

Bajo esta metodología (Figura 2), para cada uno de los 43 estudios de mamíferos que constituyeron la muestra, en primera instancia se identificaron los tipos de registro biológico con los que se obtuvo el reporte de las especies de mamíferos. Posteriormente, se determinó la clase de evidencia que fue proveída para cada tipo de registro. Finalmente, cada clase de evidencia fue sometida a la verificación del cumplimiento de los tres criterios asociados al concepto de *Voucher* biológico (sensu **Kageyama, et al.**, 2006): a) Criterio de Existencia y repetibilidad: corresponder a un espécimen, muestra o producto del mismo, susceptible de verificación, revisión o evaluación posterior; b) Criterio espacial (i.e. ¿dónde?): tener información asociada del lugar dónde se registró el espécimen, muestra o producto del mismo; c) Temporal (i.e. ¿cuándo?): tener información asociada del momento en el que se registró el espécimen, muestra o producto del mismo.

De esta manera, se discriminó la evidencia que garantiza de manera objetiva y verificable, la trazabilidad de los registros de la mastofauna presentados en el marco del otorgamiento de licencias ambientales de proyectos.

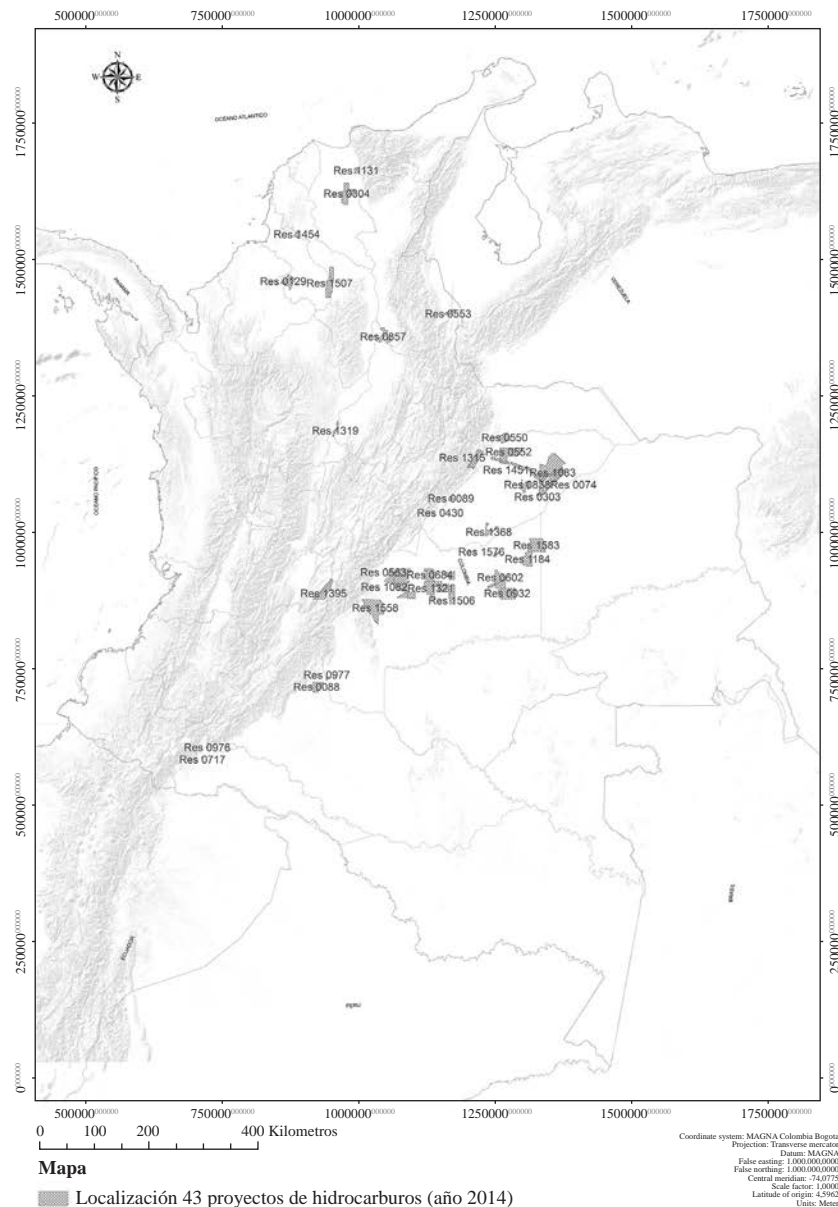


Figura 1. Localización de 43 proyectos de hidrocarburos licenciados en Colombia durante el año 2014, de los que se obtuvo la muestra. Fuente: Elaborado a partir de base cartográfica de los 43 EIAs obtenidos en la ANLA.

Resultados y discusión

Los 43 proyectos de hidrocarburos que constituyeron la muestra de este trabajo, abarcan zonas de 18 departamentos y 61 municipios de Colombia; concentrándose principalmente en la región Caribe, los Andes centrales y la Orinoquia (Figura 1). Las caracterizaciones de mamíferos desarrolladas para el otorgamiento de licencias ambientales de estos emprendimientos, reportaron en conjunto 231 taxones identificados hasta el nivel de especie (Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>). La riqueza observada estuvo en un rango de 14 a 70 especies por proyecto, con un promedio de 38,7 y desviación estándar de 14,7.

Entre estos registros, se presentan algunas nominaciones desactualizadas o equívocas (sensu **Solari, et al., 2013, Ramírez-Chaves & Suárez-Castro, 2014, Ramírez-Chaves, et al., 2016**; Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>): dieciocho (18) taxones reportados (*Bassaricyon gabbii*, *Cebus/Sapajus macrocephalus*, *Coendou bicolor*, *Didelphis albiventris*, *Eptesicus diminutus*, *Eumops bonariensis*, *Odocoileus virginianus*, *Mazama americana*, *Mazama nemorivaga*, *Molossus cf. currentium*, *Neonycteris pusilla*, *Oryzomys albigularis*, *Oligoryzomys fulvescens*, *Proechimys trinitatus*, *Rhogeessa tumida*, *Saimiri sciureus*, *Sigmodon hispidus*, *Vampyressa pusilla*) están excluidos de las listas más recientes de mamíferos del país, debido a que

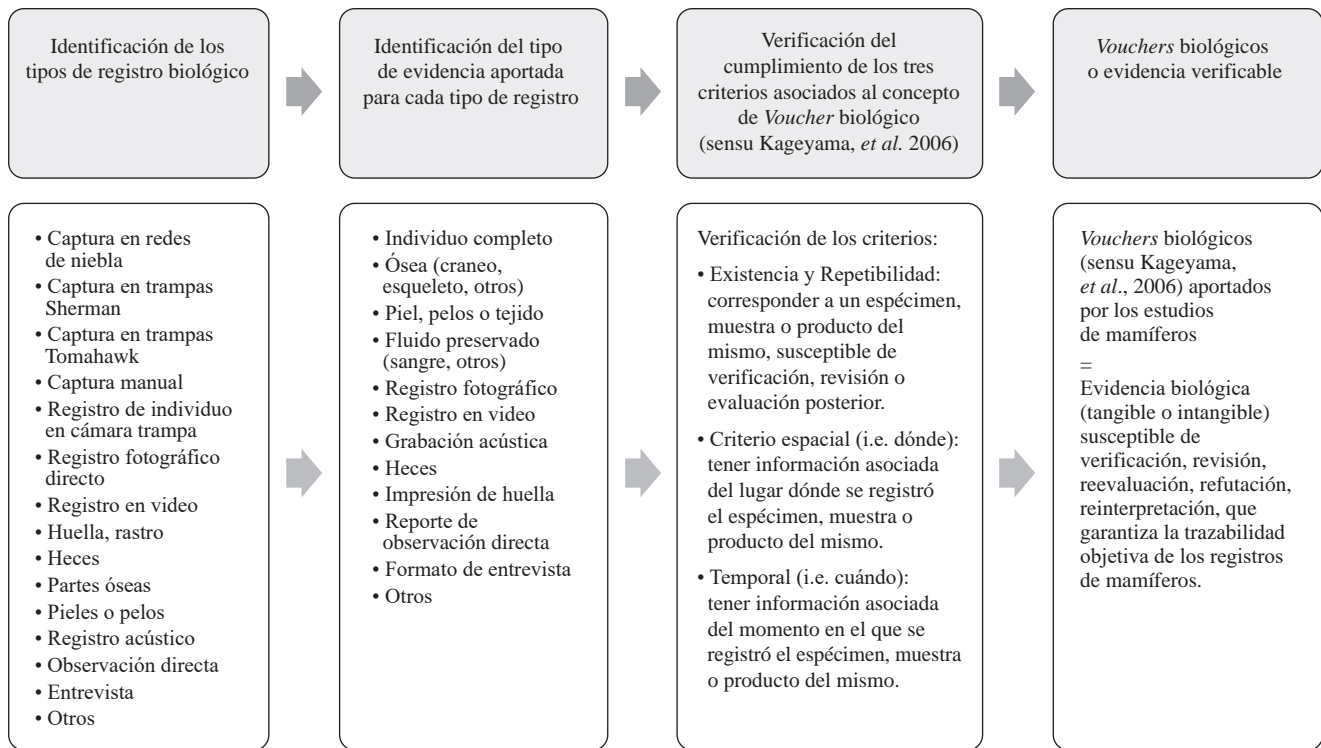


Figura 2. Propuesta metodológica para identificar Vouchers biológicos aportados en los estudios de mamíferos.

Fuente: Propuesta operativa de los autores de esta investigación, a partir del desarrollo teórico de **Kageyama, et al. 2006**.

la evidencia actual no soporta su presencia en Colombia; los roedores *Mus musculus*, *Rattus norvegicus* y *Rattus rattus*, desde la publicación de **Solari, et al., (2013)**, también se omiten de la mastofauna nativa por corresponder a especies introducidas (a pesar de encontrarse asilvestradas en algunas regiones; **Ramírez-Chaves, et al., 2011**); veintitrés (23) taxones (*Agouti paca*, *Artibeus anderseni*, *Artibeus glaucus*, *Artibeus cf. gnoma*, *Artibeus intermedius*, *Artibeus phaeotis*, *Callicebus ornatus*, *Callicebus torquatus*, *Coendou sanctaemartae*, *Lagothrix lugens*, *Lasiurus ega*, *Microsciurus pulcheranii*, *Mimon crenulatum*, *Oryzomys bicolor*, *Oryzomys talamancae*, *Proechimys urichi*, *Saguinus fuscicollis*, *Sciurus granatensis*, *Sciurus igniventris*, *Sciurus spadiceus*, *Tayassu tajacu*, *Tonatia silvicola*, *Vampyressa bidens*) corresponden a sinónimos de especies válidas para el país. Así, estos proyectos licenciados en el año 2014, aglutinan registros cercanos al 38% (i.e. 200 spp válidas) de las especies nativas de mamíferos conocidas para Colombia (sensu **Ramírez-Chaves, et al., 2016**).

Estas cifras demuestran el potencial que tiene la información proveniente de los Estudios de Impacto Ambiental, en la contribución al conocimiento de los mamíferos y la biodiversidad del territorio colombiano (**King, et al., 2012**). Estos datos adquieren mayor relevancia, si se considera que algunos de los reportes biológicos están asociados a localidades que no han sido previamente muestreadas en el marco de investigaciones científicas.

La importancia de los registros bióticos obtenidos en el contexto del otorgamiento de licencias ambientales y los proyectos de hidrocarburos en Colombia, se ejemplifica con los trabajos de **Suárez-Castro, et al., (2012)** y **Morales-Martínez & Suárez-Castro (2014)**, quienes a partir de la revisión de ejemplares depositados en colecciones biológicas de referencia científica, que provenían de inventarios de mamíferos realizados para proyectos petroleros, publicaron la ampliación de la distribución conocida para Colombia de los quirópteros *Glyphonycteris silvestris* y *Peropteryx leucoptera*, y los primeros registros para el país de *Glyphonycteris daviesi* y *Peropteryx pallidoptera*. Estos hallazgos fueron posibles gracias a que se contaba con Vouchers biológicos del muestreo realizado (sensu **Kageyama, et al., 2006**). La utilidad y confiabilidad de la información obtenida en los estudios bióticos desarrollados para el otorgamiento de licencias ambientales de proyectos en Colombia, está condicionada por su trazabilidad, por la posibilidad de revisar, confirmar, reevaluar o reinterpretar los registros biológicos y su datos asociados (**Wheeler, 2003**, **Funk, et al., 2005**, **Schilthuizen, et al., 2015**)

Tipos de registro biológico y la riqueza observada de mamíferos. La figura 3 presenta el número total de especies nativas de mamíferos, por tipo de registro biológico (sensu **Solari, et al., 2013**, **Ramírez-Chaves & Suárez-Castro, 2014**, **Ramírez-Chaves, et al., 2016**; Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racecfyn.co/index.php/>

racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810). Las entrevistas (110 spp), la captura en redes de niebla (90 spp), las observaciones directas (81 spp) y las huellas y rastros (40 spp), fueron las clases que aportaron más información a la riqueza total observada. En este contexto, es importante destacar que para 37 especies, algunos EIAs no presentaban información acerca del tipo de registro (Figura 3, Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>).

Algunos taxones reportados en los estudios de la mastofauna analizados en esta investigación, motivan dudas razonables sobre la veracidad de su registro (Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>). Es el caso del murciélago *Daemus youngii*, y los roedores *Oecomys bicolor* y *Oecomys concolor*, que fueron reportadas únicamente a través de entrevistas. El registro de estas especies exclusivamente por este método genera alta incertidumbre, debido a sus características morfológicas, etología, sitios de refugio y alimentación, que hacen poco probable su conocimiento específico u observación frecuente por parte de los habitantes del área de influencia de estos proyectos.

En este sentido, también resultan inciertos los reportes de tres especies de murciélagos registradas exclusivamente a través de observaciones directas: *Choeroniscus minor*, *Glossophaga commissarisi*, *Molossus bondae* (Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>).

Aunque las entrevistas constituyen una fuente común de información en las investigaciones de mamíferos (Proulx & Drescher, 1993, Voss & Emmons, 1996, Polanco-Ochoa, et al., 2000, Voss, et al., 2001, Vriesendorp, et al., 2007, Mejía-Correa & Díaz-Martínez, 2009, Castaño y Corrales, 2010, Pitman, et al., 2014, Liévano-Latorre & López-Arevalo, 2014), debido a que permiten abordar el conocimiento local, los usos y valores dados a los mamíferos por los habitantes de un área dada (Liévano-Latorre & López-Arevalo, 2014), este método por si solo no garantiza trazabilidad en los reportes taxonómicos, y por ello, su precisión y confiabilidad suele ser cuestionada (Patton, et al., 1982, Sánchez, et al., 2004, Zapata-Ríos, et al., 2006, MINAM, 2015). Así mismo, bajo el concepto de *Voucher* biológico (Kageyama, et al., 2006), este método no cumple con el criterio de Existencia y Repetibilidad, porque no hay forma de verificar, revisar o reevaluar, la identidad y características del organismo registrado por estos medios. Estas debilidades son compartidas por los registros obtenidos únicamente a través de observaciones visuales, donde la confiabilidad de la información recae en la experticia del observador y la precisión del reporte o su información asociada, es aceptada a priori y no puede ser puesta a prueba.

Tipo de evidencia y trazabilidad de la información de los muestreos de mamíferos. En los 43 estudios examinados, las únicas clases de evidencia ofrecida fueron los registros fotográficos incluidos en los EIAs y los formatos de entrevistas presentados como anexos. Una proporción sustancial de los taxones reportados, carecían de evidencia susceptible de

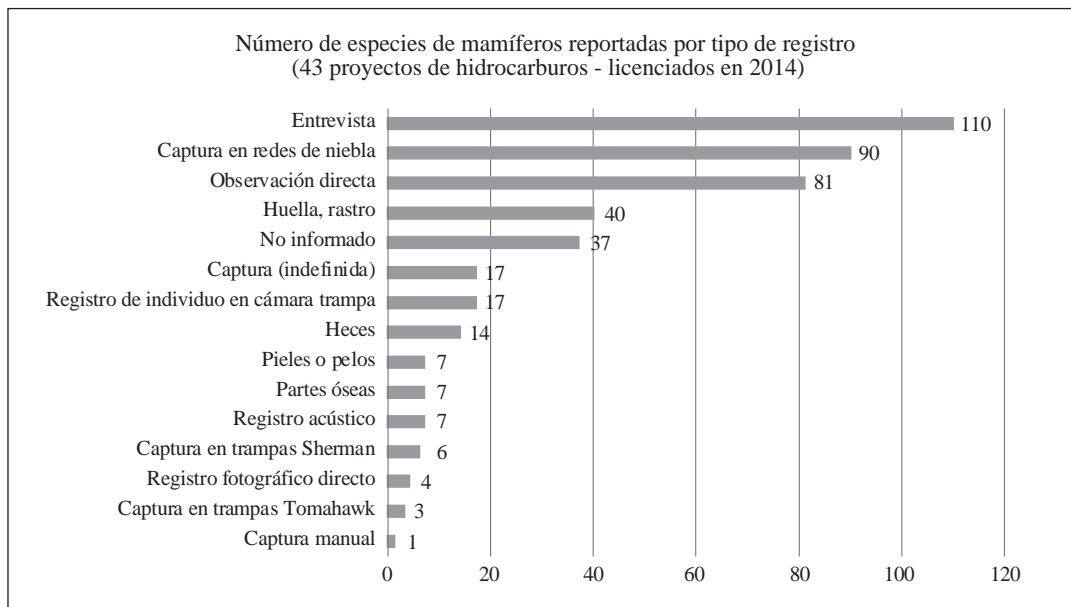


Figura 3. Tipos de registro biológico y su aporte a la riqueza observada, en 43 estudios de mamíferos desarrollados para el licenciamiento de proyectos de hidrocarburos en Colombia. Aclaración: “captura (indefinida)” corresponde a registros en los que no se especifica el tipo de captura realizada (e.g. en trampa Sherman, Tomahawk, manual).

Fuente: Elaboración propia, a partir de la información obtenida de 43 EIAs de proyectos de hidrocarburos licenciados en Colombia, en el año 2014 (detalles en Información suplementaria, anexo 2, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/439/1810>).

verificación (aún la fotográfica). En ninguno de los estudios, se informó sobre la ejecución de recolecta científica o el depósito de algún tipo de *Voucher* (sensu **Kageyama, et al.**, 2006) en colecciones biológicas de referencia (e.g. individuos completos; partes óseas; pieles, pelos o tejidos; impresión de huellas; heces; fluidos preservados). Así mismo, se encontró que algunos EIAs de la muestra que fueron realizados por la misma empresa consultora, repetían fotografías en sus informes, como sustento del registro de las especies.

Si se tiene en cuenta que las entrevistas y las observaciones directas, están entre los tipos de registro que aportaron más información a la riqueza de especies (Figura 3), y que estas clases de soporte no cumplen con el criterio de Existencia y Repetibilidad para ser considerados *Vouchers* biológicos (Figura 2; **Kageyama, et al.**, 2006); es posible inferir que un porcentaje mayoritario de los reportes de mamíferos contenidos en estos estudios, no están sustentados en evidencia biológica verificable o refutable.

Esta investigación no pretende sugerir que la recolecta científica es la mejor o única alternativa para garantizar trazabilidad, confiabilidad y el uso futuro de los registros obtenidos en las caracterizaciones bióticas. Existen otros tipos de evidencia biológica (e.g. piel, pelos o tejido; fluido preservado: sangre, otros; registro fotográfico; registro en video; grabación acústica; heces; impresiones de huellas), que pueden cumplir a cabalidad como *Vouchers* biológicos de los muestreos (sensu **Kageyama, et al.**, 2006), sin implicar el sacrificio de los organismos. El aspecto crucial en todos los casos, es aportar información espacial y temporal asociada al registro biótico y la mayor cantidad de evidencia susceptible de verificación, que pueda reunirse, preservarse y consultarse. En este sentido, todo tipo de *Voucher* biológico obtenido en este tipo de estudios, debería ser depositado en colecciones biológicas de referencia científica, para garantizar su acceso y uso futuro.

Conclusiones

La mayoría de los estudios de la mastofauna presentados para el otorgamiento de licencia ambiental a los 43 proyectos de hidrocarburos analizados en esta investigación, no brindan evidencia biológica susceptible de verificación (i.e. *Vouchers* sensu **Kageyama, et al.**, 2006), que permita poner a prueba su veracidad o revisar la identidad y características de los organismos registrados. Bajo estas circunstancias, la información entregada en estos inventarios rápidos pierde confiabilidad y se ve limitada la posibilidad de uso, revisión o reinterpretación en investigaciones futuras (e.g. patrones de distribución y actualización de listas de especies).

Si esta condición resulta ser un rasgo común en las caracterizaciones de la fauna que se presentan para el otorgamiento de licencias ambientales a proyectos en Colombia, se está derrochando una oportunidad única para el conocimiento de la diversidad biológica del país. La información biótica incluida en los EIAs tiene un potencial enorme, por su cobertura espacial en el territorio colombiano, el número de

proyectos que se licencian anualmente (e.g. 180 en 2014, según **ANLA**, 2015) y la singularidad de los sitios donde se desarrollan los muestreos de la biota.

Los hallazgos de este trabajo sugieren que la toma de decisiones acerca de la viabilidad ambiental de los proyectos de hidrocarburos en Colombia, se hace sobre la base de caracterizaciones de mamíferos que guardan un grado importante de incertidumbre, en términos de la identidad y características de los taxones registrados.

En este sentido, las autoridades ambientales y la comunidad académica, deben dirigir esfuerzos hacia la reglamentación y educación, sobre la necesidad de aportar evidencia biológica verificable en las caracterizaciones bióticas, de manera que se garantice la trazabilidad de la información y su disponibilidad a futuro para la comunidad científica y el público general (**Schilthuisen, et al.**, 2015, **Turney, et al.**, 2015).

Son apremiantes más trabajos de investigación dirigidos a evaluar de manera continua, la calidad de los estudios y la información presentada en el marco del otorgamiento de licencias ambientales (e.g. **Lee & Colley**, 1990, **Warren & Buckley**, 1998, **Gray & Jones**, 1999, **Atkinson, et al.**, 2000, **Byron, et al.**, 2000, **Mandelik, et al.**, 2005, **Bataineh**, 2007, **Khera & Kumar**, 2010, **Gómez-Sandoval**, 2015; **Hallat, et al.**, 2015). Estos esfuerzos pueden contribuir en los procesos de mejora continua del sistema de otorgamiento de licencias ambientales colombiano y ayudar a detectar puntos débiles en los instrumentos reglamentarios, los procesos de evaluación, la preparación de los EIAs y los métodos comúnmente empleados para el desarrollo de los estudios ambientales.

Información suplementaria

Anexo 1. Información de 43 proyectos de hidrocarburos licenciados en Colombia durante el año 2014. Vea el anexo 1 en: <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SupFile/439/1809>

Anexo 2. Taxones por tipo de registro biológico, reportados en 43 estudios de mamíferos desarrollados para el licenciamiento ambiental de proyectos de hidrocarburos en Colombia. Vea el anexo 2 en: <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SupFile/439/1810>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), por su colaboración y diligencia durante la recopilación de la información sobre la que se sustenta esta investigación. Este texto publica parte de los resultados obtenidos en la tesis de maestría titulada: “Evaluación de los estudios de mamíferos realizados para el

licenciamiento ambiental de proyectos de hidrocarburos en Colombia” (Gómez-Sandoval, 2015). Finalmente, valoramos las observaciones de los pares revisores, que contribuyeron a depurar la versión final de este artículo.

Referencias

- Autoridad Nacional de Licencia Ambientales-ANLA.** (2012). Informe de Gestión 2012. Bogotá, D.C. Recuperado de <http://www.anla.gov.co/informes-gestion-autoridad-nacional-licencias-ambientales-anla>
- Autoridad Nacional de Licencia Ambientales-ANLA.** (2014). Informe de Gestión 2013. Bogotá, D.C. Recuperado de <http://www.anla.gov.co/informes-gestion-autoridad-nacional-licencias-ambientales-anla>
- Autoridad Nacional de Licencia Ambientales-ANLA.** (2015). Informe de Gestión 2014. Bogotá, D.C. Recuperado de <http://www.anla.gov.co/informes-gestion-autoridad-nacional-licencias-ambientales-anla>
- Autoridad Nacional de Licencia Ambientales-ANLA.** (2015). Informe de Gestión 2015. Bogotá, D.C. Recuperado de <http://www.anla.gov.co/informes-gestion-autoridad-nacional-licencias-ambientales-anla>
- Autoridad Nacional de Licencia Ambientales-ANLA.** (2015). Resolución N° 0173 del 17 de febrero de 2015 “Por la cual se regula el cobro de copias expedidas por la Entidad”. Bogotá D.C.
- Atkinson, S.F., Bhatia, S., Schoolmaster, F.A., Waller, W.T.** (2000). Treatment of biodiversity impacts in a sample of US environmental impact statements. *Impact Assessment and Project Appraisal*. **18**: 271-282.
- Bataineh, R.H.** (2007). The effectiveness of the Environmental Impact Assessment (EIA) follow-up with regard to biodiversity conservation in Azerbaijan. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. **18**: 591-596.
- Boyles, J.G., Cryan, P.M., Mccracken, G.F., Kunz, T.H.** (2011). Economic importance of bats in agriculture. *Science*. **332**: 41-42.
- Byron, H.J., Treweek, J.R., Sheate, W.R., Thompson, S.** (2000). Road developments in the UK: An analysis of ecological assessment in Environmental Impact Statements produced between 1993 and 1997. *Journal of Environmental Planning and Management*. **43** (1): 71-97.
- Castaño, J. H. & Corrales, J.D.** (2010). Mamíferos de la cuenca del río La Miel (Caldas): diversidad y uso cultural. *Boletín Científico Centro de Museos. Museo de Historia Natural*. **14**: 56-75.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R.** (2009). Discoveries of new mammal species and their implications for conservation and ecosystem services. *Proceedings from the National Academy of Sciences*. **106**: 3841-3846.
- Fleming, T.H., Geiselman, C., Kress, W.J.** (2009). The evolution of bat pollination: a phylogenetic perspective. *Annals of Botany*. **104**: 1017-1043.
- Funk, V.A., Hoch, P.C., Prather, A.L., Wagner, W.L.** (2005). The importance of vouchers. *Taxon*. **54**: 127-129.
- Gómez Sandoval, P.A.** (2015). Evaluación de los estudios de mamíferos realizados para el licenciamiento ambiental de proyectos de hidrocarburos en Colombia. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Gray, I.M., Jones, E.G.** (1999). A review of the quality of environmental impact assessments in the Scottish forestry sector. *Forestry*. **72**: 1-10.
- Hallat, T.W., Retief, F.P., Sandham, L.A.** (2015). The quality of biodiversity inputs to EIA in areas with high biodiversity value - Experience from the Cape Floristic Region, South Africa. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. **17** (3): 1550025-1-1550025-26.
- Isasi-Catalá, E.** (2011). Los conceptos de especies indicadoras, paraguas, banderas y claves: su uso y abuso en ecología de la conservación. *Interciencia*. **36** (1): 31-38
- Kageyama, M., Monk, R., Bradley, R., Edson, G., Baker, R.** (2006). The changing significance and definition of the biological voucher. En S. Williams & C. Hawks (ed.). *Museum studies: perspectives and innovations*. (pp. 259-266). Washington: Society for the Preservation of Natural History Collections.
- Khera, N., Kumar, A.** (2010). Inclusion of biodiversity in environmental impact assessments (EIA): a case study of selected EIA reports in India. *Impact Assessment and Project Appraisal*. **28** (3): 189-200.
- King, N., Rajvanshi, A., Willoughby, S., Roberts, R., Mathur, V.B., Cadman, M., Chavan, V.** (2012). Improving access to biodiversity data for, and from, EIAs – a data publishing framework built to global standards. *Impact Assessment and Project Appraisal*. **30** (3): 148-156.
- Kunz, T.H., de Torre, E.B., Bauer, D., Lobova, T., Fleming, T.H.** (2011). Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*. **1223** (2011): 1-38.
- Lee, N., Colley, R.** (1990). Reviewing the quality of environmental statements. *Occasional Paper 24*. Department of Planning and Landscape. University of Manchester. Manchester.
- Liévano Latorre, L.F., López Arévalo, H.F.** (2015). Comunidad de mamíferos no voladores en un área periurbana andina, Cundinamarca, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **20**: 193-202.
- Mandelik, Y., Dayan, T., Feitelson, E.** (2005). Planning for biodiversity: the role of ecological impact assessment. *Conservation Biology*. **19**: 1254-61.
- Martin, N.A.** (1990). Voucher specimens: a way to protect the value of your research. *Biology and Fertility of Soils*. **9**: 93-94.
- Medrano Nájera, R., Ramírez Pinero, M., Guevara Sada, S.** (2014). Una mirada a la dispersión de semillas en las excretas de mamíferos. *Cuadernos de Biodiversidad*. **46** (2014): 19-28.
- Mejía Correa, S., Díaz-Martínez, J.A.** (2009). Primeros registros e inventario de mamíferos grandes y medianos en el Parque Nacional Munchique, Colombia. *Mesoamericana*. **13**: 7-22.
- Ministerio del Ambiente - MINAM.** (2015). Guía de inventario de la fauna silvestre. Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 83 p.m
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS.** (2015). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 653 p.
- Morales-Martínez, D.M., Suárez-Castro, A.F.** (2014). New records for *Glyphonycteris* Thomas, 1896 (Chiroptera: Phyllostomidae) from Colombia. *Check List*. **10**: 639-644.
- Patton, J.L., Berlin, B., Berlin, E.A.** (1982). Aboriginal perspectives of a mammal community in Amazonian Perú: knowledge and utilization patterns among the Aguaruna Jivaro. En: Mares, M. A. & Genoways, H. H. (ed.).

- Mammalian Biology in South America. (pp. 111-128). Pymatuning Symposia in Ecology 6. Special Publication Series. Pymatuning Laboratory of Ecology. University of Pittsburgh. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Pitman, N., Vriesendorp, C., Alvira, D., Markel, J.A., Johnston, M., Ruelas Inzunza, E., Lancha Pizango, A., Sarmiento Valenzuela, G., Álvarez-Loayza, P., Homan, J., Wachter, T., del Campo, Á., Stotz, D.F., Heilpern, S. (ed.).** (2014). Peru: Cordillera Escalera - Loreto. Rapid Biological and Social Inventories Report 26. The Field Museum. Chicago.
- Polanco-Ochoa, R., Jaimes, V., Piragua, W.** (2000). Los mamíferos del Parque Nacional Natural La Paya, Amazonía colombiana. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **23** (suplemento especial): 671-682.
- Proulx, G., Drescher, R.K.** (1993). Distribution of the Long-tailed Weasel, *Mustela frenata longicauda*, in Alberta as Determined by Questionnaires and Interviews. Canadian Field Naturalist. **107**: 186-191.
- Ramírez-Chaves, H.E., Ortega-Rincón, M., Pérez, W.A., Marín, D.** (2011). Historia de las especies de mamíferos exóticos en Colombia. Boletín Científico Centro de Museos. Universidad de Caldas. **15** (2): 139-156.
- Ramírez-Chaves, H., Suárez-Castro, A.F.** (2014). Adiciones y cambios a la lista de mamíferos de Colombia: 500 especies registradas para el territorio nacional. Notas Mastozoológicas. Sociedad Colombiana de Mastozología. **1** (2): 31-34.
- Ramírez-Chaves, H., Suárez-Castro, A.F., González-Maya, J.F.** (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. Mammalogy Notes | Notas Mastozoológicas. **3** (1): 1-9.
- Regan, E.C., Santini, L., Ingwall-King, L., Hoffmann, M., Rondinini, C., Symes, A., Taylor, J., Butchart, S.H.M.** (2015). Global Trends in the Status of Bird and Mammal Pollinators. Conservation Letters. **8** (6): 397-403.
- Sánchez, F., Sánchez-Palomino, P., Cadena, A.** (2004). Inventario de mamíferos en un bosque de los Andes centrales de Colombia. Caldasia. **26**: 291-309.
- Schilthuizen, M., Vairappan, C.S., Slade, E.M., Mann, D.J., Miller, J.A.** (2015). Specimens as primary data: museums and open science. Trends in Ecology and Evolution. **30** (5): 237-238.
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J.V., Defler, T., Ramírez-Chaves, H., Trujillo, F.** (2013). Riqueza, Endemismo y Conservación de los Mamíferos de Colombia. Mastozología Neotropical. **20** (2): 301-365.
- Suarez-Castro, A., Ramírez-Chavez, H., Rodríguez-Posada, M., García, J.** (2012). New records of *Peropteryx leucoptera* and first record of *Peropteryx pallidoptera* (Chiroptera-Emballonuridae) from Colombia. Mastozología Neotropical. **19**: 165-171.
- Turney, S., Cameron, E.R., Cloutier, C.A., Buddle, C.M.** (2015). Non-repeatable science: assessing the frequency of voucher specimen deposition reveals that most arthropod research cannot be verified. PeerJ. **3**: e1168.
- Voss, R.S., Emmons, L.H.** (1996). Mammalian diversity in neotropical lowland rainforests: a preliminary assessment. Bulletin of the American Museum of Natural History. New York. **230**: 1-115.
- Voss, R.S., Lunde, D.P., Simmons, N.B.** (2001). The Mammals of Paracou, French Guiana: a Neotropical lowland rainforest fauna. Part 2. Nonvolant species. Bulletin of the American Museum of Natural History. **263**: 1-236.
- Vriesendorp, C., Álvarez, J.A., Barbagelata, N., Alverson, W.S., Moskovits, D.K. (ed.).** (2007). Perú: Nanay, Mazán, Arabela. Rapid Biological Inventories Report 18. The Field Museum. Chicago.
- Warnken, J., Buckley, R.** (1998). Scientific quality of tourism environmental impact assessment. Journal of Applied Ecology. **35**: 1-8.
- Wheeler, T.A.** (2003). The role of voucher specimens in validating faunistic and ecological research. Biological Survey of Canada (Terrestrial Arthropods). Document Series. **9**: 1-21.
- Zapata-Ríos, G., Araguillín, E., Jorgueson, J.P.** (2006). Caracterización de la comunidad de mamíferos no voladores en las estribaciones orientales de la Cordillera del Kutukú, Amazonía Ecuatoriana. Mastozología Neotropical. **13** (2): 227-238.

A new species of *Rhytidhysterion* (Ascomycota: Patellariaceae) from Colombia, with a provisional working key to known species in the world

Edier Soto-Medina^{1,*}, Robert Lücking²

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Valle, Cali, Colombia

²Botanischer Garten und Botanisches Museum, Berlin, Germany

Abstract

We describe a new species, *Rhytidhysterion columbiense* Soto-Medina & Lücking, from Colombia. It is a saprobic species found on decaying branches in montane rain forest remnants, characterized by boat-shaped ascomata up to 3 mm long and 1.8 mm wide, with brown-black disc and yellowish-green pruina, perpendicularly striate margins, and by 3-septate, ellipsoid to fusiform, red-brown ascospores $38\text{--}52 \times 13\text{--}18 \mu\text{m}$ in size. The new species differs from all other species in the genus by the yellowish-green pruina on the margins of the ascomata and from *R. rufulum* s.lat. also in the larger ascospores, whereas *R. brasiliense* has similarly long ascospores, but differs in their broader width and their pigmentation, as they remain light brown at maturity. A provisional working key to known species of the genus in the world is provided based on literature data. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: *Rhytidhysterion*; Ascospore; Pruina; Colombia.

Una nueva especie de *Rhytidhysterion* (Ascomycota:Patellariaceae) de Colombia, con una clave provisional para las especies conocidas en el mundo

Resumen

Se describe la nueva especie *Rhytidhysterion columbiense* Soto-Medina & Lücking para Colombia. Es una especie saprobica encontrada sobre ramas en descomposición en remanentes de bosque montano lluvioso; se caracteriza por ascomas en forma de canoa de cerca de 3 mm de longitud y 1,8 mm de ancho, con disco marrón negruzco y pruina verde amarillosa, márgenes estriados perpendicularmente, y tres esporas septadas, elipsoides a fusiformes, marrón rojizas, de $38\text{--}52 \times 13\text{--}18 \mu\text{m}$ de tamaño. Esta nueva especie difiere de las otras del género por la pruina verde amarillosa sobre los márgenes del ascoma, y de *R. rufulum* s.lat. por las esporas más grandes, mientras que *R. brasiliense* tiene las esporas grandes, pero difiere por sus ascosporas más anchas y por su pigmentación, que es de color pardo claro en la madurez. Se agrega una clave provisional para las especies del género en el mundo con base en datos de la literatura. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: *Rhytidhysterion*; Ascospora; Pruina; Colombia.

Introduction

Rhytidhysterion is a small genus of about 20 species typified by *R. brasiliense* Speg. (Spegazzini, 1881; Silva-Hanlin & Hanlin, 1999). The genus includes saprobic to weakly pathogenic fungi growing on woody plants, well-characterized by its rather large, conspicuous ascomata, which are usually elongate and boat-shaped and feature a prominent, perpendicularly striate margin, in combination with pigmented, sparsely septate to submuriform ascospores. The genus appears to have a subcosmopolitan distribution, with species described from all continents (Spegazzini, 1881; Rosatto, 1996; Hsieh, et al., 1997; Tanaka & Hosoya, 2006; Murillo, et al., 2009; Méndez-Mayboca, et al., 2010; Almeida, et al., 2014; Yacharoen, et al., 2015; Doilom, et al., 2016; Thambugala, et al., 2016). *Rhytidhysterion* has

received attention for its secondary chemistry (Murillo, et al., 2009; Pudhom & Teerawatananond, 2014; Pudhom, et al., 2014; Chokpaiboon, et al., 2016) and the human-pathogenic properties detected in some species (Spatafora, et al., 1995; Wipf, et al., 2004; Chowdhary, et al., 2008; Mahajan, et al., 2014; Mishra, et al., 2014; Chander, et al., 2016).

The genus was revised by Samuels & Müller (1980), who reduced the 11 names listed in the genus at the time to only two species, namely *R. rufulum* (Spreng.) Speg. (with *R. brasiliense* as synonym) and *R. hysterinum* (Dufour) Samuels & E. Müll. However, it was later shown that

*Correspondencia:

Edier Alberto Soto Medina, ediersot@gmail.com

Recibido: 16 de octubre de 2016

Aceptado: 15 de marzo de 2017

their conclusions were based on superficial observations or ignorance of the character of the corresponding type specimens, including ascoma morphology and ascospore size (Kutorga & Hawksworth, 1997; Thambugala, *et al.*, 2016). Further studies including molecular and chemical data indicated that *Rhytidhysterion* is more diverse than assumed and that *R. rufulum* is species complex (Boehm, *et al.*, 2009; Murillo, *et al.*, 2009; Yacharoen, *et al.*, 2015; Doilom, *et al.*, 2016; Thambugala, *et al.*, 2016). As a result, about 20 species are currently recognized, but based on the rather local studies by Murillo, *et al.* (2009) in Costa Rica and Doilom, *et al.* (2016) and Thambugala, *et al.* (2016) in Thailand, many more species are to be expected in this genus. Here we describe a new species discovered in Colombia, which even without the support of molecular data differs from all other accepted species, featuring large ascomata and the longest ascospores known in the genus and a unique ascoma morphology, with yellowish-green-pruinose margins.

Materials and methods

Material was collected during a field trip to Cerro San Antonio in a mountainous area of Cali, as part of the III Meeting of the Colombian Group of Lichenologists (GCOL). This locality, also known as Cerro de la Horqueta, is 22 km from the city of Cali, at an altitude of 2000–2200 m, with the coordinates 76°58'N and 03°29'W. The Cerro San Antonio is characterized by a rather well-preserved montane forest and has been the subject of several studies of flora (Alvarez, *et al.*, 1987).

We took pictures of the fungus both in the field and the laboratory with a Nikon D3100 and a Canon PowerShot SX160 digital camera. Ascomata sections were mounted for microscopic identification in a water medium. Measurements of ascomata, hamathecium, exciple, ascospores and asci were made in water. Photographs of the hamathecium, exciple, and ascospores, were taken with an Olympus microscope and Canon PowerShot SX160 camera. The material was deposited in the herbarium of the universidad del Valle.

Results

Rhytidhysterion columbiense Soto-Medina & Lücking, *sp. nov.* Figure 1. Index Fungorum IF552900

Diagnosis. A new species similar to *Rhytidhysterion brasiliense*, particularly in ascospore size, but differing in the larger ascomata with yellowish-green pruinose on the margin.

Type. COLOMBIA. Valle del Cauca: Cali, Cerro de San Antonio (Horqueta); 76°58'14"N, 5°44'55"W, 2000–2200 m; on fallen, decaying woody branch; April 2013, E. A. Soto-Medina & R. Lücking s.n. (holotype CUVV 62421).

Etymology. The species epithet, *columbiense*, refers to the country where the material was collected.

Description. Saprobic on decaying branches in montane rain forest remnants. *Ascomata* 1.5–(2.66)–3.0 mm long, 1.2–

(1.59)–1.8 mm wide, 0.6–0.7 mm high (n = 14), hysterothecial, boat-shaped, crowded to aggregate, superficial, brown-black but with distinct, yellowish-green pruina on the margins, with exposed, lenticular to irregular, brown-black disc when wet, folded along the margins when dry and forming an elongate slit, perpendicularly striate. *Exciple* 60–90 µm wide (n = 8), composed of dark brown to black, thick-walled cells of *textura angularis*. *Hamathecium* comprised of dense, septate pseudoparaphyses, branched and forming a dark epithecium above the asci, fused and slightly swollen at the apex and enclosed in a gelatinous matrix. *Asci* 175–190 × 14–18 µm, 6–8-spored, bitunicate, cylindrical, with short, furcate pedicel, rounded at the apex, with distinct ocular chamber. *Ascospores* 38–(43.5)–52 × 13–(14.7)–18 µm (n = 17), uniseriate, slightly overlapping, hyaline when immature, becoming reddish-brown when mature, ellipsoidal to fusiform, rounded to slightly pointed at both ends, (1–)3-septate, with smooth wall. *Asexual morph*: not observed.

Discussion

Except for medical and chemical studies or studies relating to economically important crops (Pena, 1967; Restrepo, 1970; Chaparro, *et al.*, 2009; Vega, *et al.*, 2010), ascomycetous fungi have received little attention in Colombia, with only a few reports of conspicuous families such as Cordycipitaceae, Nectriaceae, Sarcoscyphaceae, and Xylariaceae. This is actually the first report of the genus *Rhytidhysterion* and the family Patellariaceae for Colombia (Vazco & Franco Molano, 2014), and it is striking that this first find resulted in the discovery of a species new to science.

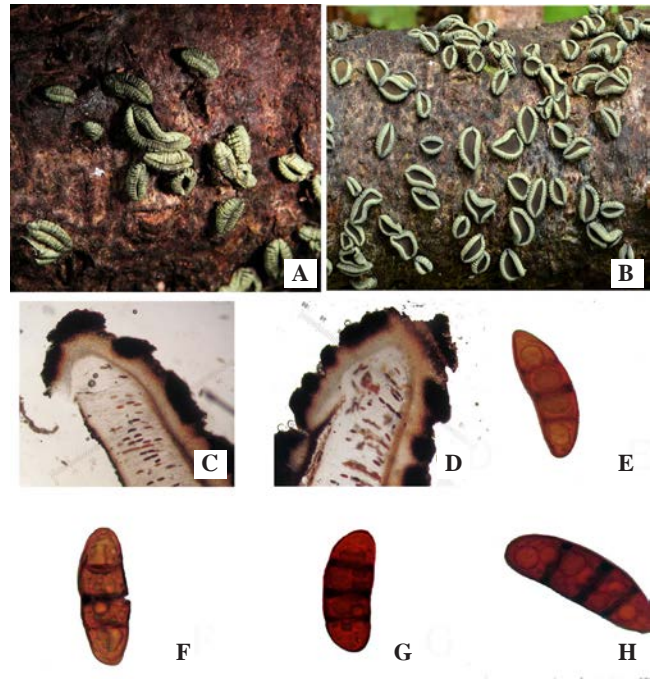


Figure 1. Dry Ascomata of *Rhytidhysterion columbiense* A, appearance of hysterothecia on host B, Hamathecium detail and striations C, asci with ascospores D, ascospores E-H.

Rhytidhysterion columbiense agrees with most other species in the genus in the more or less boat-shaped, sessile ascomata with a perpendicularly striate margin. This combination of characters is also found in *R. rufulum*, which has recently been shown to be a collective taxon including several species (Murillo, et al., 2009; Thambugala, et al., 2016). However, *R. columbiense* is not another segregate of the *R. rufulum* aggregate, since it differs from the latter in important features. All species or lineages currently distinguished in the *R. rufulum* aggregate have ascomata with non-pruinose, black margins and either black or colored (red-brown to orange) disc, quite different from the yellow-green pruinose margins and non-pruinose, brown-black disc in *R. columbiense*. The only exception is material of *R. rufulum* s.lat. reported from Japan and Taiwan (Hsieh, et al., 1997; Tanaka & Hosoya, 2006), which exhibits chocolate-brown discs combined with a grey margin [http://chawantake.sakura.ne.jp/data/Rhytidhysterion_rufulum.html; <http://old.taibif.tw/en/namecode/140476>] and almost certainly represents an undescribed taxon. In addition, ascospores in species of the *R. rufulum* aggregate are 20–37 × 7–14 µm in size, whereas in *R. columbiense* they are much larger, 38–52 × 13–18 µm. Thus far, only two species of *Rhytidhysterion* are known with ascospores of a similar, large size: *R. brasiliense* has entirely black, non-pruinose ascomata and its ascospores are slightly broader and lack the characteristic red tinge of those of *R. columbiense* (Spegazzini, 1881; Kutorga & Hawksworth, 1997; Thambugala, et al., 2016); *R. dissimile* (P. Karst.) Magnés also features black, non-pruinose ascomata and has predominantly 5-septate ascospores that remain yellowish.

Even without molecular data, this finding highlights the urgent need for a deeper study of microfungi in Colombia, which are supposed to be much more diverse than macrofungi, but their potential richness in the country has barely been addressed by taxonomic study and hence their potential importance and uses cannot be currently assessed. In addition, this result supports the notion that microfungi are an important source for unrecognized species richness, and the genus *Rhytidhysterion* appears to be a prime example how such diversity has not previously been recognized, with potentially dozens of species waiting to be discovered. This is of particular interest considering the potential chemical and medical implications of fungi in this genus (Spatafora, et al., 1995; Wipf, et al., 2004; Chowdhary, et al., 2008; Murillo, et al., 2009; Mahajan, et al., 2014; Mishra, et al., 2014; Pudhom & Teerawatananond, 2014; Pudhom, et al., 2014; Chander, et al., 2016; Chokpaiboon, et al., 2016).

Provisional working key to known species of *Rhytidhysterion* in the world. In the following key, all currently listed names in the genus *Rhytidhysterion* are keyed out, with the exception of *R. minor* (Cooke) A. Pande [comb. inval.], which likely represents a species of *Opegrapha*, and *R. viride* Speg. (Spegazzini 1881), which appears to be an unrelated lichenicolous fungus; the taxonomic affinities of *R. beccarianum* (Ces.) Bat. & Valle are also uncertain

although it is included below. The key provides access to the taxa thus far assigned to *Rhytidhysterion* but does not conform a taxonomic revision.

1a. Ascospores submuriform, with 3–5 transverse and 0–3 longitudinal septa per segment; ascomata with red-brown disc and black margins; type: U.S.A. ***R. opuntiae*** (J.G. Br.) M.E. Barr (Brown, 1953; Barr, 1990)

1b. Ascospores transversely (1–)3(–5)-septate; ascomata variable 2

2a. Ascospores partially 5-septate, 30–46 × 12–20 µm; ascomata black with black, striate margins; type: Finland ***R. dissimile*** (P. Karst.) Magnés (Karsten, 1866; Magnés, 1997)

2b. Ascospores at most 3-septate, variously sized; ascomata variable 3

3a. Ascospores consistently 1-septate, 20–28 × 12–15 µm; ascomata (red-)brown with brown margins; type: France ***R. hysterinum*** (Dufour) Samuels & E. Müll. (Samuels & Müller, 1980)

4a. Ascospores 38–52 × 13–21 µm 5

4b. Ascospores (12–)19–37 × (5–)8–14 µm 6

5a. Ascomata brown-black with yellow-green, striate margins; ascospores red-brown; type: Colombia ***R. columbiense*** Soto-Medina & Lücking (this paper)

5b. Ascospores black with black, striate margins; ascospores brown; type: Brazil ***R. brasiliense*** Speg. (Spegazzini, 1881)

6a. Ascospores 12–15 × 5–6 µm; ascomata brown with olive margins; type: Sri Lanka ***R. beccarianum*** (Ces.) Bat. & Valle (Batista & Maia, 1964)

6b. Ascospores 19–37 × 7–14 µm 7

7a. Ascoma disc (brown-)black or grey with (brown-)black margin 8

7b. Ascoma disc yellow- to red-brown or cinnabar-red with (brown-)black margin 13
Notes. If ascoma disc chocolate-brown with grey margins, see Hsieh, et al. (1997) and Tanaka & Hosoya (2006), which represents an undescribed species.

8a. Ascoma disc slate grey to dark grey 9

8b. Ascoma disc (brown-)black 10

9a. Ascoma margins striate; ascospores 25–30 × 12–14 µm, about 2 times as long as broad; type: U.S.A. ***R. fuscum*** (Ellis & Everh.) J.L. Bezerra & Kimbr. (Ellis, 1889; Ellis & Everhart, 1892; Bezerra & Kimbrough, 1979)

9b. Ascoma margins smooth; ascospores 30–32 × 10–12 µm, about 3 times as long as broad; type: India ***R. indicum*** (Anahosur) M.P. Sharma & K.S. Thind (Anahosur, 1971; Sharma & Rawla, 1986)

10a. Ascospores 30–37 × 10–14 µm; ascoma margins striate 11

10b. Ascospores 20–31 × 9–12 µm; ascoma margins variable 12

11a. Ascospores with reddish tinge; ascomata up to 2 mm long; type: Indonesia (Java) ***R. javanicum*** Penz. & Sacc. (Penzig & Saccardo, 1897)

11b. Ascospores lacking reddish tinge; ascomata up to 4 mm long; type: Paraguay *R. guaraniticum* Speg. (**Spegazzini**, 1888)

Notes. *Rhytidhysterion* clade II from Costa Rica in the study of **Murillo, et al.** (2009) appears to belong to this taxon; it agrees in ascoma morphology and ascospore size.

12a. Ascomata margins striate; ascospores brown; type: U.S.A. *R. prosopidis* Peck (**Peck**, 1894)

12b. Ascoma margins smooth; ascospores yellowish brown; type: Thailand *R. thailandicum* Thambug. & K.D. Hyde (**Thambugala, et al.**, 2016)

13a. Ascoma margin striate; ascoma disc orange- to red-brown (*R. rufulum* complex) 14

13b. Ascoma margin smooth; ascoma disc yellow-brown or orange to cinnabar-red without brown tinge 17

14a. Ascospores 23–24 × 8–9 µm; material: Costa Rica *R. clade IV* (**Murillo, et al.**, 2009)

Notes. *Rhytidhysterion* clade IV from Costa Rica in the study of **Murillo, et al.** (2009) was considered to represent genuine *R. rufulum* but the ascospores are too small for that species; instead, clade III fits *R. rufulum* well (see below). If disc cinnabar-red, compare *R. quercinum* (see below).

14b. Ascospores 25–36 × 8–13 µm 15

15a. Ascospores 25–27 × 10–12 µm; ascospores dark brown; type: Australia *R. scortechinii* Sacc. & Berl. (**Saccardo & Berlese**, 1885)

15b. Ascospores 28–36 × 9–13 µm; ascospores (reddish-) brown 16

16a. Ascoma disc orange-brown; ascospores brown; type: Paraguay *R. discolor* (Speg.) Speg. (**Spegazzini**, 1880, 1919)

16b. Ascoma disc red-brown; ascospores reddish brown; type: Puerto Rico *R. rufulum* (Spreng.) Speg. (**Spengel**, 1820; **Spegazzini**, 1921)

Notes. *Rhytidhysterion* clade III from Costa Rica in the study of **Murillo, et al.** (2009) seems to represent genuine *R. rufulum*, not clade IV as suggested in that study.

17a. Ascoma disc yellow-brown 18

17b. Ascoma disc orange to cinnabar-red 19

18a. Ascospores 27–34 × 7–12 µm, about 3–4 times as long as broad; ascomata rather stout, up to 1.8 mm long and 1.3 mm broad; ascospores reddish brown; type: Thailand *R. neorufulum* Thambug. & K.D. Hyde (**Thambugala, et al.**, 2016)

18b. Ascospores 19–31 × 8–13 µm, about 2–3 times as long as broad; ascomata elongate, up to 3.4 mm long and 0.7 mm broad; ascospores dark brown; type: Thailand *R. tectonae* Doilom & K.D. Hyde (**Doilom, et al.**, 2016)

19a. Ascoma disc cinnabar-red; ascospores 19–25 × 7.5–11.5 µm; type: India *R. quercinum* (B.G. Desai & V.N. Pathak) M.P. Sharma & Rawla (**Desai & Pathak**, 1970; **Sharma & Rawla**, 1986)

19b. Ascoma disc orange; ascospores 28–37 × 9–14 µm; material: Costa Rica *R. clade I* (**Murillo, et al.**, 2009)

Notes. This clade likely represents an undescribed species.

Acknowledgements

The workshop and field trip during which the material was collected was organized as part of the annual symposium of the The Grupo Colombiano de Liquenología (GCOL). The participation of the second author in this even was supported by a grant from the National Science Foundation: *Neotropical Epiphytic Microlichens – An Innovative Inventory of a Highly Diverse yet Little Known Group of Symbiotic Organisms* (DEB 0715660 to The Field Museum; PI R. Lücking). The Universidad del Valle provided logistic support for the workshop and field trip.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

References

- Almeida, D. A. C., Gusmão, L. F. P. & Miller, A. N.** (2014) Brazilian Semi-Arid Ascomycetes I: New and interesting records of hysteriaceous ascomycetes. *Mycosphere*. **5**: 379-391.
- Álvarez, L. M., Piñeros, Z., Restrepo, C., Restrepo, J. H. & Velasco, E.** (1987) Propuesta para la protección del bosque de San Antonio. Centro de Datos para la Conservación CDC – CVC.
- Anahosur, K.H.** (1971; '1970') Ascomycetes of Coorg (India) II. *Sydowia*. **24**: 177-182.
- Barr, M. E.** (1990) Some dictyosporous genera and species of Pleosporales in North America. *Memoirs of the New York Botanical Garden*. **62**: 1-92.
- Batista, A. C. & Maia, H. da S.** (1964; '1963') Diversos Ascomycetes da Amazônia. Anais do Congresso Nacional da Sociedade Botânica do Brasil. **14**: 133-156.
- Bezerra, J. L. & Kimbrough, J. W.** (1979; '1978') A new species of *Tremella* on *Rhytidhysterium rufulum*. *Canadian Journal of Botany*. **56**: 3021-3033.
- Boehm, E. W. A., Mugambi, G. K., Miller, A. N., Huhndorf, S. M., Marincowitz, S., Spatafora, J. W. & Schoch, C. L.** (2009) A molecular phylogenetic reappraisal of the Hysteriaceae, Mytiliniaceae and Gloniaceae (Pleosporomycetidae, Dothideomycetes) with keys to world species. *Studies in Mycology*. **64**: 49-83.
- Brown, J. G.** (1953) A new species of *Hysterographium*. *Mycologia*. **45**: 964-967.
- Chander, J., Singla, N., Kundu, R., Handa, U. & Chowdhary, A.** (2016) Phaeohyphomycosis caused by *Rhytidhysterion rufulum* and review of literature. *Mycopathologia. ¿...? 1-5*.
- Chaparro, D. F., Rosas, D. C. & Varela, A.** (2009) Isolation of wood-decaying fungi and evaluation of their enzymatic activity (Quindío, Colombia). *Revista Iberoamericana de Micología*. **26**: 238-243.
- Chokpaiboon, S., Choodej, S., Boonyuen, N., Teerawatananond, T. & Pudhom, K.** (2016) Highly oxygenated chromones from mangrove-derived endophytic fungus *Rhytidhysterion rufulum*. *Phytochemistry*. **122**: 172-177.
- Chowdhary, A., Guarro, J., Randhawa, H. S., Gené, J., Cano, J., Jain, R. K., Kumar, S. & Khanna, G.** (2008) A rare case of chromoblastomycosis in a renal transplant recipient caused by a non-sporulating species of *Rhytidhysterion*. *Medical Mycology*. **46**: 163-166.

- Cooke, M. C. & Ellis, J. B.** (1877) New Jersey fungi. *Grevillea* **5**: 30-35, 49-55, 89-95.
- Desai, B. G. & Pathak, V. N.** (1970) A new *Trybliidiella* from India. *Sydowia*. **24**: 198-200.
- Doilom, M., Dissanayake, A. J., Wanasinghe, D. N., Boonmee, S., Liu, J. K., Bhat, D. J., Taylor, J. E., Bahkali, A. H., McKenzie, E. H. C. & Hyde, K. D.** (2016) Microfungi on *Tectona grandis* (teak) in Northern Thailand. *Fungal Diversity*: DOI:10.1007/s13225-016-0368-7.
- Ellis, J. B.** (1889) *Triblidium rufulum* (Sprengel). *Journal of Mycology*. **5**: 29-30.
- Ellis, J. B. & Everhart, B. M.** (1892) The North American Pyrenomycetes. A Contribution to Mycological Botany. Newfield, New Jersey.
- Hsieh, W. H., Chen, C. Y. & Sivanesan, A.** (1997) Some new ascomycetes from Taiwan. *Mycological Research*. **101**: 897-907.
- Karsten, P.** (1866) Enumeratio Fungorum et Myxomycetum in Lapponia orientale aestate 1861 lectorum. Notiser ur Sällskapet pro Fauna et Flora Fennica Förhandlingar. **8**: 193-224.
- Kutorga, E. & Hawksworth, D. L.** (1997) A reassessment of the genera referred to the family Patellariaceae (Ascomycota). *Systema Ascomycetum*. **15**: 1-110.
- Magnes, M.** (1997) Weltmonographie der Tribliidiaceae. *Bibliotheca Mycologica*. **165**: 1-177.
- Mahajan, V. K., Sharma, V., Prabha, N., Thakur, K., Sharma, N. L., Rudramurthy, S. M., Chauhan, P. S., Mehta, K. S. & Abhinav, C.** (2014) A rare case of subcutaneous phaeohyphomycosis caused by a *Rhytidhysterion* species: a clinico-therapeutic experience. *International Journal of Dermatology*. **53**: 1485-1489.
- Méndez-Mayboca, F., Checa, J., Esqueda, M. & Chacón, S.** (2010) New records of Loculoascomycetes from natural protected areas in Sonora, Mexico. *Mycotaxon*. **111**: 19-30.
- Mishra, K., Das, S., Goyal, S., Gupta, C., Rai, G., Ansari, M. A., Saha, R. & Singal, A.** (2014) Subcutaneous mycoses caused by *Rhytidhysterion* species in an immunocompetent patient. *Medical Mycology Case Reports*. **5**: 32-34.
- Murillo, C., Albertazzi, F. J., Carranza, J., Lumbsch, H. T. & Tamayo, G.** (2009) Molecular data indicate that *Rhytidhysterion rufulum* (ascomycetes, Patellariales) in Costa Rica consists of four distinct lineages corroborated by morphological and chemical characters. *Mycological Research*. **113**: 405-416.
- Pande, A.** (2008) *Ascomycetes of Peninsular India*. Jodhpur Scientific Publishers, India. 584 p.
- Peck, C. H.** (1894; '1893') Report of the Botanist (1892). Annual Report on the New York State Museum of Natural History. **46**: 85-149.
- Pena, C. E.** (1967) Deep mycotic infections in Colombia. A clinicopathologic study of 162 cases. *American Journal of Clinical Pathology*. **47**: 505-520.
- Penzig, A. J. O. & Saccardo, P. A.** (1897) Diagnoses fungorum novorum in insula Java collectorum. Ser. II. *Malpighia*. **11**: 491-530.
- Pudhom, K. & Teerawatananond, T.** (2014) Rhytidenones A-F, spirobisnaphthalenes from *Rhytidhysterion* sp. AS21B, an endophytic fungus. *Journal of Natural Products*. **77**: 1962-1966.
- Pudhom, K., Teerawatananond, T. & Chookpaiboon, S.** (2014) Spirobisnaphthalenes from the mangrove-derived fungus *Rhytidhysterion* sp. AS21B. *Marine Drugs*. **12**: 1271-1280.
- Restrepo, A.** (1970) Paracoccidioidomycosis (South American blastomycosis). A study of 39 cases observed in Medellín, Colombia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. **19**: 68-76.
- Rosatto, V. G.** (1996) Revisión de los Géneros *Patellaria* Fr. y *Rhytidhysterion* Speg. (Fungi: Ascomycetes) y Géneros Afines de la República Argentina. Doctoral Dissertation, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 166 p.
- Saccardo, P. A. & Berlese, A. N.** (1885) Fungi Australienses. *Miscellanea Mycologica*. **2**: 1-12.
- Samuels, G. J. & Müller, E.** (1980; '1979') Life-history studies of Brazilian ascomycetes 7: *Rhytidhysterion rufulum* and the genus *Eutrybliidiella*. *Sydowia* **32**: 277-292.
- Sharma, M. P. & Rawla, G. S.** (1986; '1985') Ascomycetes new to India – III. *Nova Hedwigia*. **42**: 81-90.
- Silva-Hanlin, D. M. & Hanlin, R. T.** (1999) Small subunit ribosomal RNA gene phylogeny of several loculoascomycetes and its taxonomic implications. *Mycological Research*. **103**: 153-160.
- Spatafora, J. W., Mitchell, T. G. & Vilgalys, R.** (1995) Analysis of genes coding for small-subunit rRNA sequences in studying phylogenetics of dematiaceous fungal pathogens. *Journal of Clinical Microbiology*. **33**: 1322-1326.
- Spezzini, C.** (1880) Fungi argentini. Pugillus primus. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*. **9**: 158-192.
- Spezzini, C.** (1881) Fungi argentini additis nonnullis brasiliensibus montevidensibusque. Pugillus quartus (Continuacion). *Anales de la Sociedad Científica Argentina*. **12**: 174-189.
- Spezzini, C.** (1888) Fungi Guaranitici. Pugillus II. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*. **26**: 5-74.
- Spezzini, C.** (1919; '1918') Reliquiae mycologicae tropicae. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba*. **23**: 365-541.
- Spezzini, C.** (1921) Mycetes chilenses. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba*. **25**: 1-124.
- Sprengel, K. P. J.** (1820) Plantarum cryptogamicarum tropicarum pugillus. *Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar*. **3** (8): 46-53.
- Tanaka, K. & Hosoya, T.** (2006) Some new records of Loculoascomycetes from Yakushima Island, southern Japan. *Bulletin of the National Science Museum, Series B (Botany)*. **32**: 151-160.
- Thambugala, K. M., Hyde, K. D., Eungwanichayapant, P. D., Romero, A. I. & Liu, Z. Y.** (2016) Additions to the Genus *Rhytidhysterion* in Hysteriaceae. *Cryptogamie Mycologie*: **37**: 99-116.
- Vasco-Palacios, A. M. & Franco-Molano, A. E.** (2013) Diversity of Colombian macrofungi (Ascomycota-Basidiomycota). *Mycotaxon*. **121**: 1-58.
- Vega, F. E., Simpkins, A., Aime, M. C., Posada, F., Peterson, S. W., Rehner, S. A., Infante, F., Castillo, A. & Arnold, A. E.** (2010) Fungal endophyte diversity in coffee plants from Colombia, Hawai'i, Mexico and Puerto Rico. *Fungal Ecology*. **3**: 122-138.
- Wipf, P., Lynch, S., Birmingham, A., Tamayo, G., Jiménez, A., Campos, N. & Powis, G.** (2004) Natural product based inhibitors of the thioredoxin–thioredoxin reductase system. *Organic and Biomolecular Chemistry*. **2**: 1651-1658.
- Yacharoen, S., Tian, Q., Chomnunti, P., Boonmee, S., Chukeatirote, E., Bhat, J. D. & Hyde, K. D.** (2015) Patellariaceae revisited. *Mycosphere*. **6**: 290-326.

Acción antioxidante conjunta de extractos etanólicos de *Mollinedia lanceolata*, *Croton leptostachyus* y *Siparuna sessiliflora*

Claudia C. Pérez-Jaramillo, Wilmer Fernando Sánchez-Peralta, Walter Murillo-Arango*, John J. Méndez-Arteaga

Grupo de Investigación en Productos Naturales-GIPRONUT, Departamento de Química,
Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Barrio Santa Helena Parte Alta, Ibagué, Colombia

Resumen

En los últimos años el daño oxidativo se ha detectado en enfermedades como el cáncer, la diabetes y el Alzheimer, entre otras. Como una alternativa para la prevención y tratamiento de tales enfermedades, se ha propuesto el consumo de antioxidantes, especialmente de fuentes vegetales; sin embargo, se ha estudiado poco el efecto de las mezclas de compuestos de naturaleza antioxidante o de matrices que los contienen. En este trabajo se evaluó el potencial antioxidante de extractos y mezclas de *Mollinedia lanceolata* (Monimiaceae), *Siparuna sessiliflora* (Siparunaceae) y *Croton leptostachyus* (Euphorbiaceae). Se prepararon extractos etanólicos crudos de las tres plantas previamente caracterizados mediante procedimientos de fitoquímica. Se hicieron pruebas antioxidantes indirectas con el radical 1,1-difenil-2-picrilhidracilo (DPPH) y el catión del ácido 2,2'-azino-bis 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS), se determinaron las concentraciones de inhibición media (CI_{50}) usadas como base para la preparación de mezclas en una proporción de uno a uno con todos los extractos y se evaluó de nuevo su actividad antioxidante y antihemolítica, así como su índice de combinación con el programa de acceso libre CompuSyn. En los especímenes de estudio se hallaron polifenoles, taninos, flavonoides, terpenos, esteroides y alcaloides. El extracto más activo en la estabilización del radical DPPH fue el de *C. leptostachyus* ($CI_{50} = 53,5 \pm 1,1$ mg/l) y en la del ABTS, el de *M. lanceolata* ($CI_{50} = 128,8 \pm 0,9$ mg/l). Todas las mezclas actuaron de manera sinérgica para estabilizar el DPPH con índices de combinación (IC) mayores de uno, en tanto que en el caso del ABTS las mezclas fueron antagonísticas (IC > 1), excepto la de *M. lanceolata* y *S. sessiliflora* (IC < 1). Ninguno de los extractos presentó efecto antihemolítico manifestado en mayores tasas de hemólisis, especialmente en las mezclas. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Actividad antioxidante; Extractos vegetales; Acción conjunta; Sinergismo; Antagonismo; Monimiaceae; Euphorbiaceae; Siparunaceae.

Joint antioxidant action of ethanolic extracts of *Mollinedia lanceolata*, *Croton leptostachyus* and *Siparuna sessiliflora*

Abstract

In recent years, oxidative damage has been associated with diseases such as cancer, diabetes and Alzheimer, among others. The consumption of antioxidants, especially from vegetable sources, has been proposed as an alternative for prevention and treatment; however, few studies have been conducted on the effect of mixtures of antioxidant compounds or matrices that include them. In this study we used crude extracts and mixtures of extracts from *Mollinedia lanceolata*, *Siparuna sessiliflora* and *Croton leptostachyus*. We prepared crude ethanolic extracts from the three plants previously characterized with phytochemical procedures. We performed indirect antioxidant tests with the DPPH and ABTS radicals, we determine the various IC_{50} used as the basis for preparing 1:1 mixtures with all the extracts and we reassess their antioxidant and antiemolitic activity, as well as their combination index using the free-access software CompuSyn. We found polyphenols, tannins, flavonoids, terpenes, steroids and alkaloids. The most active extract in the stabilization of the DPPH radical was *C. leptostachyus* ($IC_{50} = 53.5 \pm 1.1$ mg/l) and of ABTS, *M. lanceolata* ($IC_{50} = 128.8 \pm 0.9$ mg/l). All mixtures acted in synergy to stabilize DPPH with combination indices (CI) higher than 1, whereas in ABTS mixtures they were antagonistic (CI > 1), except for *M. lanceolata* + *S. sessiliflora* (CI < 1). None of the extracts presented an antihemolytic effect manifested in higher hemolysis rates, especially in the mixtures. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Antioxidant activity; Plant extracts; Joint action; Synergism; Antagonism; Monimiaceae; Euphorbiaceae; Siparunaceae.

*Correspondencia: Walter Murillo Arango, wmurillo@ut.edu.co; Recibido: 19 de octubre de 2016; Aceptado: 14 de febrero de 2017

Introducción

En un intento constante por mejorar la calidad de vida, se han utilizado plantas como fuente de alimento, abrigo, ropa, medicinas y cosméticos; algunas de estas presentan un amplio potencial medicinal, convirtiéndose en el único recurso terapéutico de las comunidades y grupos étnicos especialmente en América del Sur, contribuyendo de manera significativa a la atención primaria en salud (Betoni, *et al.*, 2006), aproximadamente, el 80% de los habitantes del mundo confían en la medicina tradicional. (Dawoud, *et al.*, 2013). Existen numerosos ejemplos de formulaciones complejas utilizados en la medicina tradicional China y otras medicinas tradicionales en todo el mundo; por esto la idea de combinar dos o más extractos de plantas en una combinación efectiva se remonta muchos siglos. El sinergismo esta basado en la combinación de metabolitos de dos o mas sustancias que puede resultar en respuestas o interacciones sinérgicas, aditivas o antagonicas entre los componentes combinados en las células u organismos (Efferth, Koch, 2011)

Estos análisis de interacción se han realizado especialmente en fármacos y en menor proporción en plantas o metabolitos secundarios, de esta manera se aprovecha su potencial. por ende la combinación de dos o más sustancias se convierten en un gran acierto, para lograr efectos terapéuticos deseados, potencializando la actividad proporcionada por los agentes individuales, utilizándose entonces en el tratamientos de enfermedades oncológicas e infecciosas (Ren, *et al.*, 2003).

Existen multiples ejemplos actualmente de que la interacción de fármacos aumenta las posibilidades de éxito en el tratamiento y el control de enfermedades como leucemias y linfomas (Glode, Jarkowski, 2009), el cáncer (Chen, *et al.*, 2015) entre otras.

En este trabajo se evaluó el potencial antioxidante de mezclas binarias y terciarias realizadas a partir de extractos vegetales obtenidos de 3 plantas altamente utilizadas por las comunidades indígenas del mundo en la cura de diferentes enfermedades, estas fueron *M. lanceolata* (Solaniilla, *et al.*, 2011), *S. sessiliflora* (Padilla González, Gil Archila, 2012) y *C. leptostachyus* (Chiappe Pulido, 2013); como estudio preliminar se realizó un tamizaje fitoquímico a los extractos crudos además de evaluar la posible actividad antioxidante de los extractos crudos y sus mezclas (binarias y terciarias) mediante métodos indirectos (DPPH, ABTS), un método directo, evaluando el porcentaje de hemólisis en un modelo de eritrocitos; por último se evaluó el comportamiento presentado por las mezclas de los extractos a través de un modelo de interacción (CompuSyn), el cual permite obtener índices de combinación (IC) y así determinar cuantitativamente las interacciones entre medicamentos o extractos en este caso, donde $IC > 1$ indica antagonismo, $IC = 1$ indica aditividad y $IC < 1$ sinergismo.

Metodología

Material vegetal. Para este estudio se utilizaron las partes aéreas (hojas) de las 3 plantas objeto de estudio; la

recolección de la información etnobotánica y de las muestras vegetales, se hizo en tres municipios; *Mollinedia lanceolata* (romadizo) se recolecto en el Municipio de Yopal (Casanare), a una altura de 350 msnm, entre las coordenadas 05°21'06" de latitud norte y 72° 24'12" de longitud oeste; *Croton leptostachyus* (mosquero) fue recolectada en el corregimiento de Payande perteneciente al municipio de San Luis (Tolima), a una altura de 506 msnm, entre las coordenadas 4° 19' 41" Latitud Norte y 75° 13' 22" Longitud Oeste, (Acosta, *et al.*, 2001) Diagnostico para el plan de desarrollo municipal de San Luis 2012- 2015) y *Siparuna sessiliflora* (limón de monte) se recolecto en la Universidad del Tolima que se encuentra dentro del área urbana del municipio de Ibagué (Tolima), a una altura de 1285 msnm, se encuentra en las coordenadas geográficas: 4° 15' a N 4° 40' latitud norte y 75° 00' a 75° 30' longitud oeste (Vanegas Gálvez, 2002). Para finalizar la identificación de cada una de las tres plantas, se enviaron bouchers de cada una al herbario de la Universidad Nacional, allí fueron identificadas y se les asigno un numero de colección así: *M. lanceolata* 530879 y *C. leptostachyus* 572765 y *S. sessiliflora* 575456.

Obtención de los extractos vegetales. El material vegetal se secó en una estufa a una temperatura de 40 °C durante 48 horas y, posteriormente, se trituró. Las hojas se pusieron separadamente en frascos de vidrio para realizar extracción por maceración, utilizando como solvente etanol (relación 1:10 de material vegetal/solvente) durante 48 horas; los extractos obtenidos se almacenaron a 5 °C en frascos debidamente rotulados.

Tamizaje fitoquímico de los extractos vegetales. La detección de los principales grupos de metabolitos se realizó mediante ensayos cualitativos individuales para cada grupo químico, según la guía metodológica para la detección rápida de algunos núcleos secundarios y caracterización de una droga cruda, propuesto por Murillo-Perea y Méndez-Arteaga (2011). Lo anterior mediante reacciones de precipitación y de coloración.

Preparación de mezclas. Para estos ensayos se realizaron mezclas binarias y terciarias de los 3 extractos vegetales. Como parámetro de combinación se usaron las concentraciones medias inhibitorias (CI_{50}) obtenidas en la estabilización de los radicales DPPH y ABTS, guardando proporciones 1:1 para cada extracto, tanto en las mezclas binarias como en las ternarias.

Actividad antioxidante invitro

Actividad inhibitoria del catión radical ABTS. Para evaluar la actividad estabilizante de cada una de las mezclas (binaria o terciaria) de los extractos, se utilizó la metodología descrita por Marquina, *et al.*, (2008); la mezcla se preparó en relación 1:50 (extracto: radical) este procedimiento se realizó por triplicado; posterior se midió el cambio de densidad óptica a 734 nm después de los primeros 6 minutos de reacción. La actividad estabilizante del ABTS se determinó mediante la ecuación:

$$AEABTS = \left(\frac{A_{ABTS} - A_{6min}}{A_{ABTS}} \right) \times 100$$

Donde:

AEABTS: Actividad estabilizante del radical ABTS, expresada en porcentaje

A_{ABTS} : absorbancia del ABTS antes de agregar la muestra

A_{6min} : Absorbancia de la mezcla reaccionante a los 6 minutos

Como patrón se utilizó Trolox (0,0312 a 1 $\mu\text{g/mL}$), el cual fue sometido a las mismas condiciones de ensayo

Actividad inhibitoria sobre el radical DPPH. La capacidad para estabilizar el radical DPPH se realizó siguiendo la metodología propuesta por Braca, et al., (2002), con algunas modificaciones. Una curva patrón se preparó con trolox (0,0039 a 0,0625 $\mu\text{g/mL}$), Los valores de actividad antioxidante, a las distintas concentraciones de trabajo, se calcularon mediante la ecuación:

$$\%CEDPPH = \left(\frac{A_B - A_M}{A_B} \right) \times 100$$

Dónde:

CEDPPH: Capacidad estabilizadora del radical DPPH, expresada en porcentaje.

AB: Absorbancia del blanco

AM: Absorbancia de la mezcla reaccionante

Actividad antioxidante en un modelo de células sanguíneas (eritrocitos). Para la obtención de la sangre se utilizó la metodología propuesta por Sánchez en el 2009. El ensayo para estimar el efecto inhibitorio de los extractos sobre la hemólisis se realizó a través del método descrito por Ebrahimzadeh, et al., (2010) con algunas modificaciones, sobre los 3 extractos crudos de las plantas objeto de estudio

El porcentaje de inhibición de hemólisis fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Inhibición de Hemólisis} = [(A_c - A) / A_c] \times 100$$

Donde A_c es la absorbancia del control negativo y A es la absorbancia de la muestra (con el extracto a cada una de las concentraciones estudiadas). Como control positivo fue utilizado Ácido Ascórbico a la misma concentración de los extractos (en los ensayos donde se utilizó el Ácido Ascórbico como control positivo; este fue preparado al momento del ensayo).

Análisis estadístico. Las diferentes CI_{50} generadas para todas las pruebas de la actividad antioxidante y hemolítica se obtuvieron mediante análisis de regresión lineal simple, empleando el paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV (StatPoint, Inc.) a un nivel de significancia de 0,05. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Análisis de interacción mediante isoblograma. Para realizar este análisis se utilizó un software de versión libre CompuSyn, este programa nos permite apreciar de una manera gráfica la interacción de combinaciones de extractos o fármacos; utilizando ecuaciones que proporcionan las bases teóricas para el índice de combinación (IC) y permiten la determinación cuantitativa de las interacciones entre

medicamentos u otras matrices que se mezclen, donde $IC=1$, indica un efecto aditivo; $IC < 1$, indica sinergia y $IC > 1$ indica efecto antagónico. Basado en estos algoritmos, el software ha sido desarrollado para permitir la simulación automatizada de sinergismo y antagonismo en todos los niveles de dosis o efecto.

Resultados y discusión

Caracterización de los extractos vegetales. En la tabla 1, se encuentran los resultados obtenidos en la caracterización cualitativa de los 3 extractos evaluados (*M. lanceolata*, *S. sessiliflora* y *C. leptostachyus*); en las 3 especies se determinó la presencia de metabolitos como polifenoles, taninos, flavonoides y fenilpropanoides, entre otros. La presencia de compuestos de naturaleza polifenólica en las 3 plantas fue abundante, destacando el contenido de estos metabolitos en *M. lanceolata*, estos compuestos se destacan por generar defensa ante diversos factores como la radicación UV, ataque de animales, de hongos y bacterias (Cooper-Driver, et al., 2007); sin dejar de mencionar que han sido reportados en literatura científica como unos de los principios activos más importante para la estabilización de radicales (Lambert, et al., 2007; Cadenas, 2000).

Los ensayos realizados para reconocer núcleos de naturaleza alcaloidal fueron positivos para *M. lanceolata* y *S. sessiliflora*, destacando los de tipo morfina, codeína, papaverina, noscapina, entre otros, y del grupo de las anfetaminas y derivados, como reportó Murillo, et al., (2011). Las saponinas encontradas en *C. leptostachyus* y *S. sessiliflora*, en esta caracterización podrían ser predictivos de la toxicidad que pueden presentar los extractos de estas plantas, lo cual podría limitar su uso en aplicaciones fitoterapéuticas tales como las que se presentan en este estudio.

Actividad antioxidante in vitro

Actividad estabilizante de los radicales ABTS y DPPH.

Los resultados de la actividad estabilizante del radical DPPH y ABTS en extractos crudos, y las diferentes mezclas expresado como CI_{50} se representan en la tabla 2.

El tamizaje cualitativo preliminar realizado a los extractos crudos mostró la presencia de metabolitos referenciados en la literatura científica por su capacidad antioxidante. Las CI_{50} calculadas para las mezclas de los extractos frente a la estabilización del radical DPPH mostraron mayor efectividad, mientras que para el caso del ABTS ocurre lo contrario, generándose efectos antagónicos, excepto para la mezcla binaria *M. lanceolata* + *S. sessiliflora*. Hay que tener en cuenta que la capacidad antioxidante de una mezcla no viene dada solo por la suma de las capacidades antioxidantes de cada uno de sus componentes; estos compuestos pueden interactuar entre si y producir efectos sinérgicos o inhibitorios. (Echavarria, et al., 2009)

Trabajos como el de Güder, et al., (2012), donde se comparó la actividad antioxidante de extractos y mezclas de *Urtica dioica* L. y *Malva neglecta* Wallr con antioxidantes como el BHA, BHT y α -tocoferol; comprobaron que en las

Tabla 1. Tamizaje fitoquímico realizado a los extractos crudos de *M. lanceolata*, *S. sessiliflora* y *C. leptostachyus*

Núcleo secundario	Prueba	Extracto		
		<i>M. lanceolata</i>	<i>S. sessiliflora</i>	<i>C. leptostachyus</i>
Saponinas	Espuma	-	+	+
	Rosenthaler	-	+	+
Polifenoles	Folin-Ciocalteu	+	+	+
	CCD	+	+	+
Taninos	FeCl ₃	+	+	+
	Gelatina-sal	+	+	+
	Taninos condensados	+	+	-
Flavonoide	Shinoda	+	+	+
	PEW'S	+	+	+
Fenilpropanoides	Arnow	+	-	+
Terpenos y esteroides	Lieberman-Burchard	+	+	+
	Salkowski	+	+	+
Iridoides	Vainillina etanólica	-	-	+
Alcaloides	Dragendorff	+	+	-
	Mayer	-	+	-
	Erlich	-	-	-
	Tanred	+	+	-
	Valser	+	-	-
Quinonas	Bornträger	-	-	-
Cumarinas	CCD	-	+	+
Lactonas	CCD	-	+	+
Cardiotónicos	CCD	-	+	+
	Barfoed	-	+	+

+ Presente

- Ausencia bajo las condiciones de la prueba

Tabla 2. Concentraciones inhibitorias medias para la estabilización del radical DPPH y ABTS de los 3 extractos las plantas evaluadas y sus mezclas

Plantas y mezclas de las plantas	DPPH	ABTS
<i>M. lanceolata</i>	128,8 ± 0,9	11,2 ± 0,3
<i>C. leptostachyus</i>	53,5 ± 1,1	11,6 ± 0,3
<i>S. sessiliflora</i>	304,1 ± 3,7	47,2 ± 2,5
<i>M. lanceolata</i> + <i>C. leptostachyus</i>	13,1 ± 0,3 (IC <1)	12,0 ± 0,2 (IC > 1)
<i>M. lanceolata</i> + <i>S. sessiliflora</i>	99,2 ± 0,9 (IC <1)	26,8 ± 0,6 (IC <1)
<i>C. leptostachyus</i> + <i>S. sessiliflora</i>	178,1 ± 2,7 (IC <1)	36,7 ± 1,1 (IC > 1)
<i>M. lanceolata</i> + <i>C. leptostachyus</i> + <i>S. sessiliflora</i>	80,4 ± 1,9 (IC <1)	27,9 ± 0,1 (IC > 1)
Trolox (patron)	3,15±10 ⁻²	5,82±10 ⁻¹

± = desviación estándar, IC= Índice de combinación IC> 1= antagonismo, IC=1 aditividad, IC <1= sinergismo

mezclas de estas plantas se encuentran comúnmente acción sinérgica mejorando así su actividad antioxidante. **Misan, et al.,** (2011) encontraron efectos sinérgicos en la mezcla obtenida de perejil, espinillo amarillo, menta y alcaravea; exhibiendo una alta actividad antioxidante en la mayoría de las pruebas (directas o indirectas), realizadas en el estudio.

Actividad antioxidante en un modelo de células sanguíneas (eritrocitos). Los resultados observados en la evaluación de la actividad antioxidante demuestran que los extractos crudos y las mezclas de los extractos inhiben

especies radicalarias sintéticas como DPPH y ABTS, pero al determinar la actividad hemolítica se observaron efectos diferentes. Los 3 extractos etanólicos crudos de las tres plantas mostraron alta toxicidad frente a las células sanguíneas evaluadas, lo cual se demostró a través de la hemólisis. En los extractos de *C. leptostachyus* y *S. sessiliflora* se explica por la presencia de saponinas, detectadas en el tamizaje preliminar realizado a los extractos (Tabla 1), las cuales podrían enmascarar el potencial protector del resto de metabolitos presentes en los extractos.

En orden decreciente de toxicidad encontrada fue, *S. sessiliflora*, *C. leptostachyus* y *M. lanceolata*. En el caso de *M. lanceolata*, llama la atención debido a que a pesar de no detectarse saponinas en el extracto se observó efecto hemolítico sobre los eritrocitos humanos; por lo tanto la ruptura de estas células puede generarse por posible competencia entre los mecanismos de estabilización y la generación de especies prooxidantes (Pérez, 2003), factor determinante al momento de establecer la estabilidad de las especies generadas y su contribución con respecto a la actividad antioxidante total en un sistema como el que se evaluó en este trabajo.

Los resultados de los análisis de varianza realizados con los extractos de las plantas se pueden apreciar en la tabla 3.

Cabe resaltar que con este ensayo se cualificó de manera indirecta su toxicidad demostrando que estos extractos a pesar de tener una capacidad para estabilizar los radicales en ensayos indirectos, no serían de utilidad en un sistema directo generando una lisis de la membrana de los eritrocitos, no obstante es necesario realizar estudios más rigurosos para establecer la toxicidad en contraste con el potencial terapéutico, por ejemplo citotóxico de las especies estudiadas.

Hiruma, et al., (2013) investigaron los efectos antitumorales *in vitro*, para esto utilizaron una mezcla de seis hierbas medicinales que contenían laca. La mezcla de estos extractos inhibió la proliferación de varias líneas tumorales humanas en ratón; demostrándose un potencial sinérgico entre las plantas que se mezclaron. Este tipo de mezclas también se han utilizado para el control de algunas bacterias como *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhi* y *Staphylococcus aureus*, este es el caso del estudio realizado por Vásquez, et al., (2014), quienes mezclaron extractos etanólicos de *Larrea tridentata*, *Flourensia cernua* y *Opuntia ficus-indica*, la mezcla realizada por los extractos inhibió el crecimiento de las bacterias indicando así el efecto sinérgico de sus componentes.

Análisis de interacción mediante isobogramas. Mediante los análisis de interacción realizados con el software CompuSyn se obtuvieron isobogramas que permitieron observar los índices de interacción para cada una de las mezclas, en cuanto a los índices de combinación encontrados para la evaluación del DPPH se hallaron índices inferiores a 1 en las 3 mezclas binarias y la terciaria, destacando la mezcla obtenida a partir de los extractos de *C. leptostachyus* + *M. lanceolata*, la cual mostró los índices de interacción más efectivos con valores que oscilaban entre 0.02883 y 0.04715, generándose entonces una interacción sinérgica para la estabilización de este radical; en cuanto a los índices de interacción obtenidos en la mezcla ternaria estos oscilan entre 0.11801 y 0.07813, índices inferiores a 1 demostrando así una acción sinérgica disminuida con tendencia a la aditividad.

En caso del radical sintético ABTS, los IC hallados en las mezclas binarias y terciaria fueron superiores a 1, lo que indica una interacción de tipo antagónico en todas

Tabla 3. Concentraciones hemolíticas medias (Ch_{50}) para la hemólisis de células eritrocitos humanos

Especies	Intervalos de Confianza		
	Media	Inferior	Superior
<i>M. lanceolata</i>	65,3 ± 0,2	62,9	67,7
<i>C. leptostachyus</i>	85,9 ± 0,1	84,4	87,4
<i>S. sessiliflora</i>	92,8 ± 0,1	91,5	94,1

las mezclas evaluadas. La mezcla binaria *M. lanceolata* + *S. sessiliflora*, muestra los IC más altos, estos oscilaron entre 0.74468 y 211.001. En cuanto a la mezcla ternaria se evidenciaron valores entre 18.4807 y 2.23341, evidenciando una fuerte acción antagónica.

Los resultados de interacción obtenidos para la estabilización de los dos radicales fueron diferentes por lo que es importante considerar la variabilidad en los mecanismos de estabilización radicalaria y la interacción que puede existir entre los distintos metabolitos que influyen la actividad antioxidante, ya que la mezcla de extractos o componentes bioactivos no necesariamente potencian una determinada actividad biológica. En este caso las mezclas generaron interacciones que no están relacionadas exactamente con la actividad individual de sus componentes, por esto se hace necesario realizar este tipo de evaluaciones. Los resultados indican que las mezclas favorecen la estabilización de radicales libres vía transferencia de átomos de hidrogeno, no obstante si se considera la estabilización por transferencia de electrones el efecto es contrario.

Hay que resaltar que este tipo de estudios son poco comunes en matrices vegetales, más cuando se pueden contrastar con un modelo de evaluación directa como el que representa la membrana eritrocitaria. Actualmente la combinación de fármacos es la más ampliamente utilizada en el tratamiento de las enfermedades, como el cáncer y el SIDA. Los principales objetivos son lograr un efecto terapéutico sinérgico, reducir la toxicidad, y minimizar o retrasar la inducción de resistencia a los medicamentos (Chou, 2006); otra de las combinaciones usadas son las que se generan entre alimentos que contienen nutrimentos y otras sustancias que pueden afectar en diferente grado la farmacocinética y la farmacodinamia de los medicamentos y, de igual manera, los medicamentos que causan impacto sobre el estado nutricional, ya sea produciendo una deficiencia nutricional o interfiriendo en el proceso natural de la alimentación (Quir, 2014).

En este sentido se han combinado diferentes tipos de vegetales como por ejemplo el tomate, la zanahoria, la berenjena y la patata violeta; para evaluar la interacción antioxidante frente a radicales sintéticos, dichos ensayos mostraron efectos antioxidantes sinérgicos en combinaciones binarias, muy similar a lo encontrado en el estudio actual (Jiang, et al., 2015). Otra manera de aumentar el potencial se los antioxidantes naturales como el te verde

es generar una interacción con antioxidantes sintéticos como el ácido ascórbico, como lo hicieron **Enko, et al.**, (2015); al realizar una serie de combinaciones entre estos dos antioxidantes comprobando su capacidad a través de diferentes ensayos indirectos y donde se determinó un tipo de interacción potencializada.

Conclusiones

Los extractos etanólicos de 3 plantas estudiadas demostraron ser fuentes ricas en compuestos fenólicos y al mismo tiempo expusieron capacidad para la estabilización de los radicales sintéticos DPPH y ABTS, no obstante las mezclas presentaron comportamientos que dependieron del tipo de combinación realizada, pero primando la acción estabilizadora del radical DPPH en la mayoría de los casos, posiblemente porque los metabolitos presentes favorecen estabilización radicalaria vía transferencia de átomos de hidrogeno. La evaluación de la actividad antioxidante en eritrocitos demostró la competencia que ejercen los metabolitos al estar en una mezcla compleja, que implica el uso de un extracto o preparación de diferentes plantas con fines terapéuticos, por lo que deben realizarse estudios de esta naturaleza que puedan validar el uso seguro de formulaciones que impliquen el uso de extractos o sus mezclas no solo fines antioxidantes sino para cualquier tipo de actividad biológica que se persiga.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Acosta, R., Gómez, T. J., Morales, G. J., Gómez, N.** (2001). Esquema de Ordenamiento Territorial. Alcaldía Municipal de San Luis. Ibagué, Tolima
- Akladios, F. N., Andrew, S. D., & Parkinson, C. J.** (2015). Selective induction of oxidative stress in cancer cells via synergistic combinations of agents targeting redox homeostasis. *Bioorga. Med. Chem.* **23** (13): 3097-3104.
- Betoni, J. E. C., Mantovani, R. P., Barbosa, L. N., Di Stasi, L. C., & Fernandes Junior, A.** (2006). Synergism between plant extract and antimicrobial drugs used on *Staphylococcus aureus* diseases. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz.* **101** (4): 387-390.
- Braca, A., Sortino, C., Politi, M.** (2002). Anti-oxidant activity of flavonoids from *Licania licaniaeflora*. *J. Ethnopharmacol.*, Vol. 792, pp. 379-381.
- Calderón, J. C., Fernández, A. Z., de Jesús, A. I. M.** (2008). Aterosclerosis, estrés oxidativo y actividad física. *Revisión. Investigación Clínica.* **49** (3).
- Camacho, K. M., Kumar, S., Menegatti, S., Vogus, D. R., Anselmo, A. C., & Mitragotri, S.** (2015). Synergistic Antitumor Activity of Camptothecin-Doxorubicin Combinations and their Conjugates with Hyaluronic Acid. *J. Controlled. Release.* **210**: 198-207
- Caracterización del sector educativo municipio de Yopal.** (2012). Secretaría de educación y cultura. Yopal – Casanare
- Chen, J., Lin, L., Guo, Z., Xu, C., Tian, H., Park, K., & Chen, X.** (2015). Synergistic treatment of cancer stem cells by combinations of antioncogenes and doxorubicin. *J. Drug. Deliver. Sci. Tech.* **26**: 407-418
- Chen, Q. H., Yu, K., Zhang, X., Chen, G., Hoover, A., Leon, F & Rakotondraibe, L. H.** (2015). A new class of hybrid anticancer agents inspired by the synergistic effects of curcumin and genistein: Design, synthesis, and anti-proliferative evaluation. *Bioorga. Med. Chem. Letters.* **25** (20): 4553-4555;
- Chiappe, P. A. C.** (2013). Estudio fitoquímico de las hojas de la especie vegetal *Croton schiedeanus* (*Euphorbiaceae*) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Chou, T. C.** (2006). Theoretical basis, experimental design, and computerized simulation of synergism and antagonism in drug combination studies. *Pharmacol. Rev.* **58** (3): 621-681
- Cooper-Driver, G. A., Bhattacharya, M.** (1998). Role of polyphenolics in plant evolution. *Phytochem.* **49**: 1165-1174.
- Dawoud, M. E. A., Mawgoud, Y. A., Dawoud, T. G.** (2013). Synergistic interactions between plant extracts, some antibiotics and/or their impact upon antibiotic-resistant bacterial isolates. *Afric. J. Biotechnol.* **12** (24): 3835
- De Castro, J., Rodríguez, M.C., Martínez-Zorzano, V.S., Hernández-Hernández, A., Llanillo, M. y Sánchez-Yagüe, J.** (2008). Erythrocyte and platelet phospholipid fatty acids as markers of advanced non-small cell lung cancer: comparison with serum levels of sialic acid, TPS and Cyfra. 21-1.
- Diagnóstico para el plan de desarrollo municipal de San Luis 2012- 2015.**
- Echavarría Z. B., Franco S. A., Martínez M. A.** (2009). Evaluación de la actividad antioxidante y determinación del contenido de compuestos fenólicos en extractos de macroalgas del Caribe Colombiano. *Vitae* [online]. **16** (1): 126-131.
- Efferth, T., Koch, E.** (2011). Complex interactions between phytochemicals. The multitarget therapeutic concept of phytotherapy. *Curr. Drug Targ.* **12**: 122-132
- Enko, J., Gliszczynska-Świgło, A.** (2015). Influence of the interactions between tea (*Camellia sinensis*) extracts and ascorbic acid on their antioxidant activity: analysis with interaction indexes and isobolograms. *Food. Addit. Contam. Part A.* **32** (8): 1234-1242.
- Glode, A. E., Jarkowski, A.** (2009). Bendamustine: a new treatment option for chronic lymphocytic leukemia. *Pharmacotherapy. J. Hum. Pharmacol. Drug Therapy.* **29** (11): 1375-1384.
- Güder, A., Korkmaz, H.** (2012). Evaluation of in-vitro antioxidant properties of hydroalcoholic solution extracts *Urtica dioica* L., *Malva neglecta* Wallr. and their mixture. *Iran. J. Pharm. Res.* **11** (3): 913-923.
- Hiruma, W., Suruga, K., Kadokura, K., Tomita, T., Sekino, Y., Komatsu, Y., Kimura, M., Ono, N.** (2013). The Antitumor Effects of a Plant Extract Mixture. *Pharm. Soc. Jap.* **133** (5): 487-491.
- Holdridge, L. R.** (1987). Ecología basada en zonas de vida (No. 83). Agroamérica.
- Jiang, H. W., Yu, C. W., Yang, T. T., Hu, J. N., Liu, R.** (2015). The evaluation of antioxidant interactions among 4 common vegetables using isobolographic analysis. *J. Food. Sci.* **80** (6): 1162-1169.
- Lambert, J. D., Sang, S., Yang, C. S.** (2007). Possible Controversy over Dietary Polyphenols: Benefits vs Risks. *Chem. Res. Toxicol.* **20**: 583-585.
- Marquina, V., Araujo, L., Ruíz, J., Rodríguez-Malaver, A., Vit, P.** (2008). Composición química y capacidad antioxidante en fruta, pulpa y mermelada de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición.* **58** (1): 98-102.

- Murillo, E., Lombo, O., Méndez, J.** (2011). Química y Funcionalidad Biológica de *Mollinedia lanceolata* (Monimiaceae). Información tecnológica. **22** (2): 3-14
- Murillo-Perea, E., Méndez-Arteaga, J.** (2011). Guía metodológica para la detección rápida de algunos núcleos secundarios y caracterización de una droga cruda. Sexta revisión. Universidad del Tolima. Facultad de Ciencias. Departamento de Química. GIPRONUT.
- Osorio, L. C., Idea, S.** (2002). Agenda Ambiental Municipio de Ibagué
- Quir, R. E. M.** (2014). Fármaco-nutrimiento: interacción insuficientemente considerada. *Rev Esp Méd Quir.* **19**: 244-250.
- Ren, W., Qiao, Z., Wang, H., Zhu, L., Zhang, L.** (2003). Flavonoids: promising anticancer agents. *Med. Res. Rev.* **23** (4): 519-534.
- Stevenson, D. E., Hurst, R. D.** (2007). Polyphenolic phytochemicals- just antioxidant or much more. *Cell. Mol. Life. Sci.* **64** (22): 2900-2916.
- Solanilla Duque, J. F., Lombo, O., Murillo Perea, E., Méndez Arteaga, J. J.** (2011). Valoración del potencial antioxidante de *Mollinedia lanceolata* (romadizo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales.* **16** (2): 151-163.
- Teuschler, L., Klaunig, J., Carney, E., Chambers, J., Connolly, R., Gennings, C., Giesy, J., Hertzberg, R., Klaassen, C., Kodell, R., Paustenbach, D., Yang, R.** (2002). Support of science-based decisions concerning the evaluation of the toxicology of mixtures: a new beginning. *Regul. Toxicol.* **36**: 34-39.
- Vanegas Gálvez, M.** (2002). Estudio complementario del caso Ibagué, Colombia. In Estudio complementario del caso Ibagué, Colombia. CEPIS
- Venereo Gutiérrez, J. R.** (2002). Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes. *Revista Cubana de medicina militar.* **31** (2): 126-133.

Variaciones de la acidez durante la incubación de las muestras en pruebas de demanda biológica de oxígeno

Jorge Alonso Cárdenas-León*, Ángela María Wilches-Flórez, Cindy Viviana Vanegas-Castillo

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Resumen

En este trabajo se estudiaron las relaciones existentes entre la demanda biológica de oxígeno (DBO) y las variaciones de la acidez producidas durante el proceso de metabolización aeróbica de las aguas residuales domésticas. En una primera fase del proyecto se utilizaron soluciones patrón de glucosa y ácido glutámico y, en una segunda, muestras provenientes de la corriente influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, de Bogotá, Colombia. Se utilizaron botellas comerciales de color ámbar y 500 ml de capacidad nominal para incubar las muestras; para la captura del bióxido de carbono generado por la metabolización aeróbica de la materia orgánica en la fase acuosa se empleó una solución tampón concentrada; posteriormente, se determinó la cantidad de CO₂ generado durante la incubación de las muestras mediante titulación con una base fuerte. Se encontró que la DBO de las aguas residuales domésticas podía medirse cuantificando la acidez durante el metabolismo de la materia orgánica contenida con ventajas comparativas frente al método estándar de incubación durante cinco días. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Demanda biológica de oxígeno; Aguas residuales domésticas; Calidad de aguas; Análisis de aguas; Acidez; Demanda biológica de oxígeno.

Variations of acidity during incubation of samples in biological oxygen demand tests

Abstract

We studied the relationship between biological oxygen demand (BOD) and changes in acidity produced during aerobic metabolism of domestic wastewater. In a first phase of the project we worked with standard glucose-glutamic acid solutions, and in the second one, with samples from the influent stream of El Salitre Wastewater Treatment Plant in Bogotá, Colombia. We used commercial amber bottles with a sample incubating nominal capacity of 500 ml; we captured the carbon dioxide generated by aerobic metabolism of the organic matter in the aqueous phase using a concentrated buffer, and, subsequently, we determined the amount of CO₂ generated during sample incubation by titration with a strong base. We found that the BOD of domestic wastewater can be measured by quantifying the acidity produced during the metabolism of organic matter contents, with comparative advantages as compared to the standard method of five days incubation. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Biological oxygen demand; Domestic wastewater; Water quality; Water analysis; Acidity; Biological oxygen demand.

Introducción

La demanda biológica de oxígeno es una estimación semi-cuantitativa de los requerimientos de oxígeno que tienen las aguas residuales domésticas. Esta prueba se utiliza frecuentemente como criterio de calidad de vertimientos domésticos e industriales, así como para medir la eficiencia de los sistemas de remoción de carga orgánica, en las plantas de tratamiento de aguas residuales, (Eaton, Clesceri, Rice, Greenberg, 2005; Dogan, Sengorur, Koklu, 2009).

Existen básicamente dos métodos estándar para medir la DBO, el método de incubación a cinco días, y el método respirométrico, (Eaton, *et al.*, 2005). El primero, mide la carga orgánica de las muestras, en función de la cantidad de oxígeno requerido para su oxidación biológica, por parte de microorganismos biodegradadores, en cinco días, bajo

condiciones cuidadosamente controladas (Li, *et al.*, 2016) y, el segundo, en función del descenso de la presión causado por el consumo de oxígeno de la muestra, en un sistema x cerrado. Existen también otros métodos que han venido desarrollándose durante los últimos veinte años (Calderon, 2007) que apuntan fundamentalmente a tres objetivos. El primero, agilizar el tiempo de duración de los análisis, que en el método tradicional es de cinco días; el segundo, mejorar sustancialmente la reproducibilidad de las mediciones y, el tercero, simplificar el procedimiento de medición y las áreas de trabajo (Jouanneau, *et al.*, 2014).

*Correspondencia:

Jorge Alonso Cárdenas-León, fluoreciencia@udistrital.edu.co

Recibido: 14 de julio de 2016

Aceptado: 06 de marzo de 2017

Los avances de la investigación en este campo apuntan hacia el desarrollo de metodologías de análisis basadas en bio-sensores, que detectan la bio-luminiscencia producida por la utilización de una fuente de carbono, en el uso de celdas de combustible microbiano que generan una corriente eléctrica proporcional a la metabolización microbiana y en el uso de bio-sensores electroquímicos que determinan la actividad metabólica del sistema, mediante la medición del potencial redox de un mediador o intermediario que se adiciona al sistema, generalmente, el hexacianoferrato de potasio III, $K_3Fe(CN)_6$, (Li, *et al.*, 2016; Liu, *et al.*, 2016).

En este estudio se explora la posibilidad de encontrar una correlación entre la DBO de una muestra de agua residual doméstica y su generación de bióxido de carbono, durante el proceso de incubación, con el propósito de aportar en el mejoramiento de la reproducibilidad de las mediciones y de la simplificación del procedimiento y de las áreas de trabajo.

El estudio utiliza botellas comerciales de color ámbar y 500 ml de capacidad nominal para incubar las muestras; captura el bióxido de carbono generado por la metabolización aeróbica de la materia orgánica, en la fase acuosa, mediante un buffer concentrado y, determina posteriormente por titulación con una base fuerte, la cantidad de CO_2 generado durante la incubación de las muestras.

Materiales y metodos

Reactivos. Los reactivos se prepararon según metodología descrita en Standard Methods for examination of water and wastewater' (Eaton, *et al.*, 2005).

Procedimientos. Todas las mediciones de oxígeno disuelto realizadas en éste estudio, fueron hechas por volumetría, según el método 4500-O C, *Azide Modification*, del *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*'.

Todas las mediciones de acidez realizadas en este estudio, fueron hechas por titulación de una alícuota de 100 ml de muestra, blanco o patrón, con solución estándar de NaOH 0,025 N, en presencia de fenolftaleína.

El estudio de las relaciones existentes entre la DBO de una muestra de agua residual doméstica y la correspondiente acidez producida durante el proceso de incubación de las muestras, se realizó en dos etapas. En una primera etapa se observó el comportamiento entre estas dos variables, utilizando como muestras de trabajo, soluciones patrón de glucosa-glutámico. En una segunda etapa, se utilizaron muestras de agua residual doméstica (ARD), provenientes del influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, facilitadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Colombia, durante el año 2013.

Relaciones acidez/DBO en soluciones patrón de glucosa-glutámico. En esta primera etapa se utilizaron como muestras de análisis, soluciones patrón de glucosa-glutámico, por la ventaja que ofrece para el estudio de las variables en cuestión, el trabajo sobre muestras con valor de DBO perfectamente conocido.

En este sentido, se pesaron 450 mg de glucosa y 450 mg de ácido glutámico, anhidros y se disolvieron con agua destilada hasta un volumen total de 1000 ml. La DBO teórica de esta solución stock es de 600 mg O_2/l (Eaton, *et al.*, 2005). A partir de dicha solución se prepararon, 500 ml de cada una las soluciones patrón, abajo indicadas, con el objeto de observar la acidificación producida durante la incubación, a diferentes rangos de concentración:

Serie rango bajo: 20, 40, 60, 80 y 100 mg O_2/l

Serie rango medio: 40, 80, 120, 160 y 200 mg O_2/l

Serie rango alto: 100, 200, 300, 400 y 500 mg O_2/l

Para los ensayos de rango bajo de concentración, se utilizó 1,0 ml de solución buffer concentrada, por cada 500 ml de muestra o blanco. Para los ensayos de rango medio, 2,0 ml y para los ensayos de rango alto, 3,0 ml. Todas las muestras y blancos se inocularon con 0,5 ml del efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales, por cada 500 ml de muestra o blanco.

En este estudio, las muestras se incubaron en botellas comerciales de color ámbar y 500 ml de capacidad nominal, provistas de tapa y contratapa plásticas, que garantizan un cierre hermético.

Dentro de cada ensayo, cada muestra se incubó por duplicado, en alícuotas de 200 ml, para rangos de concentración bajo y medio y, en alícuotas de 100 ml, para rango alto de concentración. A cada una de las botellas se le incorporó un agitador magnético de aproximadamente 3,0 cm de longitud y, posteriormente, se tapó cada botella herméticamente.

En cada serie de ensayos, las botellas se colocaron sobre la plancha de agitación magnética de un equipo Oxitop® IS 12 y, posteriormente, se incubaron a 20 ± 1 °C durante cinco días, con una variación de más o menos 4 horas.

Luego de los cinco días de incubación, se retiraron las muestras de la incubadora y se tituló una alícuota de 100 ml de cada una de las muestras, con NaOH estándar 0,025 N, en presencia de fenolftaleína. Las titulaciones se realizaron con bureta digital y apoyo de agitación magnética, tomando como punto final de la titulación, la permanencia en la mezcla reaccionante, de un tinte rosado, durante más de 10 segundos. Por último, se realizaron los cálculos de las titulaciones y se expresó la acidez obtenida, como miligramos de carbonato de calcio por litro de muestra. De acuerdo con la hipótesis de trabajo, muestras con altos valores de DBO, deberían corresponder con altos valores de acidez y viceversa.

Relaciones acidez/DBO en aguas residuales domésticas. El estudio de las relaciones entre la acidez y la DBO, en aguas residuales domésticas, se realizó sobre muestras provenientes del influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, facilitadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, durante el 2013.

El procedimiento consistió en recoger un galón de muestra y trasladarla al Laboratorio de Aguas de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e iniciar los ensayos, antes de transcurridas cuatro horas, después del muestreo.

Ya en el laboratorio, la muestra se homogenizó por agitación mecánica durante varios minutos y luego se filtró sobre un lecho de algodón.

La muestra así tratada se dividió en dos porciones. Una de ellas se utilizó para la medición de la DBO₅, por el método estándar de incubación a cinco días, (Eaton, *et al.*, 2005) y, la otra, se tomó como solución stock, para preparar a partir de ella, por dilución con agua de dilución, una serie de soluciones patrón, cuya concentración se calculó posteriormente, a partir del resultado experimental obtenido para la DBO₅, por el método estándar de incubación a cinco días.

Cada dilución de la muestra, de agua residual doméstica, se incubó por duplicado en botellas comerciales de color ámbar y 500 ml de capacidad nominal, provistas de cierre hermético, de manera semejante a como se procedió con las soluciones patrón de glucosa y ácido glutámico.

Resultados y discusión

Relaciones acidez vs DBO en muestras de glucosa-glutámico, rango bajo. Los resultados obtenidos para el estudio de las relaciones acidez vs DBO en muestras artificiales de glucosa y ácido glutámico, para rangos bajo y medio de concentración, se muestran en las figuras 1 y 2, respectivamente. Estos resultados se refieren a la acidez de las muestras, medida después del periodo de incubación de cinco días. En esta primera etapa, no se midió la acidez inicial de las muestras.

Nótese que en ambas gráficas, se obtiene como resultado, una inequívoca relación lineal entre la DBO de la muestra y su acidez, después de la incubación. Así lo indica el coeficiente de correlación lineal, superior, en ambos casos, al 95 %. Ensayos semejantes, realizados en condiciones semejantes, arrojan los mismos resultados. Sin embargo, las variables de la recta, pendiente y corte con el eje 'Y', cambian cuando se cambia la cantidad de buffer aplicado.

Las figuras 1 y 2, sugieren que es posible medir la DBO de una muestra, no solo en función del consumo de oxígeno, durante la incubación de las muestras, sino también, en función de la acidez que genera, la metabolización aerobia de la materia orgánica contenida en la muestra. No obstante, estos ensayos, por sí solos, no son contundentes, por cuanto se debe tener en cuenta que estas muestras, contienen cantidades proporcionales de ácido glutámico. Es decir, que la pendiente de las líneas rectas, en estas figuras, podría darse, no solo por la acidez producida en la metabolización de la materia orgánica, sino también, por la concentración creciente del ácido glutámico, en las muestras. En síntesis, la tendencia es lineal pero el resultado no es concluyente. Es por esto que es necesario, trabajar en una segunda etapa, con muestras reales de agua residual doméstica.

Relaciones acidez vs DBO en agua residual doméstica. Los resultados obtenidos para el estudio de las relaciones acidez vs DBO en muestras de agua residual doméstica, se presentan separadamente en cuatro ensayos diferentes. En los dos primeros, se presentan también los resultados

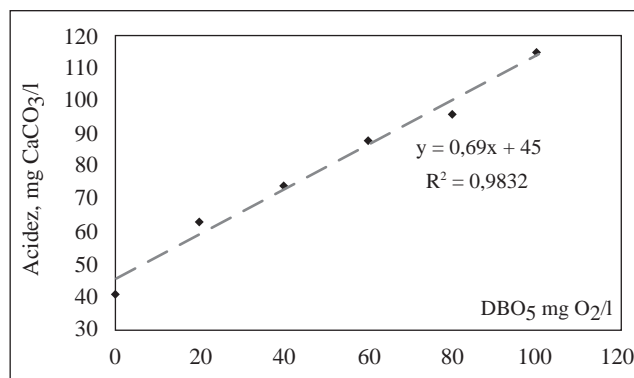


Figura 1. Acidez vs DBO en patrones de glucosa-glutámico, rango bajo

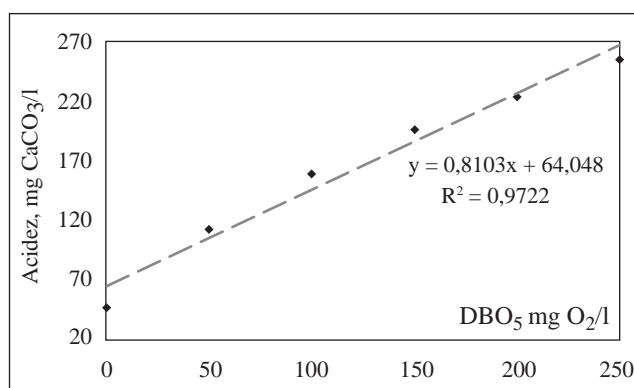


Figura 2. Acidez vs DBO en patrones de glucosa-glutámico, rango medio

experimentales obtenidos en la medición de la DBO, por el método estándar de incubación a cinco días, mientras que en los dos últimos, se presentan solo las relaciones entre las variables estudiadas.

Ensayo 1: acidez vs DBO en agua residual doméstica. La muestra de agua residual doméstica, tratada según lo indicado anteriormente, se dividió en dos porciones. Con una de ellas se midió la DBO₅, por el método estándar de incubación a cinco días, tabla 1, y, con la otra, se realizaron las pruebas de acidez, antes y después del proceso de incubación, tabla 2.

El valor de DBO obtenido en la tabla 1, 263 mg O₂/l, se tomó como valor verdadero para calcular los valores de DBO de la tabla 2, en la cual se comparan los valores de DBO, con los correspondientes valores de acidez, medidos, antes y después del proceso de incubación de las muestras.

Se destacan tres hechos relevantes en la tabla 2. El primero es el alto valor inicial de la acidez en la solución control que, téngase en cuenta, contiene ácido glutámico. El segundo es el valor casi constante de la acidez inicial en las muestras, para cualquier concentración de DBO y, el tercero, un valor creciente de acidez final, que se corresponde con una concentración creciente de DBO.

Tabla 1. Ensayo 1: resultados DBO₅, método estándar

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	ml Na ₂ S ₂ O ₃ 0,025 N	O ₂ disuelto mg O ₂ /l	DBO ₅ mg O ₂ /l	Observaciones
Blanco R-1	---	3,34	6,5	---	---
Blanco R-2	---	3,25			
Blanco R-3	---	3,16			
Control R-1	50	0,92	1,96	227	Valor consecuente con las cantidades de glucosa y glutámico experimentales
Control R-2	50	1,02			
Control R-3	50	1,01			
M _{DILUIDA} 8:1000 R-1	125	2,26	4,54	245	Promediando los dos últimos valores, se obtiene que la DBO de la muestra de trabajo, en este ensayo, es: DBO: 263 mg O ₂ /L
M _{DILUIDA} 8:1000 R-2	125	2,22			
M _{DILUIDA} 8:1000 R-3	125	2,32			
M _{DILUIDA} 10:1000 R-1	100	2,01	3,9	260	
M _{DILUIDA} 10:1000 R-2	100	1,92			
M _{DILUIDA} 10:1000 R-3	100	1,92			
M _{DILUIDA} 12:1000 R-1	83,33	1,66	3,3	266	
M _{DILUIDA} 12:1000 R-2	83,33	1,62			
M _{DILUIDA} 12:1000 R-3	83,33	1,68			

R-1, R-2 y R-3: réplicas 1, 2 y 3

M_{DILUIDA} 8:1000: muestra diluida 8 a 1000 ml, con agua de dilución**Tabla 2.** Ensayo 1: acidez vs DBO en agua residual doméstica

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	DBO _{REAL} mg O ₂ /L	Acidez, mg CaCO ₃ /l		
			Acidez _{INICIAL}	Acidez _{FINAL}	Δ _{ACIDEZ}
Blanco	----	0	13	18	5
Control	----	227	66	165	99
MT 30:500 R-1		16	12	25	13
MT 30:500 R-2	16,7				
MT 60:500 R-1		32	13	40	27
MT 60:500 R-2	8,3				
MT 90:500 R-1		47	14	47	33
MT 90:500 R-2	5,6				
MT 120:500 R-1		63	14	62	48
MT 120:500 R-2	4,2				
MT 150:500 R-1	3,3	79	14	68	54

R-1, R-2 y R-3: réplicas 1, 2 y 3

MT: muestra de trabajo. Buffer aplicado 6 ml por cada litro de muestra, blanco o control

En la figura 3 se grafican los resultados de acidez vs DBO, correspondientes a la tabla 2. En ella se observa una relación lineal entre la DBO de las muestras y el valor de la acidez final, relación que se caracteriza en este ensayo, por un coeficiente de correlación lineal superior al 98 %. Obsérvese que al graficar el delta de acidez (acidez final menos acidez inicial) contra la DBO de las muestras, la linealidad se mantiene. Este hecho sugiere que es posible medir la DBO de una muestra, de agua residual doméstica, en función del valor de su acidez final, esto es, que no es necesario medir la acidez inicial, por cuanto ésta corresponde a un valor prácticamente constante, que no depende de su valor de DBO, sino, más bien, de su naturaleza ácida o básica.

Nótese también que las rectas que representan los datos de acidez y delta de acidez son prácticamente paralelas entre sí y que la recta que representa los valores de acidez inicial en las muestras, es prácticamente paralela al eje X.

Los resultados de este ensayo indican claramente, que análogamente a cuando se trabaja con patrones de glucosa-glutámico, existe una relación lineal inequívoca, entre la DBO de una muestra de agua residual doméstica y la acidez generada como consecuencia de la metabolización de la materia orgánica contenida en ella.

Estos resultados son importantes, por cuanto medir la DBO en función de la acidez, simplifica el método estándar de incubación a cinco días: reduce o elimina por completo

la necesidad de diluir las muestras y reduce la operatividad y las áreas de trabajo, lo cual, redundando en el mejoramiento de la reproducibilidad de las mediciones. Además, el uso de botellas comerciales para realizar las pruebas de DBO, reduce substancialmente el costo de los equipos implícitos en la medición y abre una puerta para el diseño de nuevos equipos, más simples y económicos.

Cuando se repitieron estos ensayos, con muestras de agua residual doméstica, proveniente de la misma fuente, se observaron relaciones semejantes entre las variables estudiadas. Sin embargo, el valor cambiante de DBO, del agua que ingresa a la planta cada día, dificulta establecer relaciones directas absolutas. Por lo tanto, es válido afirmar que existe una relación lineal entre la DBO de una muestra de agua residual y la acidez que se genera durante su incubación, pero la relación exacta y cuantitativa requiere de mediciones seriales de largo plazo.

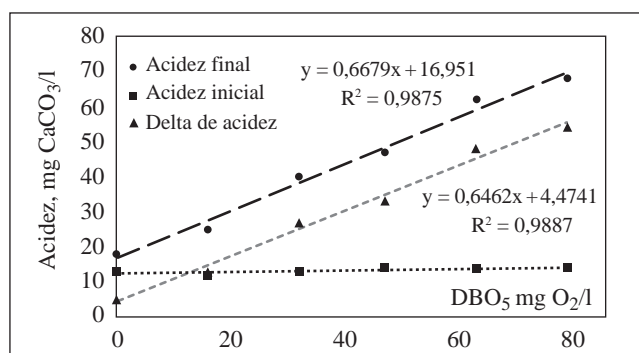


Figura 3. Ensayo 1: acidez vs DBO en muestras de agua residual doméstica

Ensayo 2: acidez vs DBO en agua residual doméstica.

Las tablas 3 y 4 muestran los resultados obtenidos para un ensayo semejante al anterior, en el que se mantuvieron las mismas condiciones experimentales, pero se trabajó con una muestra diferente, proveniente de la misma fuente. Análogamente al primer ensayo, la tabla 3 muestra los datos obtenidos en la medición de la DBO, por el método estándar de incubación a cinco días y la tabla 4, los valores de acidez inicial y final, obtenidos para diluciones graduales de la muestra de trabajo.

El valor de DBO obtenido en la tabla 3, se utilizó para calcular los valores de DBO de las muestras diluidas, que se muestran en la tabla 4.

Nótese cómo, los mismos hechos relevantes observados en la tabla 2, se presentan también en la tabla 4: Un alto valor inicial de acidez en la solución control, un valor más o menos constante de acidez inicial en las muestras, y un valor creciente de acidez final, que se corresponde con una concentración creciente de DBO.

En la figura 4 se grafican los resultados de acidez vs DBO, correspondientes a la tabla 4. Obsérvese que aunque cambian las pendientes, –de 0,66 para la acidez final en el primer ensayo, a 0,59 para la acidez final en el segundo– la linealidad se mantiene y los coeficientes de correlación lineal, escasamente disminuyen en 1%. Para efectos prácticos, el comportamiento de la relación existente entre las variables estudiadas, es el mismo, pues las diferencias entre uno y otro ensayo, caen dentro de las variaciones del error experimental, particularmente si se tiene en cuenta, que en el método estándar de incubación a cinco días, las diferencias aceptadas pueden llegar hasta el 25%, (Eaton, et al., 2005).

Tabla 3. Ensayo 2: resultados DBO₅, método estándar

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	ml Na ₂ S ₂ O ₃ 0,025 N	O ₂ disuelto mg O ₂ /l	DBO ₅ mg O ₂ /l	Observaciones
Blanco R-1	---	3,13	6,17	---	---
Blanco R-2	---	3,04			
Blanco R-3	---	3,09			
Control R-1	50	0,98	1,94	212	Valor esperado para las cantidades de glucosa y glutámico pesadas: 205
Control R-2	50	0,95			
Control R-3	50	0,98			
M _{DILUIDA} 8:1000 R-1	125	2,07	4,1	259	Promediando los tres valores, se obtiene que la DBO de la muestra de trabajo es: 249 mg O ₂ /L
M _{DILUIDA} 8:1000 R-2	125	2,01			
M _{DILUIDA} 8:1000 R-3	125	2,07			
M _{DILUIDA} 10:1000 R-1	100	1,90	3,7	247	
M _{DILUIDA} 10:1000 R-2	100	1,81			
M _{DILUIDA} 10:1000 R-3	100	1,83			
M _{DILUIDA} 12:1000 R-1	83,3	1,64	3,29	240	
M _{DILUIDA} 12:1000 R-2	83,3	1,65			
M _{DILUIDA} 12:1000 R-3	83,3	1,64			

R-1, R-2 y R-3: réplicas 1, 2 y 3

M_{DILUIDA} 8:1000: muestra diluida 8 a 1000 ml, con agua de dilución

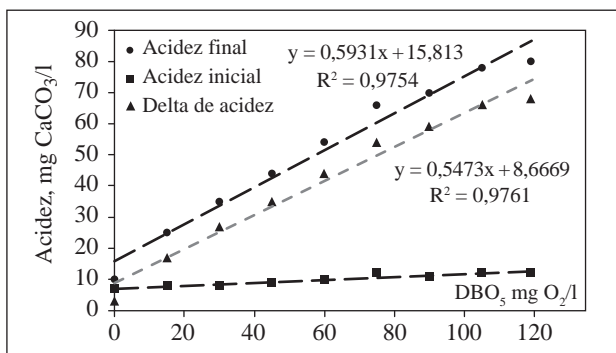
Tabla 4. Ensayo 2: acidez vs DBO en agua residual doméstica

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	DBO _{EXPERIMENTAL} mg O ₂ /l	Acidez, mg CaCO ₃ /l		
			Acidez _{INICIAL}	Acidez _{FINAL}	Δ _{ACIDEZ}
Blanco	---		7	10	3
Control	50,0	212	73	131	58
MT 30:500	16,7	15	8	25	17
MT 60:500	8,3	30	8	35	27
MT 90:500	5,6	45	9	44	35
MT 120:500	4,2	60	10	54	44
MT 150:500	3,3	75	12	66	54
MT 180:500	2,8	90	11	70	59
MT 210:500	2,4	105	12	78	66
MT 240:500	2,1	119	12	80	68

R-1, R-2 y R-3: réplicas 1, 2 y 3

MT: muestra de trabajo.

Buffer aplicado, 6 ml por cada litro de muestra, blanco o control.

**Figura 4.** Ensayo 2: acidez vs DBO en muestras de agua residual doméstica

Finalmente, la correspondencia entre la DBO de la muestra y la acidez producida durante la incubación, se da tanto para la acidez final como para el delta de acidez, lo cual corrobora la posibilidad de simplificar la medición de DBO, mediante una sola medición de la acidez, al final de la prueba.

Este hecho se puede comprobar calculando con cualquiera de las ecuaciones del ensayo 1, –acidez o delta de acidez– los valores de DBO en el ensayo 2, a partir de la acidez final o del delta de acidez. Mientras se trabaje dentro del rango de concentración coincidente –de 20 a 80 mg O₂/l– las desviaciones obtenidas son inferiores al 10 % y, lo que es más importante, siempre inferiores al 25 %, que es la desviación máxima aceptada para el método estándar.

A modo de ejemplo, si mediante la ecuación $Y = 0,6679X + 16,951$, obtenida en el ensayo 1, se calcula la DBO de la muestra correspondiente a la acidez final de 54, obtenida en el ensayo 2, se llega al siguiente resultado: DBO experimental 60 mg O₂/l y DBO calculado, 55,5 mg O₂/l’.

Ensayos 3 y 4: acidez vs DBO en agua residual doméstica. En estos dos últimos ensayos, se realiza un procedimiento experimental semejante al descrito anteriormente,

la única diferencia con respecto a los anteriores, es la concentración del buffer, que pasó, de 6,0 ml por litro, en los primeros ensayos a 4,0 ml por litro, para blancos, patrones y muestras, en estos últimos dos ensayos.

En general, en este estudio se realizaron ensayos variando la cantidad de buffer, entre 2 y 5 ml, por cada 500 ml de blanco, muestra o patrón. Sin embargo, para las muestras de agua residual estudiadas, cuyos rangos de DBO variaron aproximadamente entre 20 y 150 mg O₂/l, los mejores resultados se obtuvieron con dosificaciones de 2-3 ml de buffer, por cada 500 ml de blanco, muestra o patrón.

La tabla 5 y la figura 5, corresponden al ensayo 3, en el cual, la DBO de la muestra, medida por el método estándar de incubación a cinco días, dio como resultado el valor de 218 mg O₂/l. Con este resultado se calcularon los valores de DBO que aparecen registrados en la tabla 5.

Obsérvese que el resultado es muy semejante al obtenido en los ensayos 1 y 2 y que la única diferencia consiste en la reducción de los deltas de acidez. Así, por ejemplo, en éste ensayo, un delta de acidez de 54, se corresponde con una DBO de 122 mg O₂/l, mientras que en los ensayos 1 y 2, éste delta se correspondía con una DBO de aproximadamente 77 mg O₂/l.

La figura 5 muestra claramente que las tendencias se mantienen, tanto para la acidez final como para el delta de acidez. El paralelismo entre las rectas de interés es prácticamente idéntico y el valor de la acidez inicial de las muestras también. Por otra parte, los coeficientes de correlación lineal, escasamente cambian.

De cualquier modo, se debe tener presente, que si bien la reducción de la cantidad de buffer aplicado a los blancos, muestras y patrones, permite que los incrementos de acidez se relacionen cada vez más estrechamente con el metabolismo de la materia orgánica contenida en la muestra, una cantidad de buffer demasiado ajustada a la cantidad de acidez generada por el metabolismo, reduce también la posibilidad de atrapar

Tabla 5. Ensayo 3: acidez vs DBO en agua residual doméstica

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	DBO _{EXPERIMENTAL} mg O ₂ /l	Acidez, mg CaCO ₃ /l		
			Acidez _{INICIAL}	Acidez _{FINAL}	Δ _{ACIDEZ}
Blanco	---		13	17	3
Control	50,0	212	60	116	56
MT 40:500	12,5	17	14	27	13
MT 80:500	6,25	35	14	40	26
MT 120:500	4,17	52	14	46	32
MT 160:500	3,13	70	14	50	36
MT 200:500	2,5	87	14	56	42
MT 240:500	2,08	105	14	61	47
MT 280:500	1,79	122	14	68	54
MT 320:500	1,56	139	14	70	56

MT: muestra de trabajo

MT 40:500: muestra de trabajo diluida 40 a 500, con agua de dilución

Buffer aplicado, 4 ml por cada litro de muestra, blanco o control

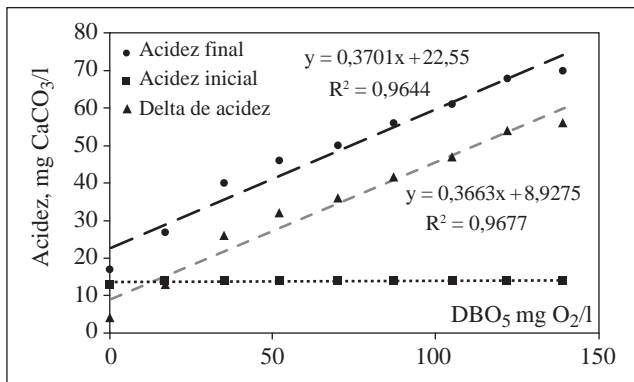


Figura 5. Ensayo 3: acidez vs DBO en muestras de agua residual doméstica

el bióxido de carbono en la fase acuosa. Por esta razón, no es conveniente utilizar la misma concentración de buffer, que se utiliza en el método estándar de incubación a cinco días.

En la tabla 6 y la figura 6, se muestran los resultados correspondientes al ensayo 4. En este ensayo la DBO medida por el método de incubación a cinco días, dio como resultado, el valor de 203 mg O₂/l. Con este valor se calcularon las DBO que aparecen registradas en la tabla 6. Obsérvese la similitud gráfica y tabulada obtenida en estos dos ensayos, ambos realizados con la misma cantidad de buffer concentrado.

Al igual que en los dos primeros ensayos, se pueden calcular, con las ecuaciones del ensayo 3, los valores de DBO del ensayo 4 y viceversa, con discrepancias inferiores al 10%. La concordancia entre los valores de DBO calculados y los experimentales, reflejan las bondades de una posible medición de DBO, en función de la acidez generada durante la incubación de las muestras.

Por último, vale la pena tener presente que el propósito de este estudio era averiguar mediante experimentación, si

existía o no, una relación entre las variables DBO y acidez generada durante la incubación y, adicionalmente, determinar el tipo de relación existente, entre dichas variables, en caso de encontrarse. Es por esto que durante la experimentación se determina primero la DBO de la muestra de trabajo, por el método estándar. Conocer ese valor, nos permite asociar la acidez producida, con un valor fiable de DBO.

Sin embargo, puesto que cada ensayo se realiza con una muestra diferente, no es posible obtener aún, una relación precisa entre la DBO expresada en mg O₂/l y la DBO expresada en mg CaCO₃/l. Ese es el objetivo de la segunda fase de este estudio, que se realiza actualmente con soluciones patrón de glucosa-glutámico y que se proyectará también a muestras reales de agua residual doméstica.

Conclusiones

La acidez producida durante el metabolismo aerobio de la materia orgánica presente en una muestra de agua residual doméstica, es directamente proporcional a su carga orgánica o DBO.

La acidez producida durante la metabolización de la materia orgánica contenida en una muestra de agua residual doméstica, se puede atrapar dentro de la fase acuosa, mediante la adición de un buffer concentrado y cuantificar posteriormente, por titulación con una base fuerte.

La DBO de las aguas residuales domésticas, puede medirse por cuantificación de la acidez producida durante el metabolismo de la materia orgánica contenida, con ventajas comparativas, en relación con el método estándar de incubación a cinco días.

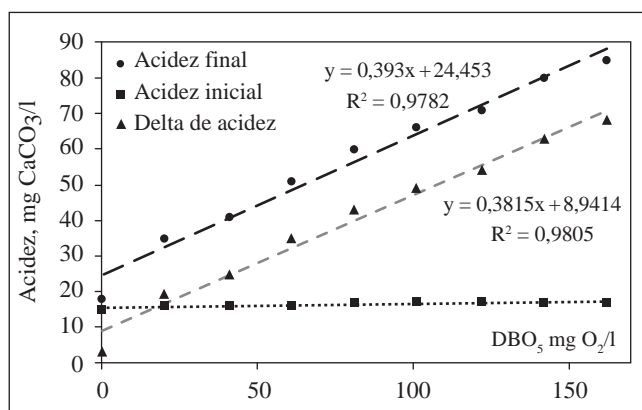
La medición de la DBO, de las aguas residuales domésticas, en función de la acidez producida durante la incubación de las muestras, reduce o elimina la necesidad de diluir las muestras y simplifica la operatividad de la medición, en relación con el método estándar de incubación a cinco días.

Tabla 6. Ensayo 4: acidez vs DBO en agua residual doméstica

Blanco/Control/Muestras	Factor de dilución	DBO _{EXPERIMENTAL} mg O ₂ /l	Acidez, mg CaCO ₃ /l		
			Acidez _{INICIAL}	Acidez _{FINAL}	Δ _{ACIDEZ}
Blanco	---		15	18	3
Control	50,0	222	65	128	63
MT 50:500	10	20	16	35	19
MT 100:500	5	41	16	41	25
MT 150:500	3,3	61	16	51	35
MT 200:500	2,5	81	17	60	43
MT 250:500	2,0	101	17	66	49
MT 300:500	1,7	122	17	71	54
MT 350:500	1,4	142	17	80	63
MT 400:500	1,25	162	17	85	68

MT: muestra de trabajo

MT 50:500: muestra de trabajo diluida 50 a 500, con agua de dilución Buffer aplicado, 4 ml por cada litro de muestra, blanco o control

**Figura 6.** Ensayo 4: acidez vs DBO en muestras de agua residual doméstica

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado dentro del proyecto 'Desarrollo de metodologías alternas para la medición de DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)', que se ejecuta actualmente en el Laboratorio de Aguas, de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Los resultados específicos corresponden al avance del proyecto, durante los años 2011 a 2013. Se reconoce y agradece a la Institución por el acceso a las instalaciones y por el suministro de los reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Se reconoce y agradece también, la Colaboración de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y específicamente al Ingeniero Eduardo López, por su apoyo en la obtención de las muestras y en la coordinación de los resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de ninguna índole.

Referencias

- Calderon, F. (2007). [en línea], http://www.drcalederonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_DBO5_Metodo_Respirometrico.html [consulta: 11 de mayo de 2016].
- Dogan, E; Sengorur, B; Koklu, R. (2009). Modeling biological oxygen demand of the Melen River in Turkey using an artificial neural network technique. *J Environment Manag* **90**: 1229-1235.
- Eaton, A; Clesceri, L; Rice, E; Greenberg, A. (2005). Standard Methods For the examination of water & wastewater. 21 st Edition, Centennial Edition, USA, pp. 4-28, 5-2, 4-33, 4-34, 5-2, 5-7, 5-10, 5-13.
- Jouanneau, S.; Recoules, L.; Durand, M.J.; Boukabache, A.; Picot, V. Primault, Y; et al. (2014). "Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review". *Water Research*. 49: 62- 82. Recuperado de http://ac.elscdn.com.bdigital.udistrital.edu.co:8080/S0043135413008920/1-s2.0-S0043135413008920-main.pdf?tid=fbfa86b2-4831-11e6-b870-0000aacb35e&acdnt=1468329200_087a5b12984371298054eca4b392f3a5 (Consultado el 11 de mayo de 2016).
- Li, Y; Suna, J; Wanga, J; Biana, C; Tonga, J; Li, Y; et al. (2016). A single-layer structured microbial sensor for fast detection of biochemical oxygen demand. *Biochem Engineer J*. **112**: 219-225.
- Liu, C; Li, Z; Jiang, D; Jia, J; Zhang, Y; Chai, Y; et al. (2016). Demonstration study of biofilm reactor based rapid biochemical oxygen demand determination of surface water. *Sensing and Bio-Sensing Res* **8**: 8-13.
- Wilde, F.D; Sandstrom, M.W; Skrobialowski, S.C. (2014). Selection of equipment for water sampling (ver. 3.1): U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A2, 78. [en línea], http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/table6.2_6.pdf [consulta: 11 de mayo de 2016]

Variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian

Claudia Elizabeth Torres-Pineda, José Daniel Pabón-Caicedo*

Grupo de investigación "Tiempo, clima y sociedad", Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Se exploró el efecto de la oscilación de Madden-Julian (OMJ) en la precipitación en diferentes regiones del territorio colombiano. Mediante la comparación del índice de Madden-Julian (IMJ) y de los índices de precipitación (IP), y el uso de coeficientes de correlación y comparación de espectros, se analizó la relación entre la OMJ y la variabilidad intraestacional de la precipitación. Se estableció que las fases extremas de la OMJ se relacionaban con anomalías en la precipitación en Colombia; sin embargo, en el análisis de correlación se obtuvieron coeficientes muy bajos, a pesar de que los espectros de las series del IMJ y de los IP evidenciaron una señal clara en el período de los 30 días. En la comparación de la respuesta de los IP a las fases extremas de la OMJ, expresadas en los valores máximos y mínimos de los IMJ sobre la longitud de 120°O, se estableció que en los extremos positivos de dicho índice (fase positiva o 'subsidente') se registraba una disminución de la precipitación pentadal en algunas regiones del país, en tanto que en los valores extremos negativos (fase negativa o convectiva) la precipitación pentadal aumentaba; en siete de las 24 regiones del país no se pudo determinar un patrón de respuesta definido. Con base en estos resultados, se elaboraron dos mapas de respuesta de la precipitación en las regiones del país en las fases extremas de la OMJ (un mapa para la respuesta en los valores mínimos del IMJ y otro mapa para los máximos), los cuales pueden utilizarse en la predicción climática operativa en algunas regiones de Colombia. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Variabilidad climática intraestacional en Colombia; Oscilación de Madden-Julian, América del Sur; Precipitación en Colombia.

Intraseasonal variability of precipitation in Colombia and its relationship with the Madden-Julian oscillation

Abstract

We explored the effect of the Madden-Julian oscillation (MJO) on the rainfall in different regions of Colombia by comparing the Madden-Julian index (MJI) and precipitation indexes (PI) using correlation coefficients and wavelet spectra comparison. We found that the MJO extreme phases related to precipitation anomalies, but in the correlation analysis we obtained very low coefficients, although the spectra of the series of both MJI and PIs showed a clear signal over the period of 30 days. In comparing the response of IPs to the extreme phases of the MJO, expressed in maximum and minimum values of the MJI at 120°W, we established that under the IMJ positive extremes (positive or subsidence phase) pentadal precipitation decreased in some of the regions, while in the negative extremes (negative or convective phase) we registered an increase; in seven of the 24 regions, no response pattern was identified. Based on this finding, we produced two maps of the response of regional rainfall in the MJO extreme phases (a map for the response to MJI minimum values, and another for the maximum values), which could be used for operational climate prediction in some regions of Colombia. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Intraseasonal climate variability in Colombia; Madden-Julian oscillation over South America; Colombian precipitation.

Introducción

La variabilidad climática se expresa mediante oscilaciones de variables climatológicas en ciclos de meses (intraestacional), años (interanual) y decenios (interdecadal). En el modo interanual el ciclo El Niño-La Niña- Oscilación del Sur (ENOS) tiene un marcado efecto sobre el total de lluvia estacional de una región dada, mientras que la ocurrencia de episodios de lluvias extremas en el transcurso de una estación es modulada por oscilaciones intraestacionales. Las

fases extremas de estas últimas trae consigo cambios en la intensidad de eventos extremos (como lluvias torrenciales, desbordamientos) en la estación lluviosa, agudización/suavización transitoria de fenómenos hidroclimáticos como sequías/inundaciones (Pabón, 2011) con lo que afectan de

*Correspondencia:

José Daniel Pabón-Caicedo, jdpabonc@unal.edu.co

Recibido: 24 de mayo de 2016

Aceptado: 7 de febrero de 2017

manera recurrente diversos aspectos de la sociedad como las actividades y la producción agrícola, el recurso hídrico y la salud humana, entre otros. Por esta razón, se realizan esfuerzos por conocer a profundidad la causa de estas oscilaciones para mejorar la predicción climática a fin de reducir los impactos negativos que generan.

La predicción climática en el ámbito colombiano se ha basado principalmente en el conocimiento sobre particularidades del ciclo ENOS y la expresión de este en el clima de una región determinada, con lo que se ha tenido cierto éxito en la predicción en escala estacional. No obstante, cuando se ha intentado realizar predicción en resolución intermensual (mes a mes), con frecuencia la predicción presenta fallas. Una fuente de error en la predicción climática mes a mes se asocia a la falta de inclusión del modo intraestacional que, por periodos de semanas o un mes, activa o desactiva las precipitaciones, inicia o culmina antes la estación lluviosa, o la interrumpe o la prolonga.

Desde que **Waliser, et al.**, (2003) plantearon la posibilidad de predicción de las fases de la Oscilación Madden-Julian (OMJ), diversos intentos se han desarrollado para lograr la predicción de fases de variabilidad de la precipitación. En el contexto nacional, con el fin de incluir el modo intraestacional en los esquemas de predicción, diversos investigadores han explorado la relación entre las Oscilaciones Madden-Julian y la variabilidad intraestacional de la precipitación en el ámbito colombiano (**Poveda, et al.**, 2002; **Pabón & Dorado**, 2008; **Torres-Pineda**, 2012; **Yepes & Poveda**, 2013). No obstante, la identificación de estrechas relaciones que permitan usar el Índice Madden-Julian (IMJ) como predictor ha tenido resultados poco esperanzadores, dado que en la variabilidad climática intraestacional actúan otros modos diferentes a los generados por la OMJ (**Jones & Schemm**, 2000; **Lau y Waliser**, 2012; **Torres-Pineda**, 2012). En el actual estado del conocimiento está pendiente por aislar los modos intraestacionales diferentes a los causados por la OMJ, explicar su origen e identificar la forma como se puedan utilizar junto con el IMJ como predictores en pronóstico climático mensual. La necesidad de incorporar los modos intraestacionales en los esquemas de predicción es aún más aguda en el contexto colombiano.

Diversos autores señalan a las Oscilaciones de Madden-Julian (ondas con período de 30-60 días en la presión y el viento) como uno de los factores responsables de fluctuaciones intraestacionales en la precipitación y la temperatura (**Paegle, et al.**, 2000; **Lau & Waliser**, 2012; **Donald, et al.**, 2006; **Zhang**, 2013; **Alvarez, et al.**, 2016). Estas ondas, al desplazarse sobre el Pacífico tropical de occidente a oriente transitan sobre el norte de Suramérica, en donde se localiza el territorio colombiano, ocasionan fluctuaciones de la precipitación en la escala intraestacional. A pesar de las claras evidencias de la presencia de estas ondas, de las activaciones/desactivaciones que generan en la precipitación y de sus impactos en la región, poco se ha avanzado en la comprensión de la relación OMJ y la variabilidad

de la precipitación en diferentes regiones del territorio colombiano, por lo que aún es insuficiente el conocimiento sobre las mismas para elaborar esquemas de predicción de este componente de la variabilidad climática.

Los estudios sobre la variabilidad climática intraestacional tienen su inicio en los años 70 cuando **Madden y Julian (Madden & Julian, 1971)** presentaron la primera evidencia de una oscilación de 30-60 días en la presión atmosférica diaria registrada en la estación de la Isla Cantón (**Madden & Julian, 1971**), hecho por el que este tipo de oscilaciones también se conocen como oscilación Madden-Julian. El análisis original de (**Madden & Julian, 1971**) sugiere que las características principales de esta oscilación son su propagación hacia el este desde el Océano Índico y su escala temporal entre 40 y 55 días. Desde entonces hasta el presente, cantidad de estudios han confirmado la existencia de diferentes modos de variabilidad intraestacional en diversas variables climatológicas e intentado identificar las causas con miras a establecer predictores en esta escala. Un resumen de la exploración en este tema específico se encuentra en (**Lau & Waliser, 2012**). Diversos autores han estudiado las oscilaciones intraestacionales en otras variables como la precipitación de diferentes regiones geográficas del mundo. **Krishnamurti & Shukla**, 2007 encontraron modos de 45 y 20 días en la precipitación en la India; por su parte **Wang & Zhang** (1996) exploraron la variabilidad intraestacional de precipitación en China y encontraron periodos de 21 y 43 días. Un análisis realizado también para África (**Janicot & Sultan, 2001**) permitió identificar señales por 10-25 y 25-60 días en la convección y la precipitación en el Oeste de la región. Además, **Ye & Cho** (2001) analizaron datos de la precipitación para Estados Unidos y encontraron señales de 24 y 37 días.

Para Sur América **Carvalho & Jones** (2004) determinaron que la OMJ modula la intensidad de la Zona de Confluencia Intertropical Suramericana (SACZ) con la persistencia de episodios de precipitaciones abundantes de más de tres días; adicionalmente, encontraron que la fase de supresión de actividad convectiva sobre Indonesia y de incremento en el Pacífico central, aumenta un 95 por ciento la precipitación diaria sobre el norte y noreste de Brasil, mientras que, con las características opuestas se observa un incremento de la convección sobre Indonesia y una disminución sobre el Pacífico central. Igualmente, **Martin & Schumacher** (2012), basados en 12 años de precipitación diaria de satélite y vientos de reanálisis, realizaron un estudio sobre la modulación de la OMJ para el Caribe. Clasificaron las anomalías de precipitación en ocho fases de la siguiente manera: fases 1 y 2 (cuando la fase convectiva de la OMJ se encuentra en África y el Océano Índico occidental), las fases de 3 y 4 (cuando la fase convectiva de la OMJ está en el Océano Índico y el Continente Marítimo), las fases 5 y 6 (cuando la fase convectiva de la OMJ está en el Pacífico occidental), y las fases 7 y 8 cuando la fase convectiva de la OMJ está en el hemisferio occidental). Concluyeron que

la variabilidad intraestacional es mayor durante septiembrenoviembre (SON), aunque, alguna modulación de la precipitación aparece por la OMJ en todas las estaciones. Además, observaron anomalías de precipitación de hasta 50% por encima (por debajo) de la media anual en las fases 1 y 2 (5 y 6) de la OMJ. En estos casos, las anomalías en los vientos actúan para disminuir (aumentar) la fuerza de los vientos alisios predominantes del Este. Igualmente, la región del chorro del Caribe de bajo nivel (CLLJ) también es sujeta a la variabilidad intraestacional, y su magnitud varía con la fase de la OMJ. Así, la variabilidad intraestacional en el CLLJ asociado a la OMJ se observa en todas las estaciones y muestra una coherencia significativa con la variabilidad en la precipitación. Por último, eventos extremos de precipitación sobre las islas del Caribe mostraron una fuerte relación con la fase de OMJ, siendo más frecuente en las fases 1 y 2 de un evento OMJ. Del reciente trabajo publicado por **Álvarez, et al.** (2016), quienes analizaron el efecto de las diferentes fases de la oscilación Madden-Julian sobre la temperatura y la precipitación de Sur América apoyados en el índice multivariado RMM de Wheler-Hendon, se puede ver que las fases 1 y 8 (convección sobre el hemisferio occidental y África) generan sobre la región anomalías en diferentes variables; sobre el noroccidente de América del sur, donde se localiza el territorio colombiano, estas fases de la OMJ generan las anomalías que se exponen en la tabla 1.

Para el norte de Suramérica se han encontrado señales con periodos de 25-30 y de 50-60 días. **Poveda, et al.** (2002) evaluaron el comportamiento a escala diaria y horaria de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian y concluyeron que esta cambia la amplitud del ciclo diurno de precipitación en la región estudiada, pero no cambia su fase, lo que señala que la oscilación de 30-60 días es otro modulador macroescalar del ciclo diurno que afecta la hidrología de los Andes tropicales colombianos. Años más tarde, con base en registros de precipitación media de cada diez días tomados de estaciones de la región Norte de Sur América y del Caribe, **Dorado** (2007) y **Pabón & Dorado** (2008) analizaron la variabilidad intraestacional de la precipitación de la región; el análisis espectral de un índice de precipitación decadal (DPI) permitió identificar señales con periodos entre 20-25, 30, 40 y 50-60 días, las cuales estuvieron bien definidas en la región Caribe y en algunos lugares de los Andes; la señal con período de 60 días se presentó solamente en la región Caribe y en algunos lugares del Pacífico; en las cuencas de la Orinoquía y el Amazonas las señales de estas distribuciones no se encuentran claramente definidas. **Pabón & Dorado** (2008) también realizaron el análisis de correlación entre la variabilidad intraestacional regional y la oscilación Madden-Julian pero el coeficiente de correlación encontrado fue muy bajo debido a la presencia de señales diferentes a las

Tabla 1. Anomalías generadas en diferentes periodos del año por las fases 1 y 8 de la Oscilación Madden-Julian, identificada según el índice RMM, sobre el noroccidente de Sudamérica

	DEF	MAM	JJA	SON
Anomalía de altura de geopotencial	No marcadas	No marcadas	No marcadas	No marcadas
Anomalías de velocidad otencial	Negativas	Negativas	Negativas	Negativas
Anomalías de temperatura del aire en superficie	Negativas (hasta de -0,2°C) en el sector occidental (Pacífico colombiano), más marcado (hasta 0,4°C) en el norte; positivas (0,2°C) en el sector sur y suroriental, más marcadas (0,4°C) en la Amazonía; cercano a lo normal sobre la Orinoquía, nororiente y Caribe	En el suroccidente del Caribe negativas muy marcadas (hasta -0,5°C); en la parte andina negativas (-0,2°C); sobre la Orinoquía positivas (0,2°C), pero muy altas (hasta 0,5°C) sobre la Amazonia Perú-Ecuador-Colombia.	Pacífico colombiano de ligeras anomalías a -0,2°C; sobre el Caribe anomalías negativas de hasta -0,4°C; Amazonía, positivas con el núcleo de hasta 0,4°C; resto del país sin anomalías	Anomalías de -0,3°C a 0,4°C sobre Caribe y Pacífico; región Andina, Orinoquía y noroccidente de la Amazonia con -0,3; suroriente de la Amazonia con 0,3°C
Anomalías de precipitación (la probabilidad de que el acumulado semanal exceda el tercer tercil)	Excesos en el sur y centro (Eje Cafetero) de la región Andina y en el sector central (Valle del Cauca) de la región Pacífica	Alta probabilidad de exceso sobre Nariño y Cauca; probabilidad de exceder en el Pacífico, Eje Cafetero, montaña antioqueña, centro de la región-litoral Caribe y sobre el Archipiélago de San Andrés y Providencia	Incremento marcado (especialmente bajo fase 1) de la probabilidad de exceder el tercer tercil sobre toda la región Andina y Caribe, incluido el Archipiélago de San Andrés y Providencia	Alta probabilidad de exceder el tercer tercil en el sur de la región Pacífica, región Andina y Caribe. Muy alta sobre Antioquia y litoral Caribe central bajo la fase 8.

DEF – Diciembre-Enero-Febrero; MAM –Marzo-Abril-Mayo; JJA –Junio-Julio-Agosto; SON – Septiembre-October-Noviembre (información extractada para la región a partir de los mapas de Álvarez et al., 2015)

de 30-60 días. Considerando esta situación se utilizó una frecuencia más leve con las series DPI, encontrando una correlación relativamente alta entre periodos depurados de DPI y el indicador Madden-Julian (IMJ). En un estudio más reciente (**Trickey, et al., 2012**), evaluaron la posibilidad de utilizar la oscilación Madden-Julian en la predicción de la precipitación de la costa ecuatoriana, con base en la elaboración de un indicador que integra el Índice Niño 3 y el Índice Madden-Julian; dicho índice integrado se correlacionó con la precipitación mensual de diferentes estaciones de la región. Sin embargo los resultados obtenidos no permitieron obtener una mejora en la predicción comparada con lo que se hacía con el esquema de predicción estacional ya existente, aunque mencionan haber obtenido algo de mejora para el final de la estación lluviosa. Al parecer, esto ha ocurrido debido a que en la variabilidad de la precipitación representada en series de datos mensuales está integrado el efecto de dos procesos de diversa escala: una interanual (el ciclo ENOS) y otra intraestacional (Oscilación Madden-Julian). La integración de los dos procesos considerados como la causa en un mismo indicador, resulta poco consistente con esta realidad; se debería tratar por aparte los efectos y correlacionarlos con la causa correspondiente, toda vez que la señal de los dos procesos causantes se integran en la variabilidad de la precipitación (proceso efecto) más no en los procesos causa. Otra posible razón es la utilización de datos mensuales para tratar de incluir procesos de 30-60 días. En efecto, **Cuadros (2010)** en un estudio sobre las características y la relación de la OMJ con las temperaturas superficiales extremas en las regiones de Colombia durante el periodo 1978-2008, determinó con análisis espectral que las oscilaciones intra-estacionales están encubiertas por ondas de mayor energía (de mayor escala temporal con las asociadas al ciclo ENOS), pero las OMJ hacen un aporte significativo a la varianza de las series de temperatura. **Torres-Pineda (2012)**, con análisis espectral (espectro de ondas) a series de precipitación pentadal (acumulados de cinco días), basadas en datos provenientes de mediciones en pluviómetros, encontró señales entre 10-20 días, 30-40 días, 55-60 días, semestrales, interanuales e interdecadales; igualmente identificó que en la escala intraestacional de la precipitación la señal más marcada es la cercana a los 30 días, por lo que intentó relacionar directamente esta señal con la correspondiente en la serie del Índice de Madden-Julian, identificando correlaciones relativamente destacadas para algunas de las regiones analizadas. **Yepes & Poveda (2013)**, con base en series de precipitación pentadal, provenientes de uno de los niveles de datos obtenidos por medición remota de la Tropical Rain Measurement Mission (TRMM), y con el uso de espectro de Hilbert-Huang, encontraron también una señal importante sobre los 20 días que se expresa mejor sobre la Amazonía y el Pacífico colombiano.

En resumen, durante los últimos dos decenios en el ámbito colombiano ha habido un notable progreso en la identificación de diversos modos intraestacionales en la

variabilidad de la precipitación y en el análisis de la relación de estos con las OMJ, pero aún es necesario establecer más claramente tal relación para fundamentar mejor los esquemas de predicción climática en esta escala temporal. Dada esta necesidad, se abordó el trabajo cuyos resultados se exponen a continuación, el cual tuvo como objetivo, además de fortalecer el conocimiento acerca de los diferentes modos de la variabilidad intraestacional de la precipitación de diferentes regiones del territorio colombiano, explorar a mayor profundidad la relación de éstos con la OMJ para generar elementos de predicción climática en la escala intermensual para tales regiones.

Materiales y métodos

La exploración se efectuó comparando el comportamiento de la variable precipitación y la velocidad vertical en 500 hPa, con el comportamiento del índice Madden-Julian basado en la velocidad potencial en 200hPa.

Para la precipitación se emplearon datos diarios del periodo 1978-2008 de 24 estaciones operadas por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y distribuidas sobre las regiones hidroclimáticas demarcadas por Hurtado (2000) para el territorio colombiano (ver Figura 1 y Tabla 2). La selección de las estaciones meteorológicas se realizó teniendo en cuenta la longitud de la serie y la calidad de la información, así como una distribución espacial que cubriera la mayor cantidad de regiones climáticas señaladas en la figura 1. La lista de estaciones utilizadas para

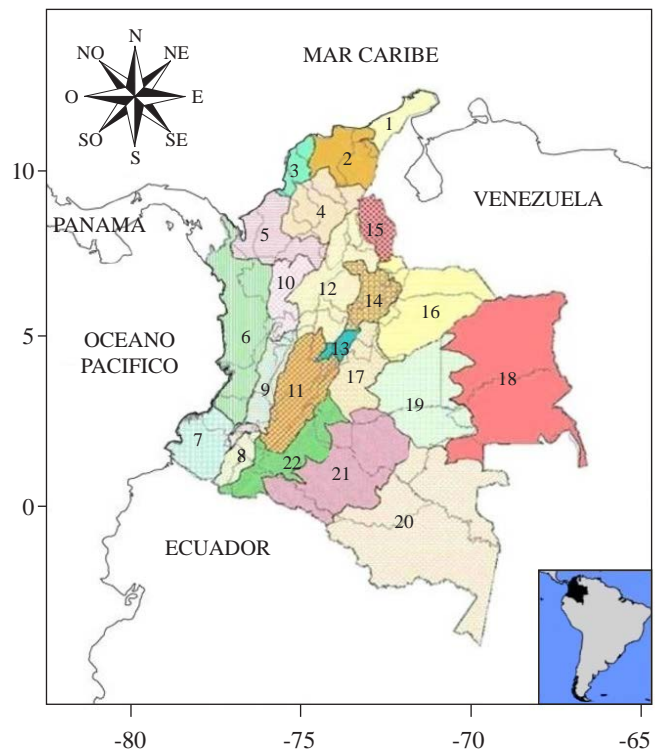


Figura 1. Regiones hidroclimáticas de Colombia analizadas (Fuente: **Hurtado, 2000**)

Tabla 2. Denominación de las regiones hidroclimáticas de Colombia (según **Hurtado, 2000**)

No. En el mapa de la figura 1	Región
Caribe	
1	Alta Guajira
2	Noroccidente de la Sierra Nevada de Santa Marta y cuenca del río Cesar
3	Litoral central
4	Bajo Magdalena
5	Cuenca del río Sinú, Bajo Nechí, región de Urabá
Pacífica	
6	Pacífico norte y centro
7	Pacífico sur
8	Cuenca alta del río Patía
Andina	
9	Cuenca alta del río Cauca
10	Cuenca media del río Cauca
11	Cuenca alta del río Magdalena
12	Cuenca media del río Magdalena
13	Cuenca del río Bogotá, Sabana de Bogotá
14	Cuenca del río Sogamoso
15	Cuenca del río Catatumbo
23	Montaña nariñense
Orinoquía	
16	Cuenca del río Arauca
17	Piedemonte llanero
18	Nororiente de la Orinoquía
19	Orinoquía central
Amazonia	
20	Suroriente de la Amazonía
21	Centro de la Amazonía
22	Piedemonte amazónico
Área insular Caribe occidental	
24	San Andrés y Providencia

el análisis se presenta en la tabla 3. En las series con datos faltantes, cuyo período con vacíos no era extenso se optó por generar los datos ausentes, la cual se realizó con base en los valores registrados en estaciones vecinas que tienen marcada influencia sobre la zona de ubicación de la estación en la que aparece el dato faltante. De estaciones cercanas a la del dato faltante, se tomaron 1 o 2 estaciones que se relacionan mejor con la primera y se estableció un factor de relación entre los promedios multianuales de precipitación de estas; así se generó el dato multiplicando dicho factor por la precipitación del mes correspondiente en la estación

de apoyo. Después de realizar el control de calidad básico a los datos diarios (verificación y descarte de inconsistencias; análisis de homogeneidad), se construyeron series pentadales, decadales y quincenales (acumulados de 5, 10 y 15 días, respectivamente) desde 1994 hasta 2004, período en el que las series presentaron menos datos faltantes

Posteriormente, se calcularon los respectivos índices pentadales, decadales, y quincenales de precipitación, cada uno de acuerdo con la fórmula:

$$IP_{i,j} = \frac{P_{i,j} - \bar{P}_j}{\sigma_j}$$

Donde: IP_{ij} - índice de precipitación de la pentada o década o quincena j del año i ; P_{ij} - precipitación de la pentada o década o quincena j del año i ; \bar{P}_{ij} promedio multianual para la pentada, década o quincena j ; σ_j - desviación estándar de la pentada, década, o quincena j .

Los datos de velocidad vertical en 500 hPa se obtuvieron del CISL Research Data Archive (RDA), que contiene salidas operacionales del reanálisis gestionado por la sección de soporte de datos del National Center for Atmospheric Research (NCAR). A través de una solicitud personalizada se adquirió un conjunto de datos de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de cada 6 horas para un período de tiempo desde 1 de enero de 1979 hasta el 31 de marzo de 2011. Los archivos correspondientes se obtuvieron en formato netCDF y fue necesario un script en NCL (Lenguaje de Comandos del NCAR) para extraer los datos de velocidad vertical a 500 hPa de cada una de las coordenadas de las estaciones; con base en datos obtenidos para cada 6 horas, se construyeron series pentadales, decadales y quincenales.

Los datos del índice de la Oscilación Madden-Julian (IMJ) usados en este estudio son los publicados por la NOAA en su página http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/proj_norm_order.ascii

Para el análisis se utilizaron los datos del IMJ para 120° W y 60° W. Dado que los datos disponibles no presentan el MJI para una longitud dentro del territorio colombiano, se construyó el IMJ para 80°W utilizando interpolación lineal entre el IMJ de 120°W y 60° W denominándolo IMJ80. La serie producida en pentadas, con 6 datos por cada mes, tiene origen desde el año 1978 hasta la actualidad, de manera que se hacen comparables con las series de cada una de las variables meteorológicas de este estudio de IP y de velocidad vertical en 500 hPa. Finalmente, se efectuó la suavización de las series del IMJ con media móvil de tres puntos.

Para establecer la influencia de la MJO en el ciclo de precipitación en el territorio colombiano es necesario determinar si eventos de 30-60 días de frecuencia afectan a las diferentes series y están correlacionadas; además, en caso de que esta señal exista, debe corroborarse si corresponde a la presencia de la MJO. La exploración de la influencia de las ondas de Madden-Julian en la variabilidad intraestacional de la precipitación se realizó a partir del análisis de correlación entre las series del IMJ y del IP e intentando

Tabla 3. Lista de estaciones meteorológicas/climatológicas utilizadas para el análisis

LAT (°)	LON (°)	Código	Categoría	Altitud (m.s.n.m.)	Estación	Departamento	Municipio
12,58	-81,72	1701502	RS	1	Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés
11,13	-74,23	1501505	SP	4	Simón Bolívar	Magdalena	Santa Marta
11,53	-72,93	1506501	SP	4	Alm. Padilla	La Guajira	Riohacha
10,88	-74,58	2904502	SP	14	E Cortissoz	Atlántico	Soledad
10,43	-73,25	2803503	SP	138	Alfonso López	Cesar	Valledupar
10,38	-75,53	1401503	CP	1	Escuela Naval	Bolívar	Cartagena
8,90	-75,56	1308502	CO	33	El Salado	Córdoba	Ciénaga de Oro
7,93	-72,51	1601501	SP	250	Camilo Daza	Norte de Santander	Cúcuta
7,02	-73,80	2315503	SP	126	Yariguíes	Santander	Barrancabermeja
6,22	-75,58	2701507	SP	1490	Olaya Herrera	Antioquia	Medellín
5,56	-73,36	2403513	CP	2690	UPTC	Boyacá	Tunja
4,72	-74,15	2120579	SP	2547	Eldorado p1-2	Bogotá	Bogotá
4,03	-74,97	2118503	CP	360	Guamo	Tolima	Guamo
2,97	-75,30	2111502	SS	439	Benito Salas	Huila	Neiva
7,07	-70,73	3705501	SP	128	Arauca	Arauca	Arauca
6,18	-67,48	3801503	SP	50	Puerto Carreño	Vichada	Puerto Carreño
4,17	-73,62	3503502	SP	445	Vanguardia	Meta	Villavicencio
5,70	-76,65	1104501	SP	53	El Caraño	Choco	Quibdó
3,85	-76,97	5311501	SP	14	Buenaventura	Valle	Buenaventura
2,45	-76,60	2603503	SP	1757	GL Valencia	Cauca	Popayán
1,38	-77,28	5204502	SP	1873	Antonio Nariño	Nariño	Chachagui
4,06	-74,66	4411502	AM	153	La Tagua	Putumayo	Leguízamo
4,20	-69,95	4801501	SP	84	Vasquez Cobo	Amazonas	Leticia
1,60	-75,53	4403502	SS	244	G Artunduaga	Caquetá	Florencia

Categoría

RS: Estación de radiosonda; SP: Estación sinóptica principal; SS: Sinóptica secundaria; CP: Climatológica principal; CO: Climatológica ordinaria; AM: Agro meteorológica

identificar procesos con frecuencia similar en las dos series con base en análisis espectral. Para el análisis de correlación se utilizó el coeficiente de Pearson, toda vez que los índices IMJ e IP analizados son variables continuas con distribución cercana a la normal, aunque con sesgo positivo; así, la correlación se basó en las series del IMJ pentadal original y en el IMJ suavizado con medias móviles de 3 puntos (tres pentadas) con las series originales del IP pentadal, decadal y quincenal. En la comparación de espectros se utilizó el espectro de onditas (según **Torrence & Compo, 1998**) del IMJ y del IP a fin de encontrar señales similares en un mismo intervalo de frecuencia.

Otra opción utilizada en el presente trabajo para explorar la relación entre IMJ y el IP fue el análisis de la respuesta de la precipitación de las regiones a fases extremas de la OMJ. Se tomaron seis eventos máximos y seis mínimos del IMJ y se analizó que reacción había en el IP pentadal. Con base en lo anterior se construyeron tablas y mapas que resumen y permiten visualizar la relación analizada.

Finalmente, los resultados obtenidos en la identificación de la relación IMJ y el IP regional se sintetizaron en mapas para apoyo para la predicción climática basados en

la respuesta identificada de la precipitación regional cuando el IMJ en 120°W o en 80°W sobrepase el valor de 2.0 o esté por debajo de -2.0.

Resultados y discusión

Una primera aproximación a la relación de las oscilaciones intraestacionales y la precipitación sobre el territorio colombiano se presenta en la figura 2 en que se compara el comportamiento de la anomalía de velocidad potencial sobre el nivel de 200hPa y la distribución espacial de las anomalías de precipitación mensual sobre el territorio colombiano. Es necesario tener en cuenta que el período analizado agosto/2009 - mayo/2010 estuvo influenciado por la fase negativa del ciclo ENOS generada por un evento La Niña, lo que en términos generales debería originar anomalías positivas de precipitación en gran parte del país. No obstante, en la medida como sobre el norte de Suramérica se registra la fase subsidente de la OMJ, hay una disminución de las anomalías positivas de precipitación e incluso aparición de regiones con anomalías negativas; por el contrario, la aparición de la fase convectiva de la OMJ agudizó la presencia de anomalías positivas sobre el país.

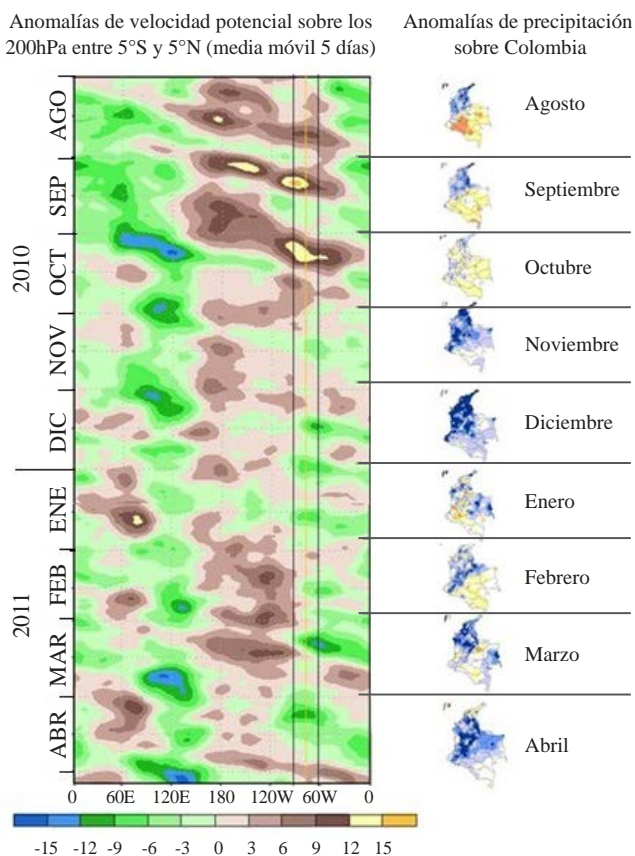


Figura 2. Comparación de comportamiento de la anomalía de velocidad potencial sobre el nivel de 200hPa y las anomalías de precipitación mensual sobre el territorio colombiano en el período comprendido entre agosto/2010 y mayo/2011. [Los colores azules y verdes (marrón y amarillo) en el gráfico Hovmöller de la izquierda representan valores positivos (negativos) o la fase convectiva (subsidente) de la OMJ; en los mapas de Colombia el color azul (anaranjado y amarillo) presentan lluvias por encima (por debajo) de lo normal. La franja vertical entre líneas negras indica la localización del norte de Suramérica; la línea amarilla muestra los 75W].

En la figura 2, para el primer trimestre presentado, se observan fases subsidentes destacadas de la MJO que coinciden con anomalías negativas de la precipitación especialmente en el Centro y Sur del territorio colombiano; por el contrario, los mapas de anomalías de la precipitación de noviembre, diciembre y abril donde predominan las anomalías positivas sobre gran parte del país concuerdan con fases convectivas de la MJO. Este seguimiento visual también conduce a detectar un aparente ciclo de 30 días en la OMJ sobre en norte de Suramérica, lo que podría sugerir que, por lo menos en el período analizado el modo cercano a los 60 días es menos marcado.

El cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre el IMJ120, IMJ80 con el IP5 de cada una de las estaciones del estudio arrojó valores muy bajos (entre 0,01 y 0,15) lo que podría estar sugiriendo que en el índice pentadal IP5 se

registra el efecto de oscilaciones de mayor frecuencia que la de la OMJ. Por ello se trabajó con un IP quincenal (IP15) pretendiendo descartar tales oscilaciones de muy corto período. Aun así, los valores del coeficiente de correlación no variaron significativamente en comparación con lo ya obtenido en el análisis descrito para IP5, sin embargo, en la figura 3 en la que se compara el comportamiento de las series del IMJ80 con el IP15 de tres estaciones climatológicas situadas en tres regiones diferentes, es posible observar a simple vista un marcado ciclo de 30 días (en una quincena hay un máximo, en la siguiente un mínimo y así sucesivamente) en las dos series de datos, aunque en las de la IP15 es menos persistente esta frecuencia.

El análisis comparativo del comportamiento del IMJ y de los IP evidencian la existencia de un modo de 30 días en la escala intraestacional. Sin embargo, al correlacionar las series de los dos índices no se logra detectar relación alguna (los valores de los coeficientes son muy bajos). Esto, como ya se anotó puede estar ocurriendo debido a que en la precipitación hay más modos de variabilidad intraestacional que la generada por las ondas de 30-60 días de la OMJ. Una vía para explorar este aspecto es la comparación de los espectros del IMJ y de las series de los IPs.

Antes de comparar los espectros de la serie de IMJ con las de IPs, se elaboraron los espectros de ondata para la serie del MJI de 120°W y 80°W, suavizadas con media móvil de 3 puntos, para el período 1994- 2004, con el fin de identificar las señales más significativas en el comportamiento de este índice. Estos espectros se presentan en la figura 4 en la que se puede ver que no hay diferencia entre los espectros de estos índices que presentan picos de potencia espectral a en la banda cercana a las 4-16 pentadas, es decir entre 20 y 80 días, además de resaltar las 128 y 512 pentadas, es decir 1,75 y 7 años, periodos correspondientes a la escala de la variabilidad interanual (cuasibienal y asociada al ciclo ENOS).

En la figura 5 se encuentra el análisis en onditas para las series del período 1994-2004 del índice pentadal de precipitación (IP5), suavizadas con media móvil de 3 puntos, de 2 estaciones de subregiones de las principales regiones naturales de Colombia. La figura 5a muestran los espectros de onditas del IP5 para dos estaciones de la región Caribe y se puede, para las dos estaciones, una señal significativa sobre las pentadas 4-16, muy notoria en la pentada 8, lo que coincide con lo registrado en el espectro de IMJ (Figura 4). Para la región Andina (Figura 5b) los espectros de las series del IP5 de las dos estaciones (Neiva y Aeropuerto Eldorado de Bogotá) muestran igualmente señal significativa sobre la banda 4-8 pentadas (20 y 40 días) como el IMJ, aunque algunas señales cercanas a 16 pentadas (80 días) son igualmente notorias; también se percibe la variabilidad interanual con señales sobre 256-512 pentadas. En los espectros correspondientes a la región Pacífico (Figura 5c) se pueden observar dos máximos de la potencia espectral que sobresalen significativamente; estas señales están sobre períodos similares a los que se observan en la figura 4 que presenta los espectros del IMJ (4

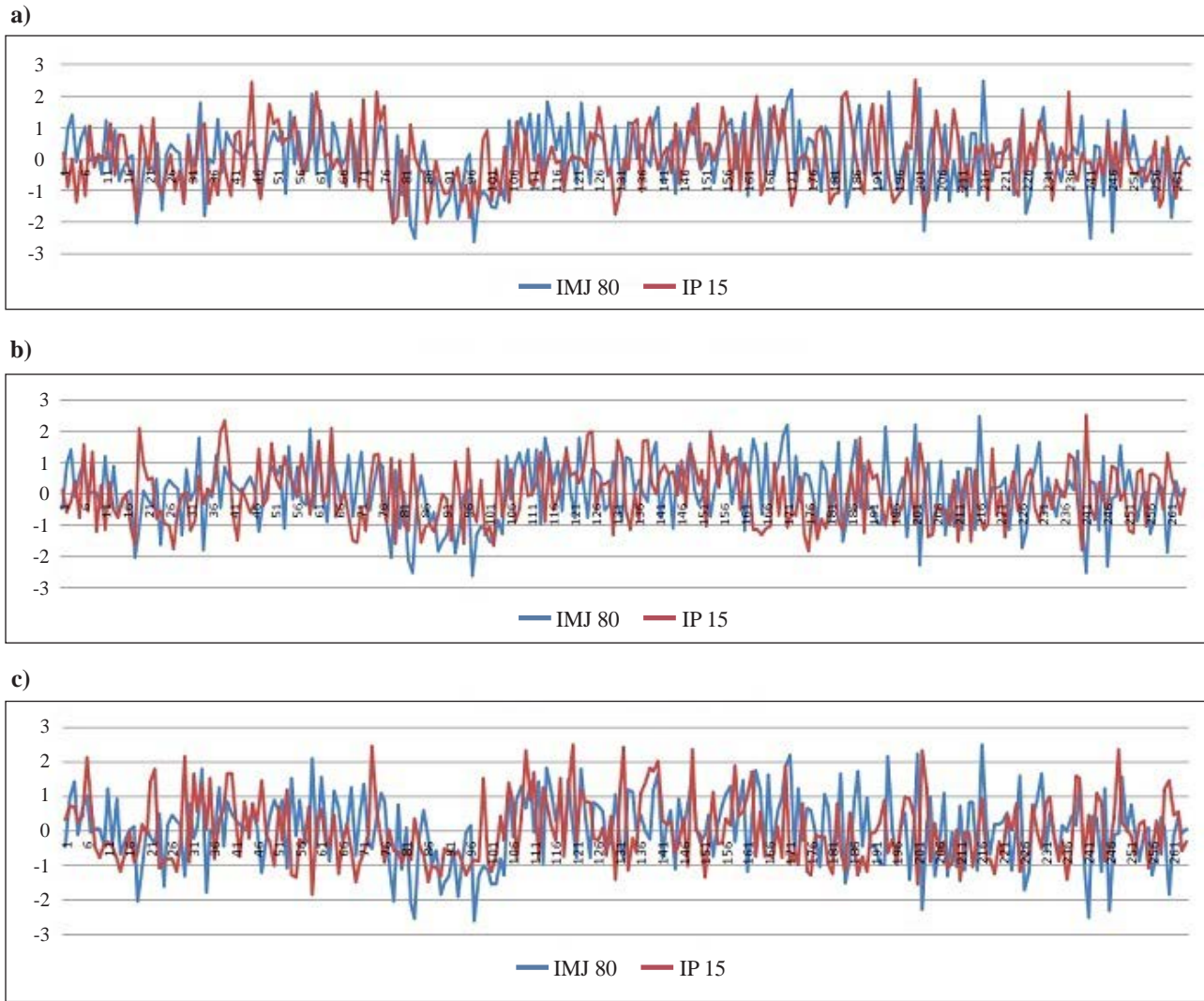


Figura 3. Análisis comparativo de las series del IMJ 80 y del IP15 de tres estaciones localizadas en las regiones Chocó (a), Antioquia (b) y Sabana de Bogotá (c) .

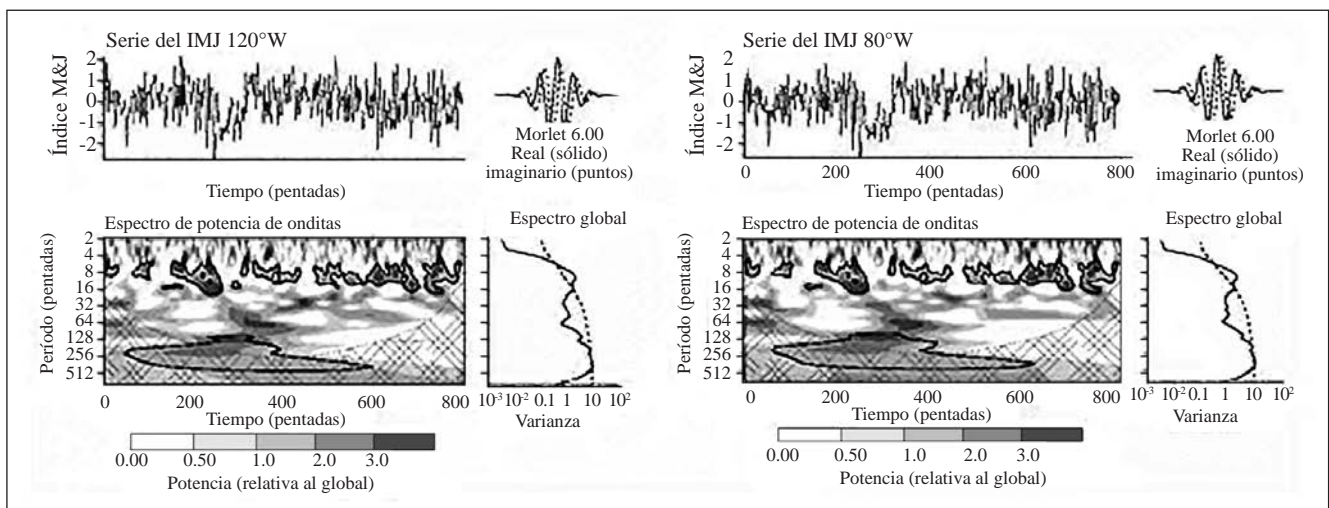


Figura 4. Espectro de potencia en onditas para IMJ 120W (a) y IMJ 80W (b) para la serie del periodo 1994-2004.

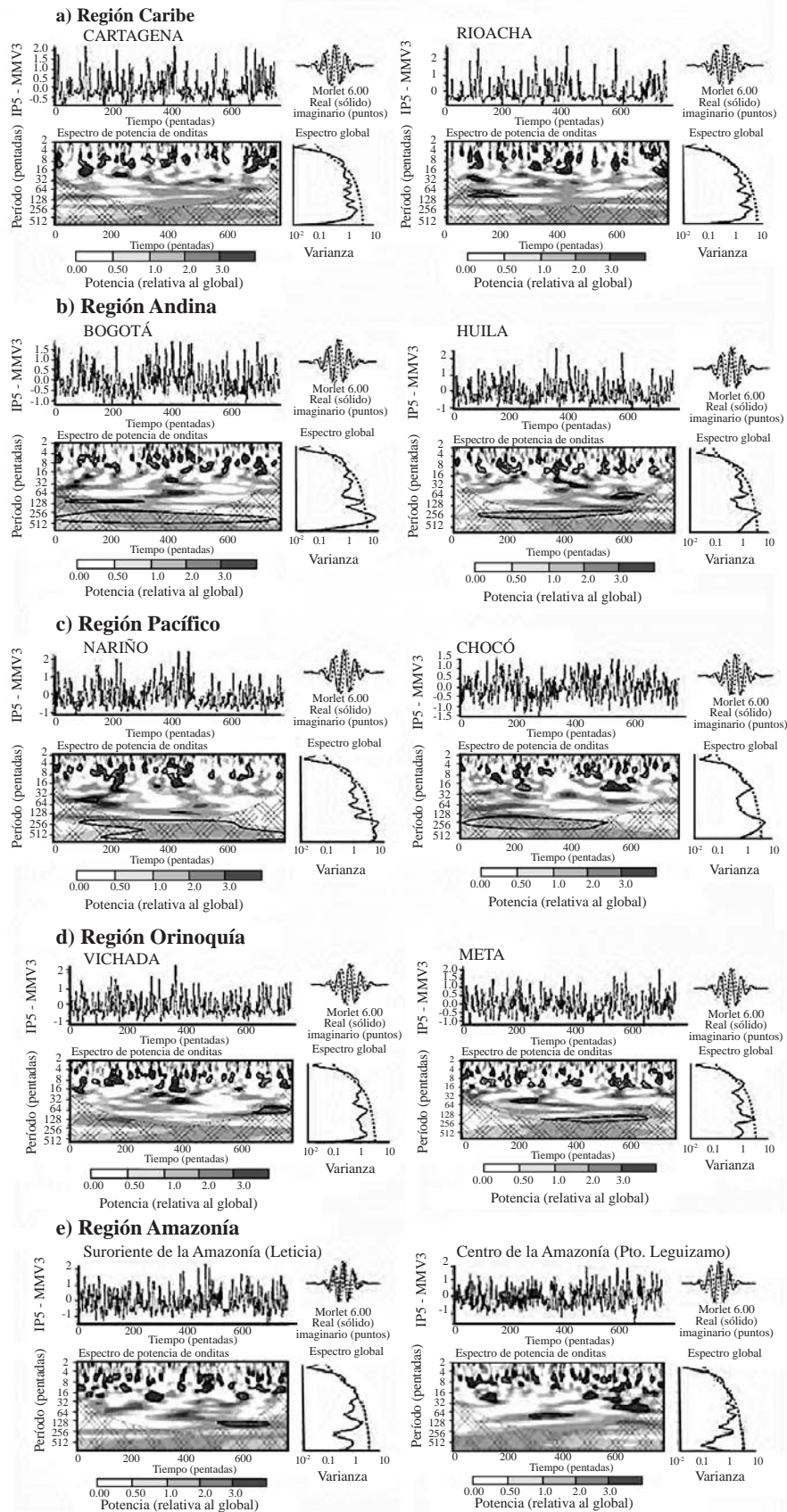


Figura 5. Espectro de potencia en onditas para las series del IP5 del período del período 1994-2004 de 12 subregiones de la región Caribe(a), Andina (b), Pacífico (c), Orinoquía (d) y Amazonía (e).

y 16 pentadas o 20 y 80 días). Igualmente se puede notar la presencia de otras oscilaciones con periodos del orden de los 300 a 600 días, correspondientes a variabilidad interanuales de la precipitación; en Chocó, se vislumbra una señal importante sobre la pentada 30 (150 días aproximadamente). El espectro de onditas para el IP5 en estaciones de la Orinoquia (Figura 5d) resalta también la señal sobre las pentadas 4-16, marcada sobre la pentada 6 (aprox. 30 días). La figura 5e, que muestra espectros de onditas del IP5 para estaciones de la Amazonía, destaca señales significativas sobre la pentada 6 (o 30 días) y en el sector de las pentadas 8-16 (40-80 días).

El análisis espectral para las series de los índices decadales de precipitación (IP10), suavizadas con media móvil de tres puntos, se presenta en la figura 6. En las regiones Caribe (Figura 6a), Andina (Figura 6b) y Pacífica (6c) los espectros muestran picos significativos sobre el sector de las 4-8 décadas, es decir 40-80 días, que podrían compararse con señales de variabilidad intraestacional. Para la Orinoquia (estaciones en Vichada y Meta en la Figura 6d), al igual que para la Amazonía (Caquetá y Leticia, en la Figura 6e) la señal destacada del espectro se presenta sobre la década 8 (80 días).

Los espectros de onditas de las series de IP quincenal (IP15) se presentan en la figura 7. Para todas las regiones la señal significativa se localiza entre las quincenas 2 y 4 que correspondería a períodos de 30-60 días. Se vislumbran otros picos, en la escala interanual, pero no sobresalen de la línea que representa el ruido rojo para considerarlos significativos.

Para el análisis del comportamiento de la precipitación de cada región bajo fases extremas de la OMJ, de las series del IMJ del período 1994-2004 se tomaron los 12 valores extremos (6 máximos con valores por encima de 2,0 y 6 mínimos con valores por debajo de -2,0) para la longitud de 120°W y se compararon con el IMJ en 80°W, el índice pentadal de precipitación, la precipitación acumulada en la pentada y la velocidad vertical sobre el nivel de los 500 hPa. (Para minimizar el efecto de la variabilidad interanual, a la serie de IP5 se le aplicó una media móvil de 25 puntos, y esta se le restó a cada valor de la serie, obteniendo una nueva serie IP5* en la que las oscilaciones interanuales quedaron filtradas o por lo menos reducidas). En la tabla 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/380/1811>, se muestra el resultado del análisis para algunas de las 24 estaciones ubicadas a lo largo del territorio colombiano. En dicha tabla, en la primera columna se indica la fecha de la pentada en la que el IMJ-120 muestra el valor extremo, en la segunda columna se señala dicho valor extremo; en las siguientes columnas para cada valor (fila) del IMJ-120 se toman dos valores (2 filas) de IMJ-80 (el primer valor (primera fila) corresponde a lo observado en la misma pentada del IMJ-120 máximo o mínimo, el segundo valor (segunda fila) al de la pentada siguiente, esto teniendo en cuenta los 5 días que demora el recorrido de la fase de la MJO de 120°W a 80°W), de índice de precipitación

(IP5*), de precipitación pentadal (PPT, en milímetros) y de velocidad vertical promedio de la pentada del extremo de OMJ (VVEL, en hPa/s).

En la tabla 1S se puede observar la diversidad de la respuesta a las fases extremas de la OMJ en diferentes regiones del país. Los movimientos verticales no presentan un patrón de respuesta definido, en tanto que el IP5* (resaltado en escala de colores correspondientes a intervalos del mismo) tiende a diferenciarse en su respuesta a las fases extremas de la OMJ, aunque en algunos casos la diferencia no es perceptible. Por ejemplo, en las regiones Caribe y Andina, la fase negativa (en los valores más bajos) tiende a propiciar lluvias abundantes y la fase positiva (en los máximos) a desestimular la precipitación, respuesta que se evidenció en estaciones localizadas en Montería, Riohacha, Santa Marta, Cartagena y San Andrés; para Cesar la respuesta se presenta al contrario: lluvias abundantes en la fase positiva y disminución de precipitación en la negativa.

En el sector sur del Pacífico colombiano (Nariño y Cauca) a los máximos del IMJ corresponde en general desactivación de la precipitación, a los mínimos – reactivaciones de la misma; pero en Chocó esta relación no es clara. En la Orinoquia, en el piedemonte llanero hay una relación clara: máximos corresponde a incremento de la precipitación, mínimos – reducción; sin embargo, al norte, en Arauca aunque se vislumbra el mismo tipo de respuesta, para el período de análisis se registró un evento de incremento extremo de lluvias bajo la fase positiva. Para la región amazónica no resulta clara la señal de respuesta de la precipitación a las fases extremas de la OMJ.

La respuesta de la precipitación de las regiones a las fases extremas se sintetizó en los mapas de la figura 8, los cuales pueden ser utilizados para predicción climática a un mes ya que conociendo la fase que dominaría sobre el territorio colombiano en el mes siguiente se podría anticipar si habría activación o receso de las lluvias.

La figura 9 presenta una prueba del esquema de predicción (mapas de la Figura 8) para el periodo desde junio de 2012 hasta noviembre de 2012 donde se perciben 2 periodos con fases extremas de la OMJ; una fase negativa (mínimos del IMJ) hacia mediados de junio y una fase positiva (máximos del IMJ) para la primera quincena de septiembre. Estos periodos se compararon con el esquema propuesto por el trabajo (en la columna vertical al centro) y con los mapas de anomalías de la precipitación presentados para estos meses (mapas de la columna de la derecha). Para la fase mínima observada en junio de ese año, el esquema de predicción señala amplias zonas con aumento de la precipitación, especialmente para sectores de Caquetá y Cauca y amplios sectores de la región Caribe, Norte de Santander, Meta y Cauca con disminución de las lluvias, sin embargo, al observar el mapa de anomalías de precipitación para junio se advierte que en amplios sectores del territorio colombiano se presentaron anomalías negativas de la precipitación, aunque el mapa de predicción y el de anomalías reales coinciden en sectores con anomalías

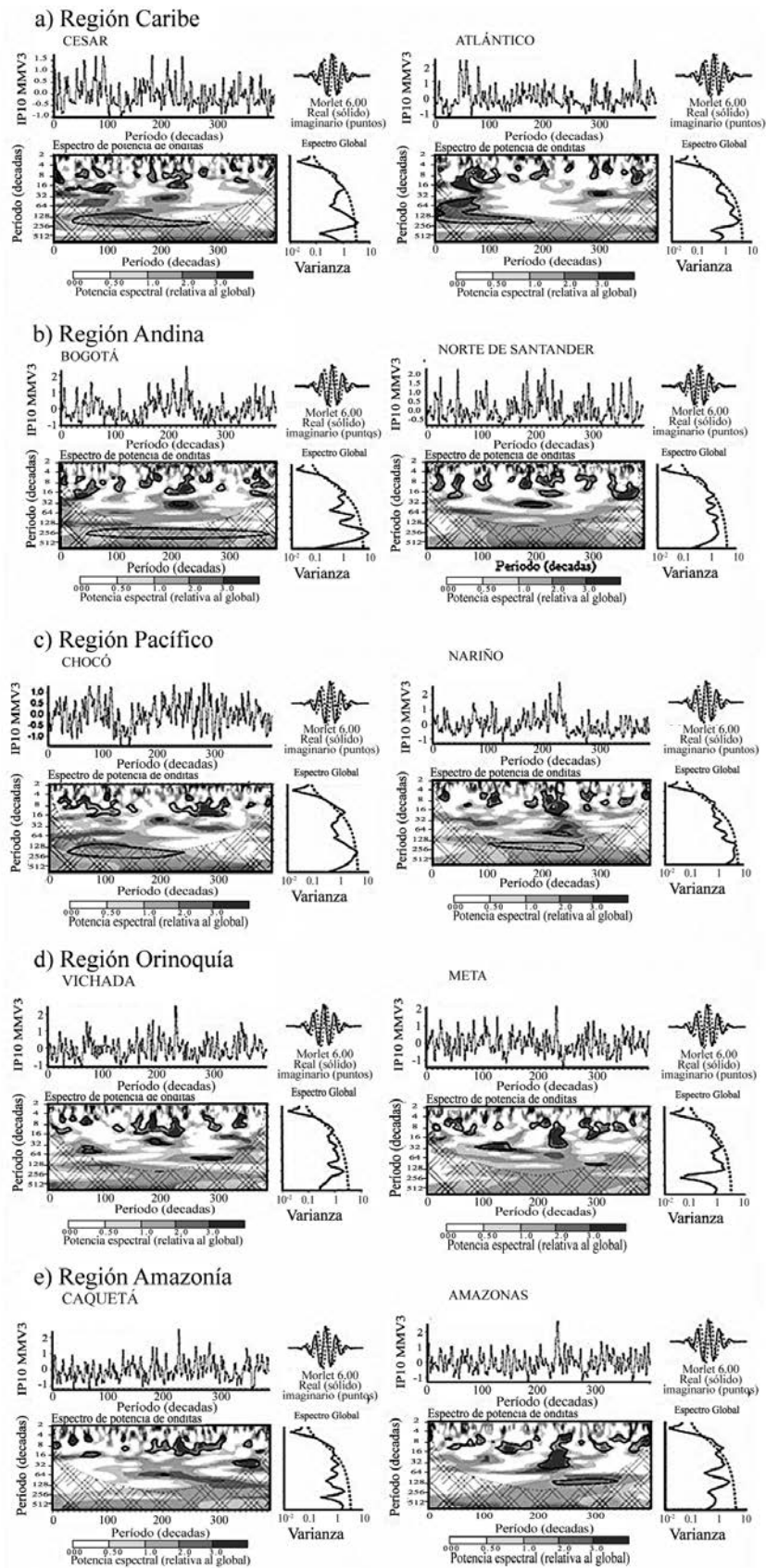


Figura 6. Espectro de potencia en onditas para las series del IP10 del período del período 1994-2004 de 12 subregiones de la región Caribe(a), Andina (b), Pacífico (c), Orinoquía (d) y Amazonía (e).

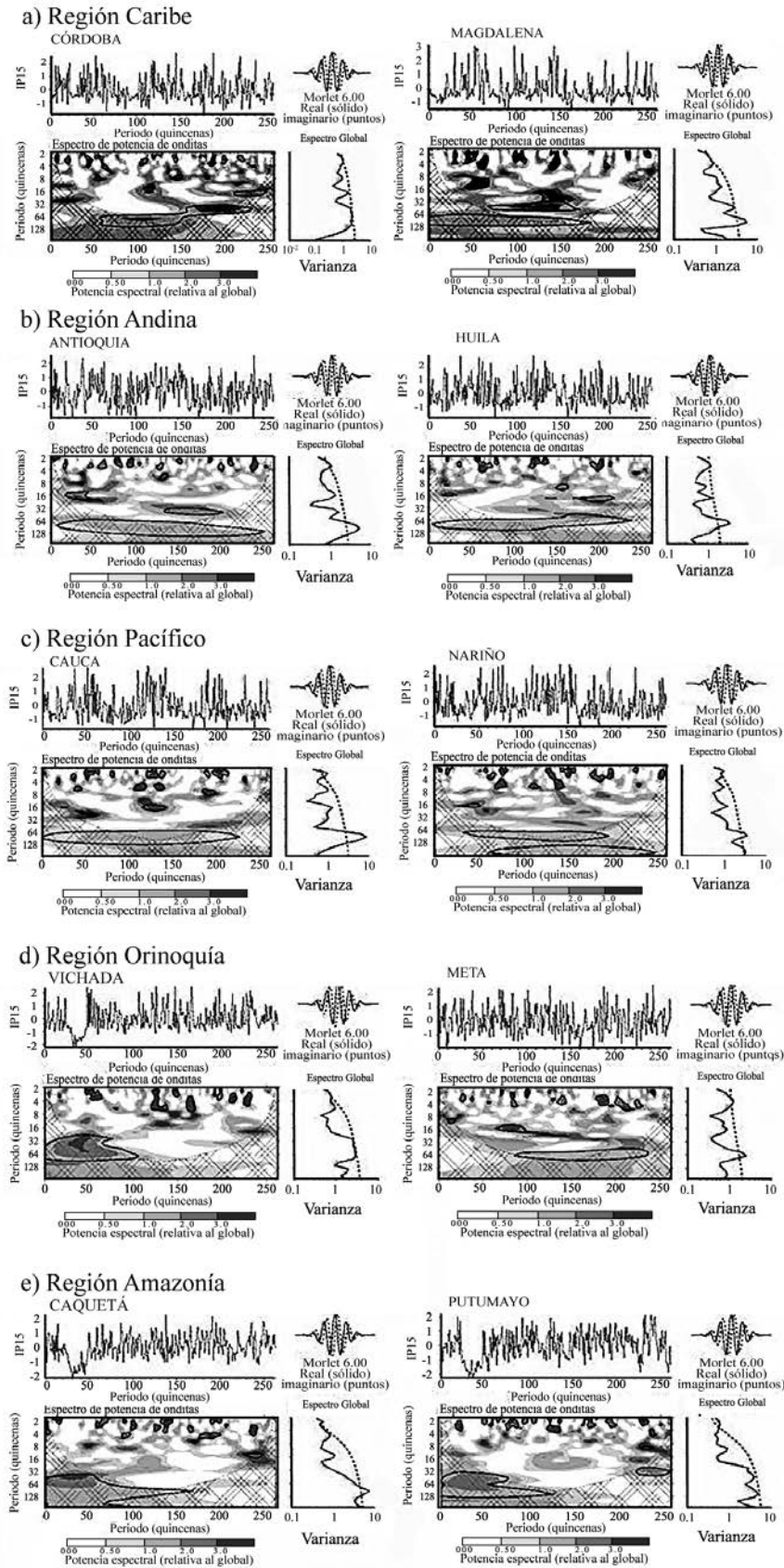


Figura 7. Espectro de potencia en onditas para las series del IP15 del período del periodo 1994-2004 de 12 subregiones de la región Caribe(a), Andina (b), Pacífico (c), Orinoquía (d) y Amazonía (e).

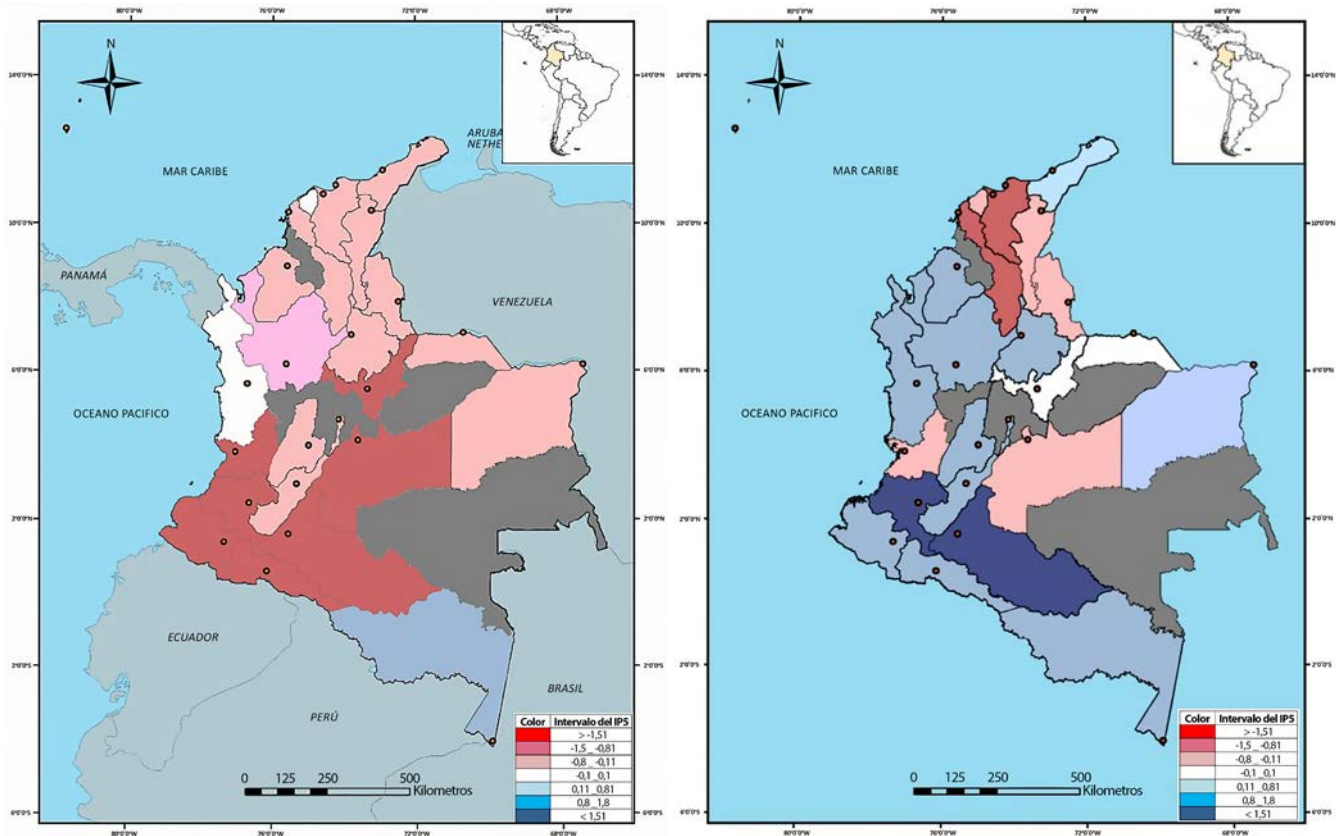


Figura 8. Respuesta del IP5* en diferentes regiones del territorio colombiano cuando la fase máxima (izquierda) o mínima (derecha) del IMJ está en 120° W. (Los colores rojo y rosado señalan disminución de la precipitación; los tonos de azul – aumento; el gris señala las regiones donde la señal no es clara hacia aumento o disminución.

positivas de precipitación especialmente hacia Amazonas, Córdoba, Santander y Chocó; también concuerdan las anomalías negativas de precipitación en sectores de la Región Caribe y Valle. Para la fase máxima del IMJ observada en la primera quincena de septiembre, el mapa de predicción indica una posible disminución de las lluvias a lo largo del territorio colombiano, exceptuando, sectores de Amazonas, Chocó y Atlántico; el mapa de anomalías mensuales de septiembre muestra anomalías negativas a lo largo del país, con algunas anomalías positivas sobre el oriente de la Orinoquia, Amazonas y Sur de la Región Caribe, situación que concuerda ampliamente con lo mostrado por el mapa de predicción para la fase máxima del IMJ.

Conclusiones

El análisis espectral del IMJ en 120°W y en 80°W permitió corroborar que para la región del norte de Suramérica el componente de 30 días de la OMJ se presenta más marcado que el de 60 o cualquier otro de la escala intraestacional, lo que en gran medida corrobora lo identificado en la exploración inicial.

El análisis espectral de las series de índice de precipitación pentadal, decadal y quincenal muestra claramente una señal sobre los 30-40 días que corresponde a la escala

intraestacional. También se hicieron evidentes señales de la variabilidad interaunal, pero la potencia de su espectro fue menor y con bajo grado de significancia, debido tal vez a que estas oscilaciones tienen menor amplitud que las intraestacionales.

El intento por cuantificar una relación entre el Índice de Madden-Julian y los índices de precipitación, toda vez que se encontró una señal común bastante marcada sobre el período de los 30-40 días, no dio resultados satisfactorios: los coeficientes de correlación fueron muy bajos. Tal vez esto se debió a la presencia de otras señales, aunque poco significativas en los espectros, que no fueron filtradas, actúan a manera de ruido y dificultan la visibilización de la relación.

El análisis de la respuesta de la precipitación regional (representada por los IP) ante fases extremas de las oscilaciones Madden-Julian (representadas por el IMJ) dio como resultado que bajo extremos positivos de la IMJ (fase positiva o subsidente) se produce disminución de la precipitación pentadal en algunas regiones del país; con valores extremos negativos de la IMJ (fase negativa o convectiva) ocurre aumento de la precipitación pentadal en varias regiones; para siete de las 24 regiones no se identificó un patrón de respuesta definido.

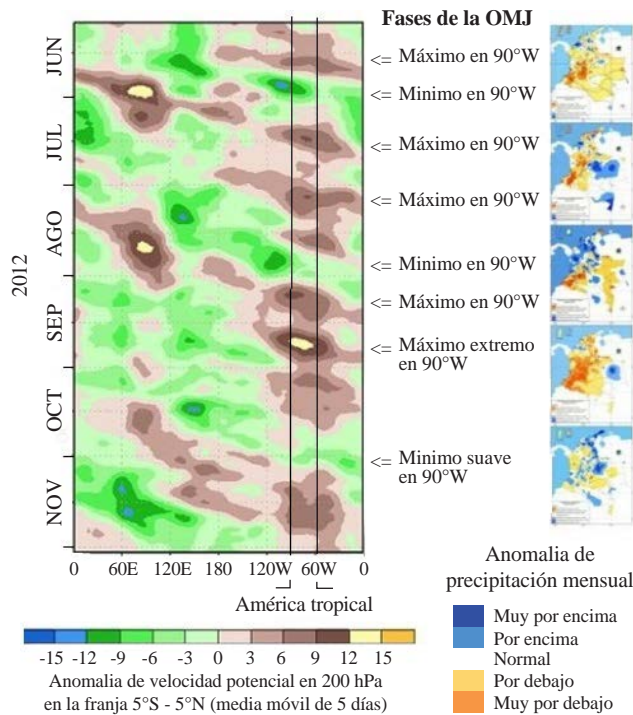


Figura 9. Comprobación de los mapas de predicción de respuesta de la precipitación de diferentes regiones de Colombia a fases extremas de OMJ. En la columna de la izquierda se muestra el comportamiento de la anomalía de velocidad potencial en 200hPa; en la columna vertical del centro se señalan las fases extremas de IMJ que indicarían cual mapa-esquema de la Figura 8 se utilizaría para la predicción; en la columna de la derecha los mapas de anomalías de la precipitación mensual obtenidos de los informes del IDEAM.

Sobre la base de la relación establecida entre los extremos de la IMJ y la IP pentadal en diferentes regiones del territorio colombiano, se elaboró un mapa que sirve de base para la predicción climática en la escala intraestacional, el cual se comprobó con buenos resultados en cuanto a la fase positiva y parcialmente satisfactorios para la fase negativa.

Información suplementaria

Tabla 1S. Eventos extremos de la OMJ representados por valores de IMJ mayores que 2.0 o menores que -2.0 y los respectivos valores del IP5, la precipitación pentadal y la velocidad vertical en 500 hPa en diferentes estaciones de las regiones analizadas. Vea la tabla 1S en: <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/380/1811>

Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto “Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre regiones del territorio colombiano” apoyado por la Dirección

de Investigación de la Sede Bogotá (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia bajo el código No. 14522, dentro de la línea de “Impacto socioeconómico de la variabilidad climática” que desarrolla el grupo de investigación “Tiempo, clima y sociedad” del Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, de la Universidad Nacional de Colombia. Los autores agradecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM por facilitar los datos de las estaciones utilizadas en el análisis que se expuso en el presente trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Álvarez, M.S., Vera, C.S., Kiladis, G.N., Liebmann, B. (2016). Influence of the Madden-Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. *Climate Dynamic*, **46** (1). doi: 1007/s00382-015-2581-6
- Carvalho, L., Jones, L. (2004). The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *J. Climate*. **17**: 88-108.
- Cuadros, N. (2010). Análisis de la variabilidad de la temperatura del aire en regiones de Colombia bajo la influencia de la oscilación Madden-Julian durante los años 1978-2008. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Donald, A., H. Meinke, B. Power, A. de H. N. Maia, M. C. Wheeler, N. White, R. C. Stone, and J. Ribbe (2006). Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophys. Res. Lett.* **33**: L09704, doi: 10.1029/2005GL025155
- Dorado, J. (2007). Tesis de Maestría, Programa de Postgrados en Meteorología, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Hurtado, G. (2000). La precipitación en Colombia. Nota técnica IDEAM, No. IDEAM/METEO/006/2000. Bogotá. 30 p.
- Janicot, S., Sultan, B. (2001). Intraseasonal modulation of convection in the West Africa monsoon. *Geophys Res Lett.*, **28** (3): 523-526.
- Jones, C., Schemm, J-E. E. (2000). The influence of Intraseasonal Variations on Medium- to Extended-range Weather Forecasts over South America. *Monthly Weather Review*, **128** (2): 486-494.
- Krishnamurti, V., Shukla, J. (2007). Intraseasonal and Seasonally persisting patterns of Indian Monsoon rainfall. *J. of Climate*, **20** (1), 3-20.
- Lau, W., & Waliser, D. (2012). *Intraseasonal Variability in the atmosphere-ocean climate system*. Chichester. Springer-Praxis Books in Environmental Sciences. Berlin-Heidelberg, 613p.
- Madden, R., Julian, P. (1971). Detection of 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* **28** (7): 702-708.
- Martin, E., Schumacher C. (2012). Modulation of Caribbean precipitation by the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 813-824.
- NOAA, (2010). Climate Prediction Center (CPC). Recuperado el 12 de Octubre de 2010, de http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_OMJ_index/proj_norm_order.ascii.

- Paegle, J.N., Byerle, L.A., Mo, K.C.** (2000). Intraseasonal Modulation of South American Summer Precipitation. *Monthly Weather Review*. **128** (3): 837-850
- Pabón, J., J. Dorado,** (2008). Intraseasonal variability of rainfall over northern South America and Caribbean. *Earth Sci Res J.*, v. **112**: 194-212.
- Pabón, J.D.** (2011). Improving Climate Prediction Schemes with Intraseasonal Variability: A Key Tool toward Hydro-meteorological Disasters Reduction in Tropical America. In: "Natural Disasters Policy Issues and Mitigation Strategies" (Andi Eka Sakya, (Ed.), Centre for Science & Technology of the Non-Aligned and other Developing Countries (NAM S&T Centre), New Delhi, India, 229p), 127-137.
- Poveda, G., Mesa, O., Agudelo, P., & Alavarez, J.** (2002). Influencia del ENSO, oscilación Madden-Julian, ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diario de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia. *Meteorología Colombiana*. **5**: 3-12.
- Torrence, C., Compo, G.** (1998). A practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Of Am. Meteor. Soc.* **79** (1): 61-78.
- Torres-Pineda C. E.** (2012). Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano. Tesis de Maestría, Programa de Postgrado en Meteorología, Departamento de Goeciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 80 páginas.
- Trickey, M., Cornejo, J.** (2012). Evaluación de la oscilación Madden-Julian en la predicción de niveles de la costa ecuatoriana. *Aqua-Lac*. **2** (1): 37-44.
- Wang, X., Zhang, X.** (1996). Intraseasonal oscillation and associated spatial-temporal structures of precipitation over China. *J. of Geophysical Research*. **101**: 19035-19042.
- Waliser, D.E., Lau, K.M., Stern, W, Jones, C.** (2003). Potential Predictability of the Madden–Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**: 33-50. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-84-1-33>
- Ye, H., Cho, H.** (2001). Spatial and temporal characteristics of intraseasonal oscillation of precipitation over the United States. *Theoretical and Applied Climatology*, **68** (1): 51-66.
- Yepes, J., Poveda, G.** (2013). Diagnóstico y predictabilidad de la lluvia en Colombia a escala intraestacional. *Revista Colombia Amazónica*, **6**: 17-29.
- Zhang, C.** (2013). Madden-Julian Oscillation. Bridging Weather and Climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **94** (12), pp. 1849-1870. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>

Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia

Carlos Alberto Andrade-Amaya^{1,*}, Alex José Ferrero-Ronquillo², Hermann León-Rincón², Héctor Mora-Páez³, Henry Carvajal-Perico⁴

¹Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia

²Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, Cartagena, Colombia

³Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia

⁴Dirección de Geociencias Básicas, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 27 de abril de 2016

Resumen

Se analizó la tendencia del ascenso del nivel del mar en Cartagena con respecto a otros puertos en el mar Caribe en el contexto de los cambios que se aprecian en la línea de costa en la región. La comparación entre mapas del sur de la Bahía de Cartagena elaborados en 1735 y 2011 evidenció la desaparición de islas y zonas de manglar en una amplia zona del área suroeste. La pérdida de zona costera en la Bahía se refleja en una mayor tasa de ascenso del nivel del mar en Cartagena debido a la subsidencia local, lo cual requiere de acciones inmediatas de prevención. Los datos geodésicos de la estación GPS instalada sobre el techo de la edificación del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, revelaron una posible subsidencia en la región de la Isla de Manzanillo, la cual podrá contrastarse con los datos que puedan obtenerse de una estación empotrada sobre la superficie terrestre. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Bahía de Cartagena; Subsidencia local; Erosión costera; Geodesia espacial.

On coastline changes between 1735 and 2011 and subsidence in Cartagena Bay, Colombia

Abstract

We analyzed the trend of sea-level rise in Cartagena with respect to other ports in the Caribbean in the context of coast line changes in the region. The comparison between maps made in 1735 and 2011 of south Cartagena Bay showed the loss of islands and mangrove patches in a large area of the southwest. The loss of coastal zone in the Bay is reflected in a greater trend of sea-level rise in Cartagena due to local subsidence, which requires immediate action. Geodesic data from a GPS station installed on the roof of the *Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas*, CIOH, building showed a possible subsidence in the Manzanillo Island region, the can be contrasted as more data will be acquired from the station installed on land. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Cartagena Bay; Local subsidence; Coastal erosion; Space geodesy.

Introducción

En los ciclos climáticos glaciales e interglaciales el nivel del mar tuvo una variación del orden de 120 m, aproximadamente. Desde entonces, se ha mantenido en un nivel muy cercano al actual, pero con claras tendencias ascendentes como resultado del efecto de fenómenos como el calentamiento del agua de los océanos, el aporte de agua por fusión de glaciares y mantos de hielo y la actividad tectónica en los límites de placa, lo cual genera movimientos verticales (*International Panel for Climate Change, IPCC*, 2013). En el informe de este organismo se establece una tasa global promedio del cambio ascensional del nivel medio del mar de $1,7 \pm 0,2$ mm por año para todo el siglo XX, de 1,8 mm por año entre 1961 y 2003, y entre 2,8 y 3,6 mm por año desde 1993, debido, principalmente, al calentamiento global, la fusión de glaciares y el deshielo de Groenlandia y la Antártica.

Las variaciones del nivel del mar son el resultado de diferentes fuentes físicas que usualmente se distinguen por su tiempo de duración, así, para ondas superficiales de gravedad, entre 1 y 20 segundos; para *seiches* y tsunamis, rangos de minutos a horas; para las mareas, entre medio día y uno, y para los fenómenos geológicos y climatológicos, de uno a diez años y hasta periodos de larga duración. En este contexto, la forma de hacer las diferentes mediciones de tal forma que garanticen la obtención de datos confiables y su correcta interpretación constituye un gran reto (*Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC/UNESCO*, 2006). Existen varias formas de medición de los

*Correspondencia:

Carlos Andrade, candrade@exocol.com

Recibido: 06 de abril de 2016

Aceptado: 21 de febrero de 2017

cambios del nivel del mar, entre las cuales se cuentan los mareógrafos de diferentes tipos de tecnología, las registradas mediante radar altimétrico, así como las mediciones geodésicas hechas mediante sistemas de navegación por satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS), y las terrestres de alta precisión. A manera de ejemplo, en la figura 1 se muestra el valor de $2,9 \pm 0,4$ mm por año resultado de la estimación del cambio global del nivel medio del mar a partir de mediciones de satélites altimétricos de radar hechas entre 1992 y 2016 con la aplicación tecnológica diseñada en el Laboratorio de Altimetría por Satélite de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* de Estados Unidos (NOAA).

Por lo general, las estaciones permanentes de medición del nivel del mar alrededor del mundo se han dedicado principalmente a la medición de las mareas y del nivel medio, lo cual es el principal objetivo del *Global Sea Level Observing System* (GLOSS), desarrollado bajo el auspicio de la IOC/UNESCO. Para entender adecuadamente los cambios del nivel del mar y las diferencias que puedan presentarse entre diferentes sitios de medición, es necesario tener en cuenta los factores directamente relacionados con la naturaleza del agua, así como los movimientos verticales de la superficie asociados con procesos naturales, tales como los efectos cosísmicos, el ajuste glacial isostático y la tectónica de placas, y los procesos inducidos por el hombre, como la extracción de agua.

Análisis del nivel relativo del mar y de los cambios en la línea costera

Datos de mareógrafos. Con el mareógrafo instalado en la punta de Castillogrande de la Bahía de Cartagena se recolectaron datos entre el 2 de septiembre de 1951 y el 26 de abril de 1993. Reubicado posteriormente en el muelle del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas-CIOH, en la Isla de Manzanillo, las observaciones con el mareógrafo se iniciaron el 1° de mayo de 1993. Estos datos, contenidos en la base de datos de la NOAA, fueron empleados por **Torres, et al.** (2006) para estimar el aumento del nivel medio del mar en la Bahía de Cartagena, el cual fue de 3,58 mm por año.

Posteriormente, en un nuevo estudio en el cual se empleó el mismo grupo de datos se estableció que en la Bahía de Cartagena se apreciaba una tendencia al aumento relativo del nivel del mar de 4,5 mm por año (Figura 2); sin embargo, dicha información debe considerarse con suma precaución dada la incertidumbre que acarrea el cambio de posición del equipo. En este sentido, en el puerto de Cristóbal en Panamá el registro solamente mostró un aumento de 1,6 mm por año (**Andrade, 2008**).

Las tendencias del incremento del nivel medio del mar en las costas colombianas también han sido analizadas por **Rangel & Montealegre** (2003), **Pabón** (2003a, 2003b), y **Pabón & Lozano** (2005) empleando las series de nivel medio del mar en el Pacífico y el Caribe y los datos de la

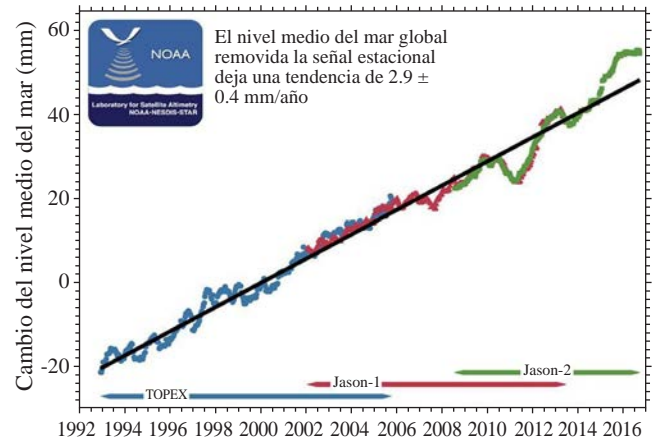


Figura 1. Cambio global del nivel medio del mar, calculado desde misiones de altimetría satelital para el período 1993-2016. La tendencia lineal muestra que ha subido a razón de $2,9 \pm 0,4$ mm/año. Fuente: Laboratorio para Altimetría por Satélite NOAA-NESDIS-STAR.

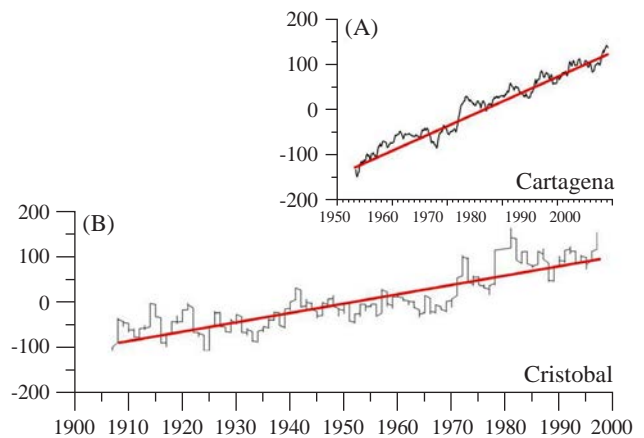


Figura 2. El nivel del mar medido en (A) la Bahía de Cartagena desde 1951 hasta el 2000 y (B) en el puerto de Cristóbal (Panamá) desde 1907 hasta el 2000. Las líneas rojas representan la tendencia lineal de las series. En Cartagena fue de 4,8 mm/año y en Cristóbal fue de 1,6 mm/año, (modificado de Andrade, 2008).

topografía del océano generados por el programa TOPEX/Poseidon. Dichos trabajos permitieron concluir que entre 1961 y 1990, el incremento regional del nivel del mar tuvo un ritmo de 3 a 5 mm por año en el Pacífico, y de 1 a 2 mm por año en la costa Caribe. Por su parte, el Laboratorio de Altimetría por Satélite de la NOAA, empleando datos obtenidos con radar altimétrico, obtuvo un valor de $2,5 \pm 0,4$ mm por año para el período de 1993 a 2016 (Figura 3).

En un análisis reciente de las tendencias para el período de 1908 a 2009, **Torres & Tsimplis** (2013) consignaron en Cartagena valores del orden de $5,3 \pm 0,3$ mm por año en los últimos 44 años; en Cristóbal, de $1,9 \pm 0,1$ mm por año en un periodo de 101,7 años; en Magueyes, Puerto Rico, de $1,3 \pm 0,2$ mm por año en 55 años de observación, y en Lima

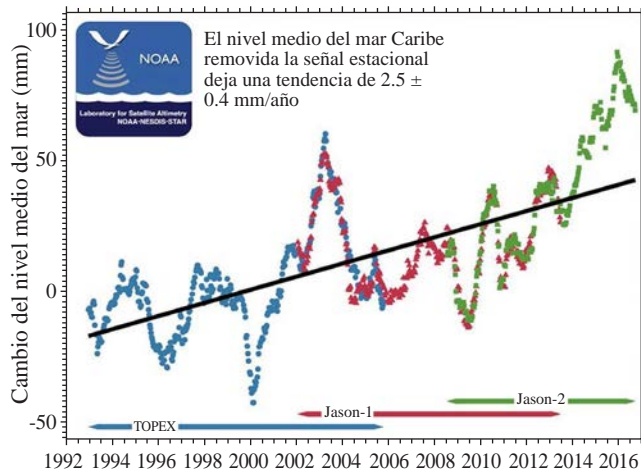


Figura 3. Estimación del cambio del nivel del mar en el Caribe a partir de datos obtenidos con radar altimétrico para el período 1993-2016 con un valor de $2,5 \pm 0,4$ mm/año. Fuente: Laboratorio para Altimetría por Satélite NOAA-NESDIS-STAR

Tree, Cayos de la Florida, de $1,8 \pm 0,5$ mm por año en 32,2 años de observación, lo cual les permitió establecer que la tendencia ascensional del nivel relativo en Cartagena es dos o tres veces mayor que en los otros puertos considerados. En un estudio posterior, estos mismos autores (Torres & Tsimplis, 2014) determinaron la variabilidad temporal de los extremos en los registros de varias estaciones, incluidas las anteriores, con más de 20 años de datos. Para Cartagena solo analizaron el segmento entre 1951 y 1993 debido a la pérdida de continuidad en los datos, así como un segmento más corto para el período de 1994 a 2000 (Figura 4).

Mediciones sobre mapas. Con el propósito de observar los cambios en la línea de la costa y en las profundidades de la Bahía, se utilizaron mapas antiguos que tuvieran el mayor detalle posible para compararlos con la carta náutica del área elaborada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) en 2011. Los mapas escogidos fueron: a) el mapa levantado por **Herrera y Sotomayor**, presumiblemente en 1721, en el área de Bocachica, y b) el plano elaborado por **Antonio de Ulloa** en 1735. El plano de la Bahía de Cartagena fue levantado por Don **Juan de Herrera y Sotomayor**, ingeniero militar, delineado por Don **Carlos de Briones Hoyo y Abarca**, y ratificado por **Antonio de Ulloa**, y corresponde a una escala aproximada de 1:40.200 (**Herrera y Sotomayor & Hoyo y Abarca**, 1721) (Figura 5). El segundo mapa, de extraordinario detalle para la época, especialmente porque resalta varias islas de manglar que existían dentro de la Bahía de Cartagena y resuelve las principales formas de los bajos fondos, ofrece varios puntos conspicuos que se pueden utilizar para su georreferenciación. Este mapa manuscrito, coloreado a mano en pluma y tinta, fue elaborado por **Herrera y Sotomayor & Ulloa**, 1735), quien se basó en el mapa levantado alrededor de 1721. En él se muestra con gran detalle la Bahía de Cartagena de Indias y el área costera

adyacente a la actual ciudad de Cartagena, Colombia. El mapa está orientado por una rosa de los vientos con el Norte apuntando hacia la izquierda y la longitud se estableció con relación al Real Observatorio Astronómico de Tenerife, en las islas Canarias. Los sondeos y las líneas punteadas indican la batimetría. Como se aprecia en el mapa, el sector de la Bahía de Cartagena bajo observación se encuentra al sur de la isla de Tierrabomba y al norte de la isla de Barú, y se caracteriza por tener una línea de costa defendida por manglares casi en su totalidad. En la figura 6 se presenta este mapa, el cual fue debidamente georreferenciado para los propósitos de este trabajo. Como referencia moderna se utilizó la carta náutica COL 264 de la Bahía de Cartagena, en su tercera edición (2011), la cual muestra la línea de costa más actualizada y sirvió para observar los cambios ocurridos en los casi tres siglos que median entre esta y los mapas antiguos.

Dichos mapas se digitalizaron empleando 20 puntos de control distribuidos en toda el área para la georreferenciación mediante el programa ArcGis 10.0. Las líneas de la costa se compararon entre sí y los colchones de manglar en el plano de **Herrera y Sotomayor** y los dibujados por **Herrera y Sotomayor & Ulloa** (1735) se superpusieron sobre la carta náutica No. 264 elaborada por el CIOH de la Dirección General Marítima (Figura 7).

Mediciones geodésicas espaciales por GPS. *Estación Cartagena.* La estación Cartagena, denominada CART, forma parte de la red MAGNA-ECO del Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” de Colombia. Es una estación geodésica GPS instalada el 2 de marzo de 2000 en el techo de una de las edificaciones que conforman el CIOH en la Isla de Manzanillo en Cartagena. Los datos de esta estación, almacenados en SONEL (<http://www.sonel.org>), centro de datos del sistema global de navegación por satélite (*global navigation satellite system*, GNSS) del GLOSS, fueron empleados por **Santamaría-Gómez** (2010) para obtener un valor de velocidad vertical de $-1,43 \pm 0,35$ mm por año, correspondiente a la solución reprocesada conocida como URL4, del Consorcio Centro de Análisis TIGA de la Universidad de La Rochelle, Francia, a partir de más de 300 estaciones GPS, 200 de las cuales cuentan, además, con mareógrafos. Las velocidades se estimaron a partir de series de tiempo mensuales de posición en un período de 13 años (entre 1996 y 2009), y se expresaron en el *International Terrestrial Reference Frame*, ITRF2005. Posteriormente, **Santamaría-Gómez, et al.** (2012) las reprocesaron y obtuvieron el campo de velocidades de 326 estaciones distribuidas globalmente, 200 de ellas con mareógrafos, bajo la solución denominada URL5, la cual fue el resultado de un nuevo análisis de 16 años de datos de GPS (entre 1995 y 2010), y se expresó en el ITRF2008. Las velocidades GPS se obtuvieron como paso final del análisis de las soluciones globales de red, empleando el programa GAMIT-GLOBK (**Herring, et al.**, 2010a, 2010b), con una estrategia de procesamiento diferencial de GPS y una solución a largo plazo mediante el programa CATREF, el cual permite la

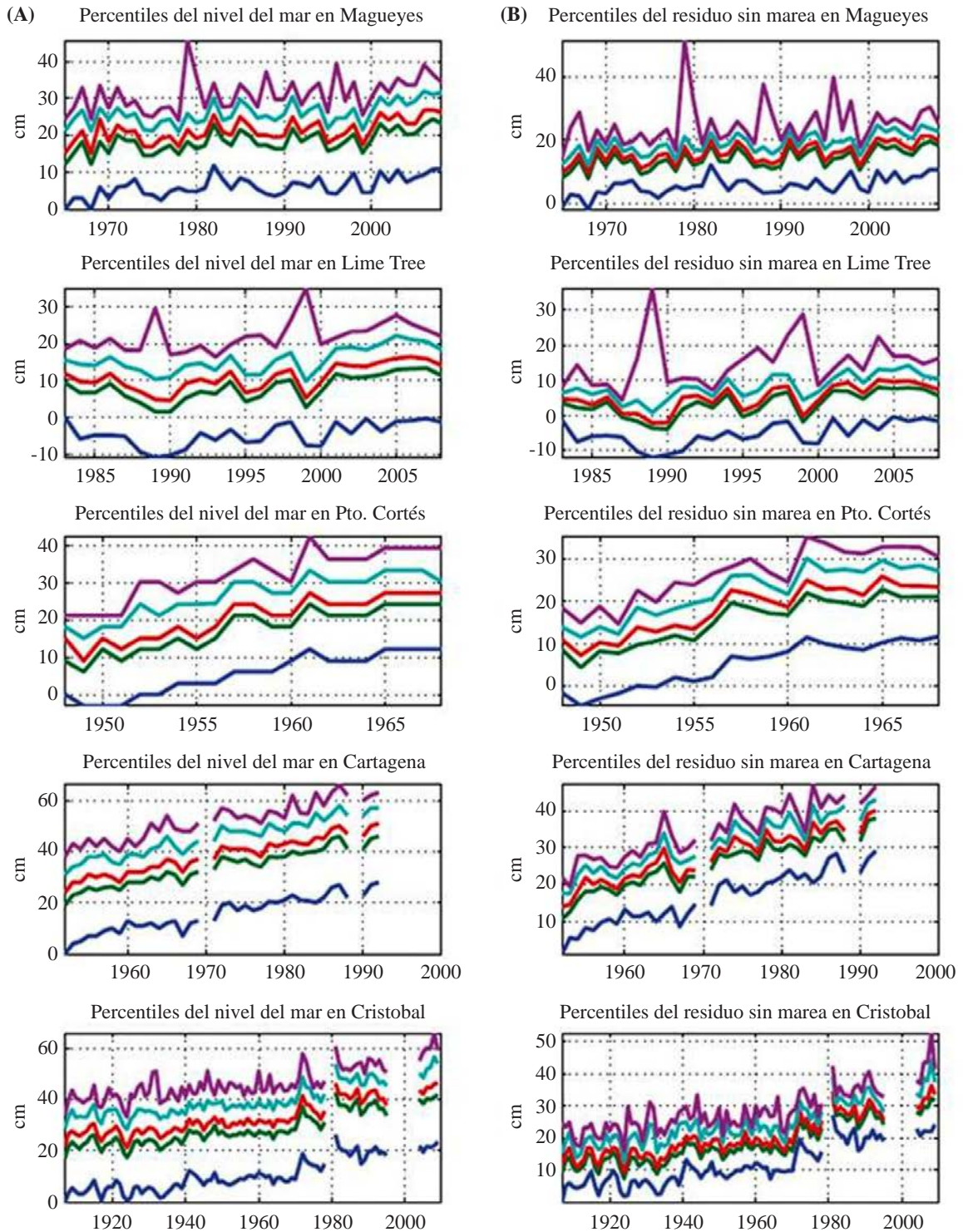


Figura 4. Percentiles 50, 90, 95 y 99,9, de la parte inferior a la superior en cada gráfica, calculados con (A) observaciones y (B) residuos no mareales en Magueyes, Lime Tree, P. Cortes, Cartagena y Cristóbal. Las series de tiempo son referenciadas al primer año de nivel medio de mar. Tomada de Torres & Tsimplis (2014)

combinación y el análisis de marcos de referencia terrestres. Al reprocesar los datos, **Santamaría** (2012) obtuvo una velocidad vertical de $-2,19 \pm 0,54$ mm por año con base en datos de 8,54 años recolectados en la estación CART.

Estación CIOH. Bajo el marco del proyecto de investigación e innovación tecnológica conocido como GeoRED (Red Nacional de Estaciones del GNSS con propósitos geodinámicos), el Grupo de Investigaciones Geodésicas

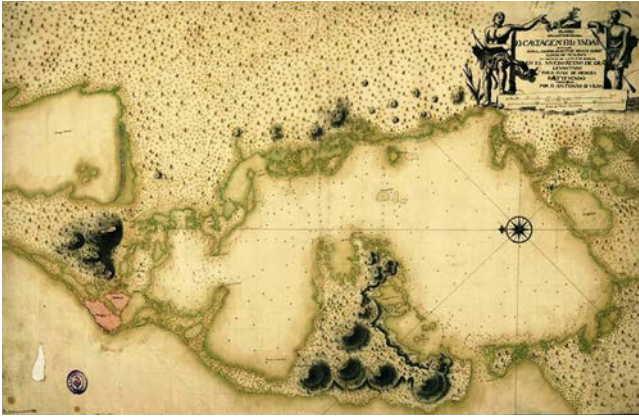


Figura 5. Plano de la Bahía de Cartagena, levantado por Don Juan de Herrera y Sotomayor, delineado por Don Carlos de Briones Hoyo y Abarca, y ratificado por Antonio de Ulloa; corresponde a una escala aproximada de 1:40.200, (Herrera y Sotomayor, 1721). Fuente: Biblioteca Nacional de España



Figura 6. Recuadro del área suroeste de la Bahía de Cartagena en el plano de Herrera y Sotomayor & Ulloa de 1735 debidamente georreferenciado.

Espaciales del Servicio Geológico Colombiano, GIGESGC, instaló una estación geodésica espacial del GNSS en predios del CIOH a finales de octubre de 2014. La instalación se hizo directamente sobre el terreno, con el fin de garantizar estabilidad en la posición de la antena y obtener observaciones de gran confiabilidad. La base de la antena está soportada por una estructura metálica en acero inoxidable cuyo mástil central, sobre el cual se coloca directamente la antena del GNSS, fue empotrado a una profundidad de 19,4 m, y sobresale 1,4 m de la superficie. El procesamiento diario de los datos se hace con el programa GIPSY-OASS II (Zumberge, *et al.*, 2007), desarrollado por el *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA (JPL-NASA), cuyos resultados son procesados, a su vez,

con el programa HECTOR (Bos, *et al.*, 2013), mediante el cual se generan las series de tiempo geodésicas y se estiman las velocidades.

Resultados y análisis

Información de los mareógrafos. El análisis de los resultados de los mareógrafos sugiere que la elevación del mar en el área de la Bahía de Cartagena se está incrementando en una proporción cercana al doble con respecto a los datos obtenidos en los costados del mar Caribe. Sería de esperar que la superficie libre del mar tuviera medidas parecidas en sitios relativamente cercanos, pero el hecho de que las tendencias del nivel del mar medidas en los puertos de Cartagena y Cristóbal, separados solamente por 300 millas, sean tan diferentes indicaría que en el sector de la Bahía de Cartagena existe un elemento adicional causado por el cambio climático que incide en un mayor y más veloz aumento del nivel del mar. Para tratar de entender las posibles causas de esta diferencia, se procedió a evaluar la geomorfología de la Bahía de Cartagena mediante el análisis de las variaciones en la zona costera a partir de la comparación de las líneas de costa y de las profundidades medidas en diferentes épocas, y, asimismo, se inició el análisis de las mediciones geodésicas espaciales del GNSS disponibles en el sector.

Línea de costa. Por otra parte, el análisis de la línea de costa demarcada en la carta de 1735 en el sur de la Bahía de Cartagena, comparada con la carta de navegación actual, demostró que la zona costera ha perdido 342,4 hectáreas de terreno, especialmente de los llamados “colchones de mangle”, zonas de manglar que conformaban el borde norte de la isla de Barú dentro de la Bahía, como puede observarse en el mapa de la figura 8. El mapa de la figura 5 permite apreciar que la zona del sur estaba cubierta por una franja amplia de manglar cuya punta occidental se extendía hacia el norte sobre la boca de Ciénaga Honda. En la esquina suroeste de la Bahía existió una laguna protegida por islas y colchones de manglar que hoy son bajos fondos de 1,5 m de profundidad, en tanto que en el sector de Bocachica lo más significativo es la desaparición casi total de Isla Abanico.

Isla Abanico era una isla de 42 hectáreas en 1735 (Figura 9a), muy importante para la defensa de la Bahía; en abril de 1741 allí se instalaron baterías de artillería, muy efectivas para la protección combinada de los fuertes (Blas de Lezo, 1741). Esta isla apareció en los mapas con su misma forma hasta finales del siglo XIX; empezó a desaparecer en los mapas del siglo pasado y hoy es apenas una franja de manglar de 3,09 hectáreas (Figura 9b). Andrade & Franco (2016) han descrito los problemas de dicha isla y de los manglares entre Bocachica y Caño de Loro.

En resumen, la comparación de estas dos cartas náuticas evidenció cómo la línea de costa del sur de la Bahía de Cartagena ha cambiado: varias hectáreas de terreno de manglar y de islas han desaparecido en todo su perímetro, especialmente en el punto más abrigado contra el oleaje y las condiciones extremas del mar, lo cual indica un efecto

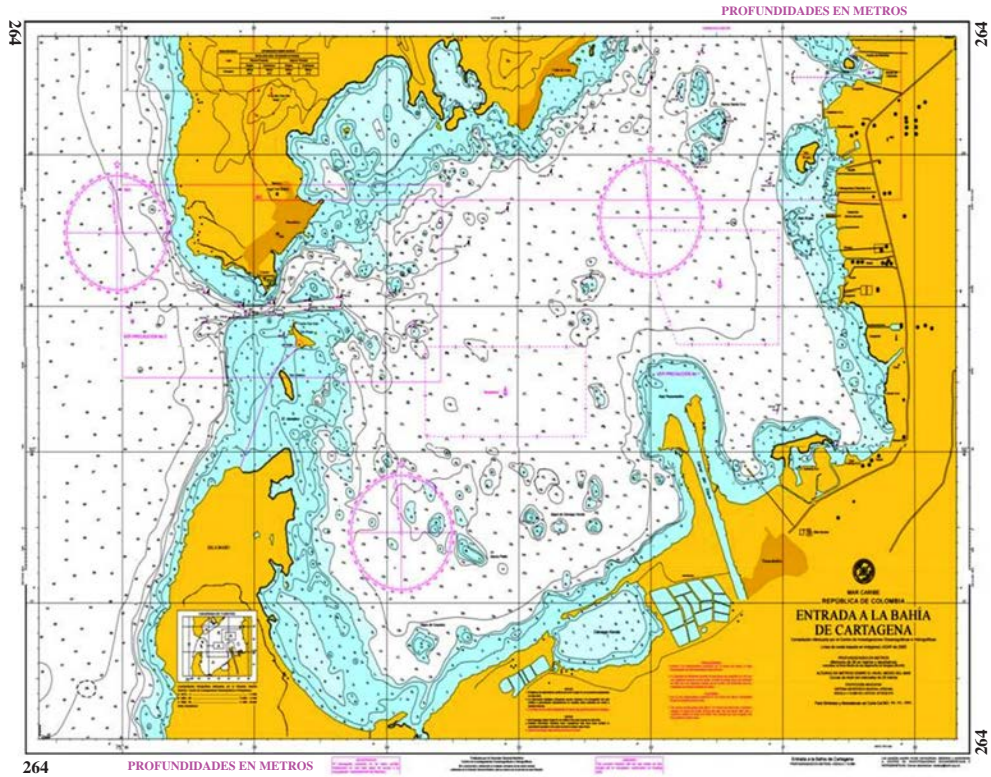


Figura 7. Carta Náutica 264, 3ª edición, de 2011 cuya línea de costa fue utilizada como la más reciente para la comparación. Fuente: DIMAR, CIOH, 2011

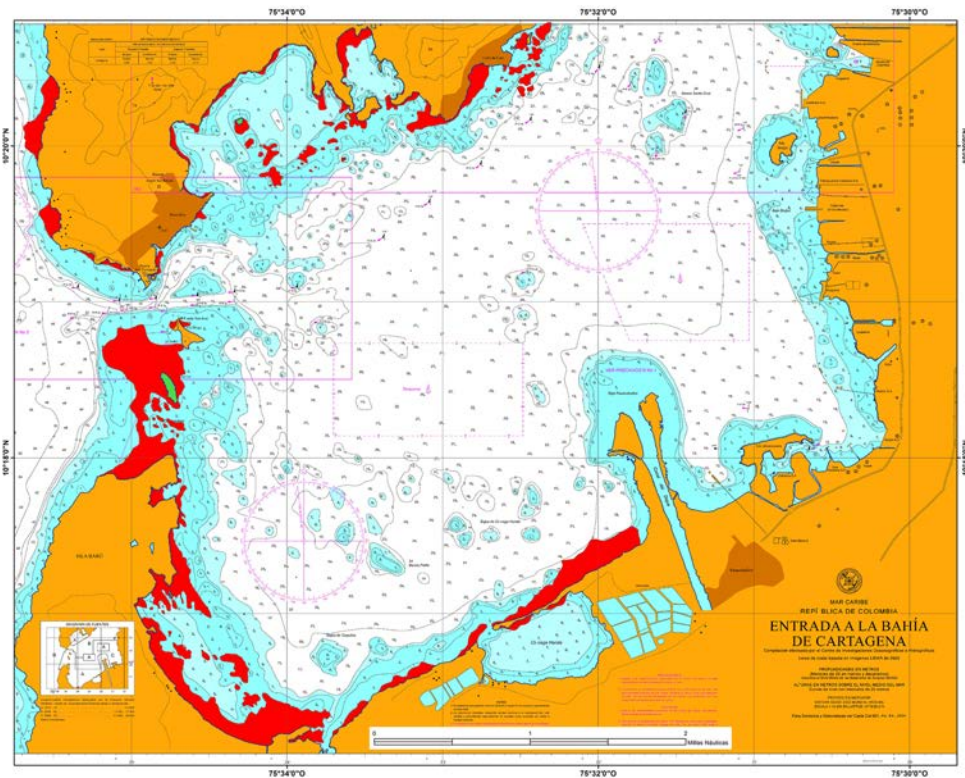


Figura 8. Tomando como referencia la Carta Náutica 264, se señalan los bloques en rojas que corresponden a zonas de área costera emergidas y visualizadas en los mapas antiguos, que no existen hoy.

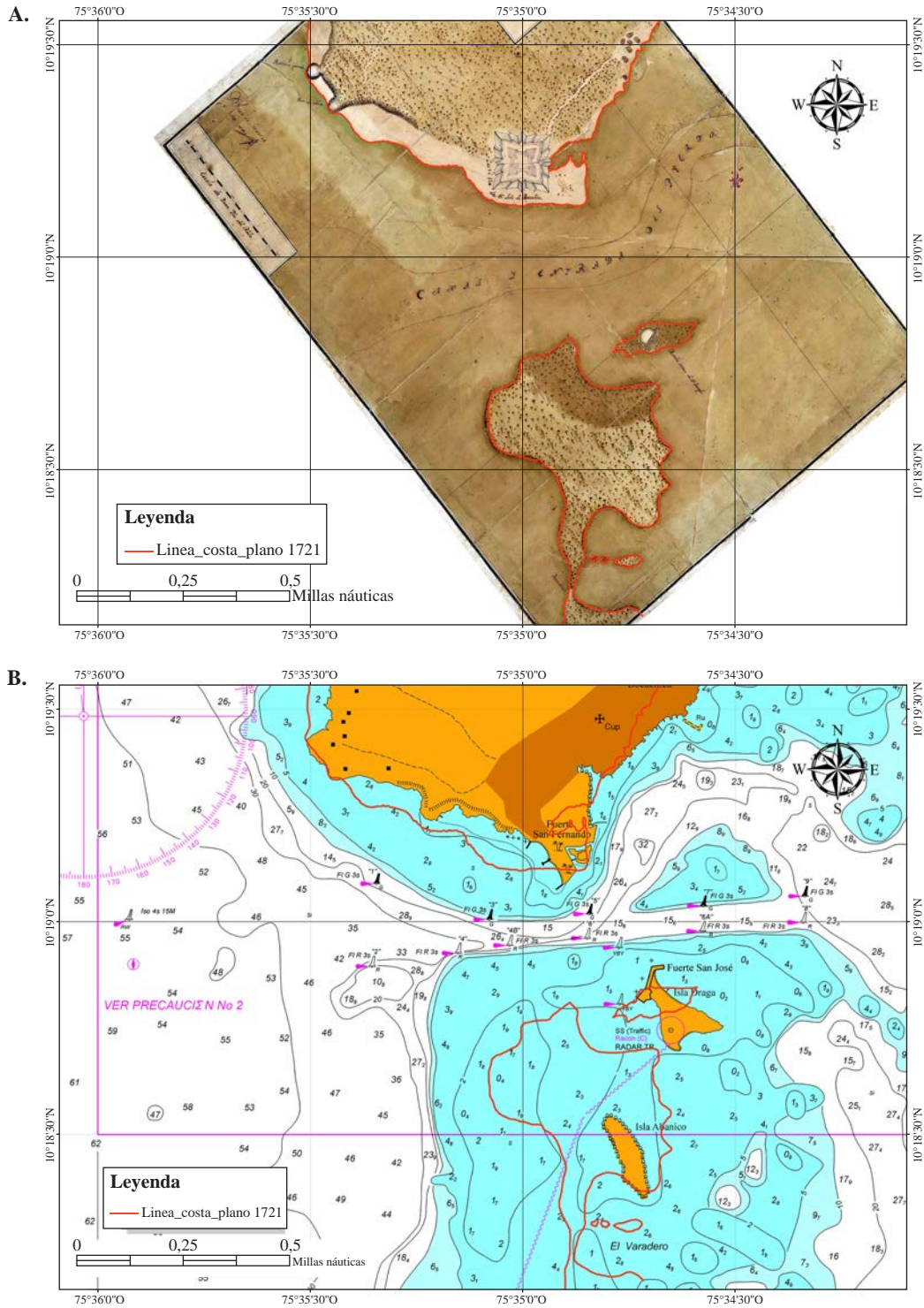


Figura 9. El mapa 9a, (izq), de Herrera y Sotomayor de 1721 muestra Isla Abanico al sur de Bocachica. El mapa 9b (der) señala la línea de costa georreferenciada de 9a superpuesta a la carta batimétrica del CIOH (2011); los espacios entre la línea roja y la costa actual son los terrenos y manglares que existieron en 1735 y que ya han desaparecido bajo el mar.

local diferente al de los procesos costeros exteriores a la Bahía, con dinámicas similares a la erosión costera del frente de playa influenciado por el oleaje normal y los fenómenos extremos.

Información geodésica. En el SONEL se dispone de la solución ULR6 de los datos de la estación CART, solución que corresponde al procesamiento de 749 estaciones del GNSS a nivel global con datos del periodo entre 1995 y 2014,

y recurre a los modelos y correcciones más actualizadas (Gravelle, *et al.*, 2015), es decir, datos más depurados que los de las soluciones anteriores. Esta solución fue empleada por el GIGE-SGC bajo el marco de GeoRED para elaborar la respectiva serie de tiempo con el programa HECTOR ya mencionado. Mediante el procesamiento de 1.841 datos de dicha solución, correspondientes al periodo entre el 3 de marzo de 2000 y el 29 de diciembre de 2013, se obtuvo la tendencia vertical de la velocidad de $-1,78 \pm 0,43$ mm por año (Figura 10), valor intermedio comparado con los resultados obtenidos por Santamaría-Gómez en el 2010 y por Santamaría-Gómez, *et al.* en el 2012. Lamentablemente, se estableció que en esta estación ha habido una gran pérdida de datos en diversos períodos de tiempo; así, el número de datos esperados para el tiempo de observación (marzo 3 de 2000 a diciembre 29 de 2013), era de 5.079, pero solo estaban disponibles 1.841 datos. Por tal motivo, en el procesamiento de la serie de tiempo se empleó la estimación por máxima verosimilitud calculada mediante el método de covarianza total, pues más de 60 % de los datos de la muestra total no estaban disponibles. Se tuvieron en cuenta los parámetros de señal estacional, desfase, factor intercuartil de 3,0, en tanto que la fecha de referencia fue el 29 de junio de 2004;

además, se consideró un salto (*offset*), el cual se marcó en la gráfica de la serie de tiempo, con lo cual se eliminaron ocho datos atípicos. Con propósitos de comparación, solamente se estimó la tendencia para el período entre 2000 y 2008, con el fin de verificar el impacto de la carencia de datos entre el 2008 y el 2013, obteniéndose una tendencia vertical de $-1,88 \pm 0,44$ mm por año, concordante con el valor obtenido para el período entre 2000 y 2013 (Figura 11).

Por otra parte, los 826 datos obtenidos del total de 836 esperados entre el 29 de octubre de 2014 y el 11 de febrero de 2017 (2,3 años) en la estación CIOH fueron procesados por el GIGE del SGC con los programas GIPSY-OASIS II y HECTOR. En este estudio se empleó el método AmmarGrag, ya que el número de datos faltantes no era considerable, y se obtuvo un valor de $0,06 \pm 1,54$ mm por año (Figura 12). Además, se consideró un salto por actualización del programa *firmware* en el receptor geodésico.

HECTOR es un programa especializado para el estudio de series de tiempo del GNSS que permite estimar la línea de tendencia en series de tiempo con correlaciones temporales de ruido. Es un programa dinámico que solo acepta ruido estacionario con propiedades de ruido constantes y permite el uso rápido de operaciones matriciales, con lo cual se obtiene

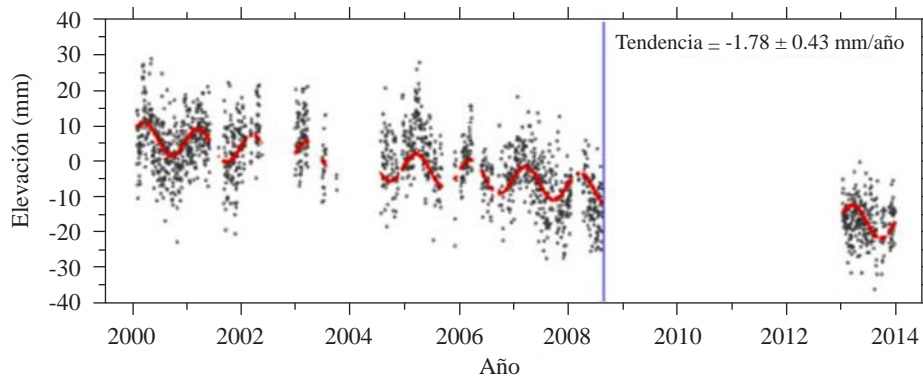


Figura 10. Serie geodésica de tiempo de la estación CART generada a partir de la solución disponible en SONEL empleando el software HECTOR para el período 2000-2013

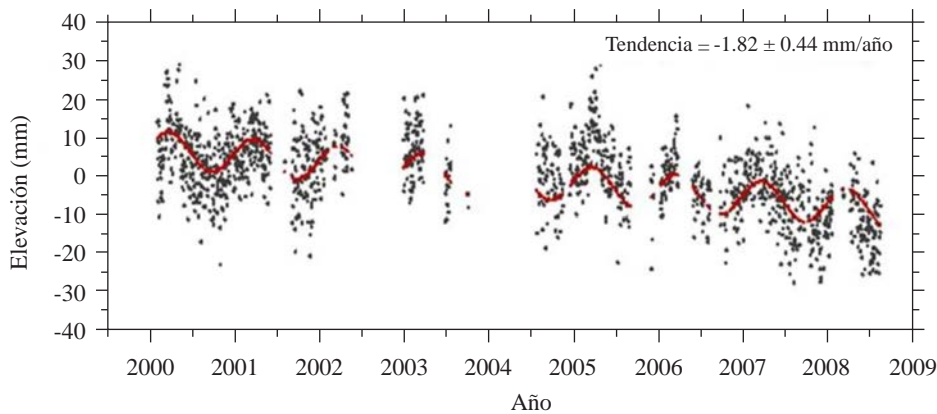


Figura 11. Serie geodésica de tiempo de la estación CART generada a partir de la solución disponible en SONEL empleando el software HECTOR para el período 2000-2008

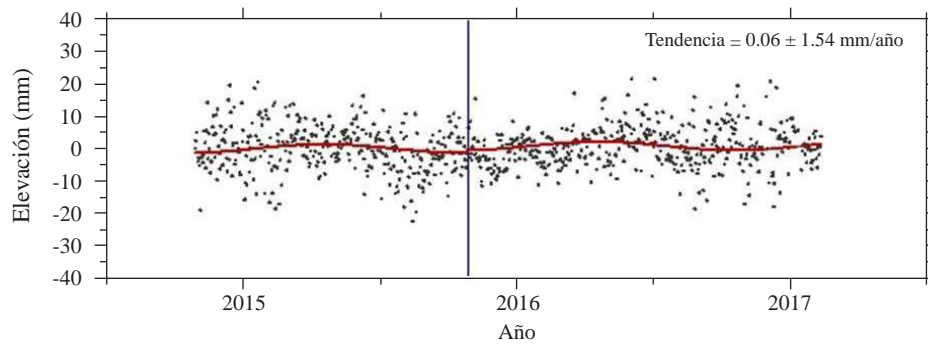


Figura 12. Serie geodésica de tiempo de la estación CIOH generada a partir de los datos disponibles empleando el software HECTOR.

una reducción en el tiempo de procesamiento en comparación con otros programas similares. Para la generación de series de tiempo se aplican los modelos de ruido Power-Law y White Noise y la estimación numérica de máxima verosimilitud mediante los métodos AmmarGrag o Full Covariance para el cálculo, dependiendo del caso. Para valorar la calidad del modelo de ruido elegido se aplican los criterios de información de Akaike (*Akaike Information Criteria*, AIC) y los bayesianos (*Baysian Information Criteria*, BIC). En una serie de tiempo se observa el comportamiento de la estación durante el tiempo de observación y se estima un valor de tendencia, así como la dirección de desplazamiento en cada uno de sus tres componentes. Los datos atípicos se eliminan usando un factor intercuartil, y la tendencia se estima mediante un modelo lineal y parámetros de ruido establecidos a partir de la combinación de los modelos mencionados. Se consideran además otros tipos de eventos, tales como los cambios en los equipos geodésicos, actualización del *firmware*, reorientación de la antena, y fenómenos naturales como los sismos, los cuales pueden tener alguna injerencia en la generación de las series de tiempo, pues afectan las posiciones diarias de las estaciones del GNSS permanentes; asimismo, se estima el valor del salto en caso de que este altere el comportamiento de la serie de tiempo.

Discusión

Los análisis efectuados permitieron establecer una clara tendencia ascensional del nivel medio del mar, con un valor entre 2,8 y 3,6 mm por año desde 1993, calculado a partir de los datos de los mareógrafos. Los datos de altimetría satelital registrados entre 1993 y 2016 confirman este valor, con una estimación del cambio global de 2,9 mm por año; en el caso particular de la región Caribe, los datos del radar altimétrico arrojaron un valor de $2,5 \pm 0,4$ mm por año para el mismo período.

Por otra parte, son varios los autores que han hecho estimaciones a partir de los datos de los mareógrafos, así como comparaciones con las estaciones cercanas, para determinar las variaciones del nivel del mar en la Bahía de Cartagena, lo cual permite concluir que los valores obtenidos en esta zona son dos a tres veces superiores a los obtenidos en otras estaciones.

A partir de los datos de la estación geodésica GPS CART, **Santamaría** (2010) y **Santamaría, et al.** (2012) estimaron valores de subsidencia en el rango de $-1,43 \pm 0,35$ a $-2,19 \pm 0,54$ mm por año, correspondientes a las soluciones ULR4 y ULR5, respectivamente. En este trabajo se hizo el cálculo empleando los datos de la solución ULR6, los cuales arrojaron valores de $-1,78 \pm 0,4$ y $-1,88 \pm 0,44$ mm por año para dos períodos de tiempo diferentes. Aunque localizada sobre el techo de un edificio del CIOH, esta estación ha permitido registrar datos que apuntan a la existencia de subsidencia en un valor cercano a los 2 mm por año. Por su parte, los datos de la estación GPS, conocida como CIOH e instalada por el Servicio Geológico Colombiano, no presentaron una tendencia tan clara como la anotada, pues fue del orden de $0,06 \pm 1,54$ mm por año; se observó que el margen de incertidumbre es alto con respecto al valor obtenido. En este sentido es importante considerar que las series geodésicas de tiempo que emplean datos de posición GPS contienen señales tectónicas y no tectónicas, así como otros errores no modelados que afectan la estimación de las velocidades de las estaciones y sus incertidumbres, por lo cual es necesario eliminar o reducir dichas influencias. Además, en muchos estudios teóricos y usos operacionales las señales estacionales deben separarse de otras señales asociadas a movimientos de periodos largos y seculares (**He, et al.**, 2017). Por lo tanto, la comprensión de los efectos estacionarios es complicada, ya que existe la posibilidad de que diferentes fuentes de ruido se superpongan. En este orden de ideas, el análisis de los efectos estacionarios requiere de tiempos prolongados de observación, con el fin de extraer los parámetros asociados a la deformación de la corteza terrestre. En un estudio de la influencia de las señales anuales en la incertidumbre de las velocidades derivadas del GPS se señala que los sesgos en la velocidad son despreciables después de 4,5 años de observación, y que las velocidades obtenidas a partir de series de tiempo menores a 2,5 años tienen un considerable sesgo de tendencia (**Blewitt & Lavallée**, 2002). Con base en el incremento de las observaciones de las series de tiempo, **Santamaría-Gómez, et al.**, (2011), por su parte, establecieron que los efectos de las señales periódicas en la estimación de las velocidades era pequeña, menor de 0,2 mm por año.

Por consiguiente, se necesita un tiempo de observación más prolongado en la estación CIOH, en especial por su condición de estar empotrada en el terreno.

Sin embargo, si se colocan en contexto las medidas de subsidencia calculadas a partir de los datos geodésicos del GPS y las mediciones que han estimado el ascenso del nivel del mar en por lo menos 2,8 mm por año (IPCC, 2013), se podría considerar su efecto conjunto en la determinación del nivel relativo del mar en la Bahía de Cartagena, el cual es mayor al obtenido en los puertos vecinos, estimados por Torres & Tsimplis (2013) en el orden de $5,3 \pm 0,3$ mm por año en los últimos 44 años. El hecho de que los mayores cambios en la línea de costa se hayan encontrado en el área interior de la Bahía, donde el proceso costero es menos intenso en comparación con la costa externa, obliga a examinar otros factores que puedan explicar estos cambios. Tales factores podrían ser efectos geológicos locales, tales como las emanaciones de gas o el diapirismo de lodo, que podrían estar activos en el área sur de la Bahía de Cartagena.

Por otra parte, se ha sugerido que el mayor incremento del nivel del mar en Cartagena también puede deberse a la compactación de la zona por la intensa urbanización en Castillogrande durante la segunda mitad del siglo pasado (Nicolae, *et al.*, 2008), lo cual exigiría desarrollar trabajos para resolver si los movimientos de la corteza se restringen a Castillogrande o si se extienden a otras zonas.

Es evidente que los terrenos desaparecidos, detectados mediante la comparación cartográfica efectuada, corresponden muy bien a bajos fondos que hoy se encuentran a un metro de profundidad aproximadamente, tanto en los extensos colchones de manglares como en la línea de costa del sur de la Bahía de Cartagena.

La Bahía de Cartagena de Indias se considera una laguna costera de origen tectónico cuya barrera corresponde a la isla de Tierrabomba, la cual separa las aguas de la laguna de las de mar abierto (Gayet & Vernet, 1989). Su conformación, con dos zonas de intercambio de aguas en Bocagrande y Bocachica, se puede atribuir a la tectónica vertical asociada con la común presencia de diapirismo de lodo en la región centro y suroccidental del Caribe colombiano.

Este proceso de deformación se debe a la presencia de materiales de características plásticas con alto contenido de gases en la profundidad, los cuales migran lateralmente debido tanto al contraste de densidad entre ellos y la cobertura superior mucho más densa como a la dinámica tectónica relacionada con la convergencia de las placas Nazca, Suramérica y Caribe (Duque, 1979; Duque-Caro, 1984; Kellogg, *et al.*, 2005; Mantilla, *et al.*, 2009). Se considera que el diapirismo de lodo es responsable de la conformación geomorfológica actual de la zona costera entre Barranquilla y el golfo de Urabá, así como de la presencia de “volcanes de lodo” en la región continental y submarina cercana (Briceño & Vernet, 1992; Carvajal, 2016).

Las geoformas presentes en los alrededores de la Bahía de Cartagena, como las plataformas de arrecifes localmente

basculadas del cerro de La Popa y Turbaco, los dos niveles de terrazas marinas en Tierrabomba y el semi-paleoatolón asociado con el Cerro Albornoz (Carvajal, 2016), son manifestaciones de esta dinámica de levantamientos y subsidencia diferencial que se inició en el Plioceno, hace aproximadamente cuatro millones de años, y aún prevalece en la región (Figura 13). De hecho, el análisis paleontológico del registro fósil del nivel más bajo de terrazas marinas en Tierrabomba permitieron a Martínez, *et al.*, (2010) establecer una tasa de levantamiento del orden de 1,7 mm por año en el sector nororiental de la isla.

Se considera que las zonas bajas asociadas localmente con sinclinales basculados y hundidos en el norte de la isla de Barú y las llanuras costeras intermareales en el costado oriental de la Bahía de Cartagena, se originaron por el mismo proceso de diapirismo de lodo. Igualmente, los bajos de arrecifes y cuerpos coralinos costeros vivos, localmente colonizados de manglar en las riberas de la Bahía de Cartagena de Indias, se asocian al mismo proceso.

Los “volcanes de lodo” son otra de las manifestaciones en superficie del fenómeno de diapirismo de lodo en los alrededores de la Bahía de Cartagena. Estos cerros de 1 km de diámetro y 40 a 100 m de altura, con bocas de diferentes tamaños y formas en la parte superior, se formaron por deformación y por la acumulación de lodos expulsados durante procesos eruptivos. En la región cercana a la Bahía de Cartagena se encuentran los “volcanes de lodo” de Santa Ana Barú, Membrillal, y el Rodeo, este último con registros de erupción a finales del 2013 (Carvajal & Mendoval, 2017; Carvajal & Calderón, 2013).

Estos procesos de expulsión violenta de lodo y gas metano son manifestación del estado de compresión al cual están sometidos los materiales diapíricos en profundidad. Según Carvajal (2017a), los procesos eruptivos se presentan con una recurrencia de 15 a 20 años, lo cual concuerda con las manifestaciones en zonas cercanas al norte de Cartagena.

Con base en el análisis de la información gravimétrica y aero-magnetométrica, Obando (2010), citado en Carvajal (2017b), detectó anomalías atribuibles a la aparición de un cuerpo diapírico en profundidad en la región de Mamonal, en el sector oriental de la Bahía de Cartagena. Recientemente se han registrado emanaciones de lodo y gases (*pockmarks*) en la bahía misma, lo cual es otro indicador de la dinámica del diapirismo en la región y de su influencia en la estabilidad de las líneas de costa.

El origen del complejo de arrecifes de islas del Rosario está asociado con el diapirismo de lodo (Vernet, 1985; Vernet, *et al.*, 1990; Vernet, *et al.*, 1992). Debe señalarse, también, que la presencia de emanaciones de fluidos y gases en zonas marinas constituye una fuente de nutrientes y explica la aparición y proliferación de comunidades bénticas con un desarrollo anormal de sus individuos, lo cual se ha comprobado en varios sitios de la plataforma continental adyacentes a Cartagena (Vernet, *et al.*, 1988). Esta situación se evidencia en los bajos de Salmedina, al

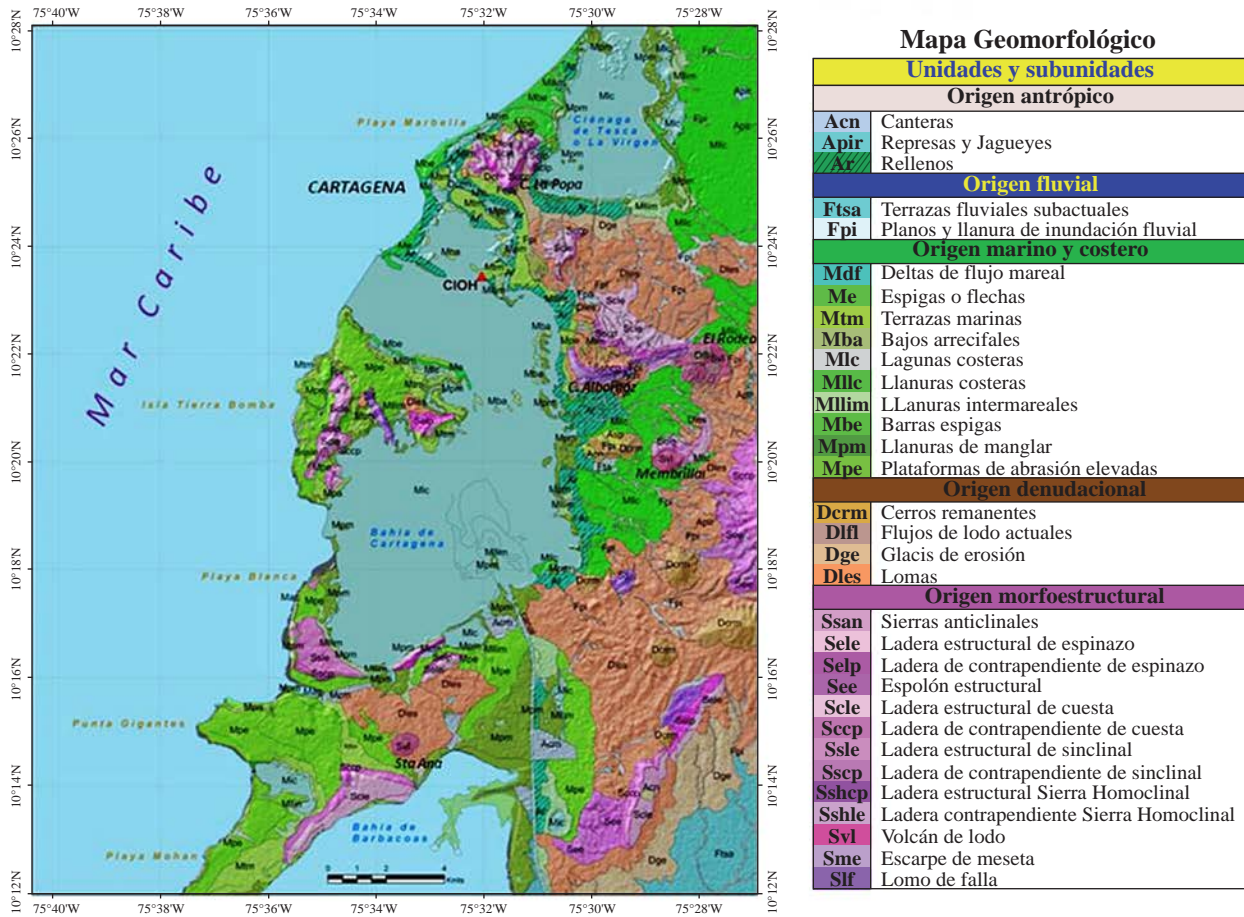


Figura 13. Mapa geomorfológico de los alrededores de la Bahía de Cartagena de Indias. Nótese la pluma de sedimentos provenientes del canal del Dique por el costado SE de la bahía, y la ubicación de la estación GPS del CIOH en la Isla de Manzanillo. Tomado y Modificado de Carvajal, *et al.* (2011) y Carvajal (2017).

occidente de Cartagena, donde se han encontrado por lo menos cinco sitios con emanaciones de fluidos y gases (Ricaurte, *et al.*, 2004).

Llama la atención, asimismo, la presencia de corales vivos en isla Arena, al occidente de Pueblo Nuevo, Bolívar, en donde las comunidades coralinas crecen a pesar de las condiciones adversas de alta sedimentación asociada con los materiales traídos por el río Magdalena. Se han detectado comunidades coralinas al sur de la Bahía de Cartagena que se conservan en muy buenas condiciones a pesar de los altos aportes de sedimento del Canal del Dique, lo cual es atribuible a posibles emanaciones de lodos y gases en el sector y debe ser motivo de futuras investigaciones en la región.

Conclusiones

El análisis comparativo de las líneas de costa antiguas y modernas evidenció que en el sur de la Bahía de Cartagena se han perdido islas completas y grandes sectores de manglar costero. Esta situación expone a la línea de costa y a los terrenos de bajamar de Cartagena a una inundación sistemática, gradual y constante, mucho más acelerada que la media global, la cual

es el resultado de dos fenómenos conocidos: el aumento del nivel del mar debido al calentamiento global y la subsidencia del terreno. De ahí la necesidad de implementar, en el futuro inmediato, un programa que establezca la línea de costa, con proyecciones a largo plazo sobre la cota de inundación (Andrade, *et al.*, 2013), y permita la disipación de la energía del oleaje, para así garantizar la supervivencia de la ciudad (Nicolae, *et al.*, 2008). La continuación del proceso iniciado por el Servicio Geológico Colombiano y la DIMAR, orientado a la conexión geodésica de los mareógrafos para establecer los movimientos de orden vertical que se puedan experimentar en la posición de estos instrumentos, es fundamental.

Igualmente importante es contemplar el diapirosmo de lodo como una de las causas de los procesos de subsidencia local del terreno en la región de Cartagena. En este sentido, es de vital importancia implementar una red de monitorización mediante técnicas geodésicas tanto terrestres como espaciales para poder observar los movimientos asociados con este tipo de fenómeno. Asimismo, debe iniciarse el estudio de la zona mediante técnicas de geodesia de imágenes basadas en interferometría diferencial con radar de apertura sintética.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que el documento es original y no tienen conflicto de intereses de ninguna clase con respecto a su contenido.

Agradecimientos

Al Servicio Hidrográfico Nacional del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, por su ayuda en la georreferenciación de las cartas históricas. A los integrantes del Proyecto GeoRED del Grupo de Investigaciones Geodésicas Espaciales del Servicio Geológico Colombiano, por su apoyo en la instalación, procesamiento y análisis de datos. Al doctor Álvaro Santamaría por la indicación sobre los datos de GPS diferencial del sistema SONEI, y a los revisores de la Revista de la Academia por las críticas constructivas.

Referencias

- Andrade, C.A. & Franco, R.** (2016). Sobre la desaparición de Isla Abanico en Bocachica, Bahía de Cartagena de Indias, Colombia. Paisajes desde proa. Arqueología subacuática de los canales de Manzanillo y Bocachica, Cartagena de Indias. ISBN 978-958-59506-0-3.
- Andrade, C.A., Thomas, Y.F., Nicolae-Lerma A., Durand P., Anselme, B.** (2013). Coastal flooding hazard related to storm surge events in Cartagena de Indias, Colombia. *Journal of Coastal Research*. **29** (5): 1126-1136.
- Andrade, C.A.** (2008). Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: J.D. Restrepo (editor), *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS, pp. 101-121.
- Blas de Lezo** (1741). Diario de lo acaecido en Cartagena de Indias desde el día 13 de marzo de 1741 hasta el 20 de mayo del mismo año, que remite a S.M. D. Blas de Lezo. En: Arrazola, R., *Historial de Cartagena*. Cartagena: Editorial Hernández, 1961, pp. 291-321.
- Blewitt G. & Lavallée D.** (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.* **107** (B7): ETG 9-1–ETG 9-11. doi: 2145, 10.1029/2001jb000570
- Bos, M.S., Fernandes, R.M.S., Williams, S.D.P., Bastos, L.** (2013). Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. *J. Geod.* **87** (4): 351-360. doi: 10.1007/s00190-012-0605-0
- Briceño L. & Vernet G.** (1992). Manifestaciones del diapirismo arcilloso en el margen colombiano del Caribe. *Revista Geofísica Colombiana*. **1**: 21-30.
- Carvajal, J. H.** (2017a). Características del “volcanismo de lodo” del Caribe central colombiano. Informe Servicio Geológico Colombiano, en proceso de publicación. 82 p.
- Carvajal J.H. & Mendiavelso D.** (2017). Catálogo de “Volcanes de lodo”. Caribe Central colombiano. Informe Servicio Geológico Colombiano, en proceso de publicación. Bogotá: INGEOMINAS. 54 p.
- Carvajal, J. H.** (2016). Mud diapirism in the Central Colombian Caribbean Coastal zone. En: Hermelin, M. (editor). *Landscapes and Landforms of Colombia*. Springer International Publishing. pp. 35-53.
- Carvajal J.H. & Calderón Y.** (2013). La actividad eruptiva del volcán de lodo El Rodeo al sureste del casco urbano de Cartagena de Indias. Informe de atención técnica. Servicio Geológico Colombiano. 60 p.
- DIMAR- CIOH** (2011). Carta Náutica 264 - Entrada a la Bahía de Cartagena, 3ª edición.
- De Ulloa, A.** (1735). Plano de la Bahía de Cartagena de 1735. Copia digital. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas.
- Duque-Caro, H.** (1979). Major structural elements and evolution of Northwestern Colombia. En: J. S. Watkins, L. Montadert & P. W. Dickerson (Editores): *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins*. Am. Assoc. Petr. Geol. Mem. Memoir. **29**: 329-351.
- Duque H.** (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú - San Jacinto en el noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS*. **27** (2): 1-29.
- Gayet J. & Vernet G.** (1989). Les lagunes côtières. *Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*. **45**: 107-121.
- Gravelle M., Prouteau E., Wöppelmann G.** (2015). Progress Report on the GNSS at Tide Gauge Activities: SONEI Data Holdings & Tools to access the data. GLOSS-GE Meeting, 21 October – 23 October 2015, Goa, India, 19 p.
- He X., Montillet J.-P., Rui Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W.** (2017). Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. **106**: 12-29. doi: 10.1016/j.jog.2017.01.004
- Herrera y Sotomayor J. & Hoyo y Abarca C.** (1721). Mapa de la Bahía de Cartagena, Biblioteca Nacional de España. Fecha de consulta: febrero de 2017. Disponible en: <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000031631>
- Herrera y Sotomayor, J. y J.A. de Ulloa** (1735) Plano de la Ciudad y Bahya de Cartagena de las Yndias Situado a los 300 Gs. 41 Ms. de Longitud Prymer Merydo. el Pyco de Teneryfe y 10 Grs. 27 Ms. de Latitud Boreal en el Nuevo Reyno de Granada. febrero de 2017. Disponible en: <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000020691>.
- Herring, T., King, R., McClusky, S.** (2010a). *Gamit and Globk Reference Manuals*, Release 10.3, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Herring, T., King, R., McClusky, S.** (2010b). *Introduction to Gamit/Globk Reference Manual Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*. Release 10.3, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO.** (2006). *Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, Volume IV: An update to 2006*. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. 78 p.
- International Panel for Climate Change** (2013). Informe de evaluación del cambio climático. Fecha de consulta: ?. Disponible en: www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
- Kellogg J., Toto E., Cerón J.** (2005). Structure and tectonics of the Sinú – San Jacinto accretionary prism in Northern Colombia. *X Congreso Colombiano de Geología*. pp 1-10.
- Mantilla A. M., Jentzsch G., Kley J., Alfonso-Pava C.** (2009). Configuration of the Caribbean margin: Constraints from 2D seismic reflection data and potential field's interpretation. En: Lallemand, S. y Funicello, F. Editores. *Subduction zones geodynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 247-271.

- Martínez I., Yokoyama Y., Gómez A., Delgado A., Matsuzaki H., Rendón E.** (2010). Late Holocene marine terraces of the Cartagena Region, southern Caribbean: The product of neotectonism or a former high stand in sea level? *J. South American Earth Science*. **29** (2): 214-224. doi: 10.1016/j.jsames.2009.08.010
- Nicolae, A., Thomas, Y.F., Durand, P., Torres, R.R., Andrade, C.A.** (2008). Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia. *Boletín Científico CIOH*. **26**: 71-84.
- Pabón, J. D.** (2003a). El aumento del nivel del mar en las costas y área insular de Colombia. En: *El Mundo marino de Colombia, investigación y desarrollo de territorios olvidados*. Red de Estudios del Mundo Marino – REMAR, Universidad Nacional de Colombia, pp.75-82.
- Pabón, J.D.** (2003b). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*. **XII** (1-2): 111-119.
- Pabón J.D. & Lozano J.A.** (2005). Aspectos relacionados con las estimaciones globales y regionales del ascenso del nivel del mar y su aplicación a Colombia. *Cuadernos de Geografía*. **14**: 97-106.
- Rangel E.S. & Montealegre J.E.** (2003). Análisis de las series del nivel del mar en el Pacífico colombiano y su relación con el cambio climático. *Meteorología Colombiana*. **7**: 53-66.
- Ricaurte C., Domínguez J. G., Mayo G., Andrade C., Ospina H. M. y Gutiérrez A.** (2004). Nota sobre algunos rasgos geomorfológicos de los bancos de Salmedina. *Boletín CIOH*. **22**: 64-76.
- Santamaría-Gómez A., Gravelle M., Collilieux X., Guichard M., Martín-Míguez B., Tiphaneau P., Wöppelmann G.** (2012). Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. *Global and Planetary Change*: **98-99**: 6-17.
- Santamaría-Gómez A., Bouin M. N., Collilieux X., Wöppelmann G.** (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *J. Geophys. Res.* **116** (B1). doi:10.1029/2010JB007701
- Santamaría-Gómez A.** (2010). Estimation des mouvements verticaux de l'écorce terrestre par GPS dans un repère géocentrique, dans le Cadre du Projet TIGA, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, École Doctorale d'Astronomie et d'Astrophysique d'Île-de-France, 211 pp.
- Torres, R. R., & Tsimplis M. N.** (2014). Sea level extremes in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*. **119**: 4714-4731. doi: 10.1002/2014JC009929
- Torres, R. R. & Tsimplis M. N.** (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*. **118**: 2934-2947. doi:10.1002/jgrc.20229
- Torres, R., Gómez, J., Afanador, F.** (2006). Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*. **24**: 64-72.
- Vernette, G.** (1985). La plate-forme continentale caraïbe de la Colombie (du débouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation. Thèse Doct. Etat, Bordeaux, 834, 387 p.
- Vernette G., Blanc G., Briceño, L., Carvajal, H., Faugeres, C., Gayet, J., Gonthier, E., Griboulard, R., Molina, A.** (1988). Manifestaciones tectónicas en márgenes activas. Comparación entre dos sectores del Caribe – Margen colombiana y Prisma de Barbados. *Memorias VI Seminario de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Pp. 240-252.
- Vernette, G.** (1989). Examples of diapiric control on shelf topography and sedimentation patterns on the Colombian Caribbean continental shelf. *Journal of South American Earth Science*. **2** (4): 391-400.
- Vernette G., Gayet J., Bobier C., Briceño L., Mauffret A., Molina A.** (1990). El frente de deformación sur-Caribe en la región de Cartagena. Posición y relación con la plataforma. *Memorias del VII Seminario de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Comisión Colombiana de Oceanografía. pp 195-209.
- Vernette G., Mauffret A., Bobier C., Briceño L., Gayet J.** (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*. **202** (2): 335-349. Doi: 10.1016/0040-1951(92)90118-P
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H.** (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*. **102** (B3): 5005-5017. doi: 10.1029/96JB03860

Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia

Carlos Andrés Bonilla-Ovallos*, Oscar José Mesa

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia

Resumen

La predicción de los posibles cambios en la precipitación como resultado del cambio climático global, la deforestación y otras perturbaciones antrópicas, es un problema práctico y científico de gran complejidad y enormes consecuencias. La estrategia tradicional ha sido recurrir a modelos climáticos globales acoplados de océano y atmósfera. Sin embargo, aunque tales modelos han significado avances importantes en la representación del clima pasado y presente, no están exentos de dificultades, especialmente en lo concerniente a la estimación de la precipitación en un país montañoso y tropical como Colombia. Para avanzar en el conocimiento de la confiabilidad de tales predicciones se evaluó la precipitación histórica en algunos modelos del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) mediante la comparación sistemática de dicha precipitación con la precipitación observada tomada de los registros de la base de datos del modelo hidrológico nacional propuesto por **Hurtado** (2009). Se evaluaron diferentes medidas de error, entre ellas, las del error medio absoluto, la raíz del error medio cuadrático, el índice de concordancia, el error sistemático (*bias*), y los coeficientes de correlación y de determinación. Los resultados de la evaluación estacional y regional cuestionan la credibilidad de las predicciones de la precipitación de los modelos de circulación general (MCG) para Colombia, lo cual llama a la reflexión sobre su uso y resalta la importancia de profundizar en la investigación sobre el tema, en aras de contribuir a la adopción de las decisiones pertinentes. Por último, debe hacerse énfasis en la necesidad de un programa nacional de investigación para responder a la acuciante pregunta del impacto del cambio climático sobre la precipitación en Colombia. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Modelos globales de circulación; Precipitación histórica en Colombia; CMIP5; Métrica de error en modelos.

Validation of the precipitation estimated by CMIP5 climate models in Colombia

Abstract

The prediction of possible changes in precipitation in the coming years and decades due to global climate change associated with the greenhouse effect, deforestation and other anthropic perturbations is a highly complex practical and scientific problem of huge consequences. The traditional strategy has focused on the use of coupled atmosphere-ocean general circulation models, and while such models have demonstrated important improvements for representing past and present climate, they are not without limitations. In particular, the estimation of precipitation in a tropical and mountainous country like Colombia has proved to be very difficult. In order to check the credibility of such predictions, we evaluated the historical precipitation in some of the models of the fifth phase of the Coupled Models Intercomparison Project (CMIP5) through a systematic comparison with observed precipitation as registered in the database of the national hydrologic model proposed by **Hurtado** (2009), mostly based on rain gauge observations. We evaluated different error measures: the mean absolute error, the mean squared error, the concordance index, the systematic error (*bias*), the correlation coefficient and the coefficient of determination. The results of the seasonal and regional assessments question the credibility of precipitation prediction through general circulation models (GCM), and give an insight on the use of derived data for relevant decision-making, which emphasizes the need for a national research program to answer to the important question of the impact of climate change on Colombian precipitation patterns. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: General circulation models; Historical precipitation in Colombia; CMIP5; Model-observations comparison.

*Correspondencia:

Carlos Andrés Bonilla Ovallos, cabonillao@unal.edu.co; **Recibido:** 31 de octubre de 2016; **Aceptado:** 24 de febrero de 2017

Introducción

El cambio climático global y sus implicaciones sobre variables locales como la precipitación, la temperatura y el nivel del mar, se han consolidado como un asunto de especial importancia dentro de la comunidad científica. En torno a ello, se busca proveer la predicción necesaria para la toma de decisiones y la gobernanza de asuntos cruciales para la sociedad como la agricultura, el abastecimiento de agua potable, la gestión, la prevención del riesgo de desastres y la generación de energía hidroeléctrica. Además se requiere, en la medida de lo posible, minimizar la incertidumbre de dichas predicciones (IDEAM & Rodríguez, 2012; Hurtado & Mesa, 2015; Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016).

Los efectos del cambio climático pueden estudiarse mediante la aplicación de técnicas estadísticas a partir de los valores observados, o mediante la implementación de modelos globales del clima (GCM por sus siglas en inglés) que representan los procesos físicos fundamentales de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra, e intentan - sujetos a limitaciones para la representación de fenómenos de pequeña escala - simular numéricamente las dinámicas del sistema climático (IDEAM & Rodríguez, 2010; Hurtado & Mesa, 2015; Petisco, 2008). Entre los fenómenos no incorporados mediante parametrizaciones se encuentran la convección y los efectos orográficos a escala pequeña e intermedia (Mesa, 2007, pág. 113ss), que debe decirse, resultan de suma importancia para la precipitación en Colombia. Hay un sesgo histórico muy grande en la comunidad climática que ha llevado a inflar el papel de los modelos. Sin desconocer su utilidad e importancia, los modelos tienen problemas de comprobación, complicación, escala y determinismo.

Al respecto conviene citar el Quinto Reporte del IPCC en el Capítulo sobre evaluación de los modelos (Falto, et al., 2013, págs. 743 y 765), en el cual reconocen que la capacidad de los modelos climáticos para simular la temperatura superficial ha mejorado en muchos, pero no en todos los aspectos, que la simulación de los patrones de precipitación de gran escala ha mejorado, aunque los modelos continúan con resultados menos buenos para la precipitación que para la temperatura, y que a escala regional la precipitación no se simula bien, en particular debido a las dificultades de observación.

Como consecuencia, es fundamental evaluar los resultados de tales modelos contra las observaciones antes de proceder a usarlos directamente.

En Colombia, ambas opciones han sido utilizadas en diversos estudios y los resultados de los mismos son detallados rigurosamente por Hurtado y Mesa (2015).

En resumen, se presenta consistencia entre los diferentes estudios realizados mediante técnicas estadísticas (Cantor & Ochoa, 2011; Carmona & Poveda, 2014; IDEAM, Mayorga, Hurtado, & Benavides, 2011; Mesa, Poveda, & Carvajal, 1997) y entre estos y los resultados derivados de modelos de baja resolución revisados por Pabón (2005),

citados por Hurtado y Mesa (2015, p. 9). Tendencias crecientes (71%) de la precipitación anual acumulada para el noroccidente del país, Vichada y el piedemonte del Putumayo; y decrecientes (22%) para el suroccidente del país, sectores del medio Magdalena, Boyacá y sectores de Guainía (IDEAM, et al., 2011), son hasta cierto punto consistentes con las tendencias crecientes que para el Pacífico norte y central, el medio Magdalena, la sabana de Bogotá, las cuencas de los ríos Sogamoso, Catatumbo, Arauca, el piedemonte llanero, la Orinoquía central, la Amazonia central y el piedemonte Amazónico reportaron (IDEAM, et al., 2011; Pabón, 2005). Además, son consistentes con las visualizaciones del periodo histórico que a partir de los modelos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) pueden visualizarse en la página: <http://www.climtewizard.org/> y fueron revisadas por Hurtado y Mesa (2015).

Sin embargo, los resultados derivados de modelos de alta resolución como el PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies del Reino Unido) y el GSM-MRI (Global Spectra Model del Japón), presentan diferencias con los resultados anteriormente mencionados (Hurtado & Mesa, 2015). A saber, (IDEAM & Rodríguez, 2010; IDEAM & Ruiz, 2010; Pabón, 2005), señalan que para proyecciones de escenarios de emisión pesimistas como el A2: “las reducciones más significativas de lluvia a lo largo del siglo XXI, se presentarían en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda, donde llovería entre el 70% y 80% de las precipitaciones registradas durante el periodo 1971-2000”, contrario a lo que señalan Hurtado y Mesa (2015) sobre las predicciones realizadas en <http://www.climatewizard.org/>:

“Como se ve para toda Colombia, excepto la zona más al norte, hay aumento del orden del 10%. Si se examinan los modelos individualmente o incluso las predicciones más bajas (20%) la tendencia general se mantiene, aunque las magnitudes de los cambios disminuyen en general para la mayor parte de Colombia donde la tendencia sigue siendo positiva y la zona norte de decrecimiento aumenta en extensión y en magnitud.”

Sumado a lo anterior, en el último estudio sobre el caso, condensado en la 3a comunicación nacional de cambio climático, (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLETA, 2015) mediante una metodología que consiste en promediar los resultados del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), encontraron resultados más acordes a los encontrados con el uso de modelos de baja escala y las técnicas estadísticas antes mencionadas, por ende, diferentes a los encontrados con modelos de alta resolución.

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) ha tenido a lo largo del tiempo diferentes fases que han sido iniciativa del Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP) y cuyo objetivo ha sido avanzar en la comprensión del clima pasado, presente y futuro mediante

la implementación de MCGs; pero los MCGs no son siempre exactos, y lo prueban algunos estudios publicados que revelan que los modelos usados por el IPCC no describen el clima con una precisión similar y que no se desempeñan exitosamente para todas las regiones del globo (**IDEAM & Rodríguez, 2010**), por ende su uso, directo, o su uso en ejercicios de afinado de escala estadísticos o dinámicos - alternativa para subsanar las limitaciones se mencionó tienen para representar procesos en determinadas escalas - debe ser de especial atención.

A excepción de los ejercicios de validación de los experimentos del WCRP-MIP realizados por **Rodríguez e IDEAM (2010, 2012)**, no se tienen estudios detallados sobre estas bases de datos.

La validación de los resultados sobre precipitación y temperatura de los modelos del CMIP5 realizada por **Rodríguez e IDEAM (2012)** consistió en la comparación de esta base de datos y los datos de los proyectos CMAP y ERA40, mediante métricas como el BIAS, RMSE, la correlación, las distribuciones espaciales y la representación del ciclo anual, para seleccionar un conjunto de modelos cuyo mejor comportamiento o desempeño los hiciera modelos potencialmente útiles para reducciones de escala.

Rodríguez & IDEAM (2012), encontraron que la mayoría de los modelos tienden a simular las altas precipitaciones del Pacífico colombiano, pero no en la Amazonía, y que algunos modelos sobrestiman en gran proporción la lluvia hacia la parte norte del país. Que el error en la simulación de la precipitación decrece para el trimestre JJA y que en general los modelos representan bien el ciclo anual de la precipitación para las regiones naturales de Colombia, exceptuando los modelos HadGEM-CC y HadGEM-ES. También que los mayores errores y las menores correlaciones tienen lugar en la Amazonía, mientras para el Caribe se presenta la situación inversa. También destacan el comportamiento de los modelos CNR-CM5, FGOALS-g2, MPI-ESM-LR, GFDLCM3, HadCM3, CanCM4 (para el nivel anual y estacional), y los modelos GFDL-ESM2M, GFDLCM2G, MPI-ESM-LR, HadCM3 y CNR-CM5 para la representación del ciclo anual.

Este trabajo tiene como objetivo la validación de la precipitación en el período histórico de algunos modelos del CMIP5 con el fin de incrementar los conocimientos y las percepciones que sobre esta base de datos se tiene, para orientar la toma de decisiones en asuntos que requieren gobernanza frente al cambio climático, lo que debe hacerse con la cautela que la incertidumbre de los mismos precise. Para ello, se propone una validación espacial y estacional, cuya metodología, resultados y conclusiones se presentan en las posteriores secciones del mismo.

Materiales y Métodos

Base de datos MHN. La base de datos MHN, creada por (**Hurtado, 2009; Hurtado & Mesa, 2014**), es una base de datos de precipitación de libre acceso que integra de manera

óptima la información de los pluviómetros distribuidos sobre el territorio colombiano, con información de mediciones satelitales e información derivada de estudios globales de reconstrucciones disponibles en diferentes periodos de tiempo y variadas resoluciones espaciales, que además, y dada la función determinante de la topografía para el territorio colombiano, contó con la implementación de una variante del modelo PRIMs que considera la existencia de un óptimo pluviográfico (**Hurtado, 2009**), rasgo característico del gradiente altitudinal que se asocia a los ramales de la cordillera de los Andes (**Mesa, Poveda y Carvajal, 1997; Poveda, 2004**).

Está compuesta por 384 mapas de distribución espacial de la precipitación mensual para el periodo 1975-2006 a una resolución espacial de 5° de Arco, con límites definidos entre los 5°S-15°N y los 80°W-65°W.

Las fuentes de datos usadas para su construcción fueron: 2270 estaciones pluviométricas, la mayoría de ellas de la red del IDEAM; las bases de datos Global Precipitation Climatology Project GPCP-V2, la National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Center for Atmospheric Research (NCAR), la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y la Geostationary Satellite System (GOES); y un modelo digital de terreno (MDT) con una resolución de 30 segundos de arco para el estudio de la topografía (**Hurtado, 2009, Hurtado & Mesa, 2014**).

WCRP CMIP5. El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados es un proyecto que produce un conjunto de datos de múltiples modelos y para múltiples variables en procura de avanzar en el conocimiento de la variabilidad del clima y el cambio climático. Su objetivo es el planteamiento de escenarios y la corrida de modelos para así obtener una gama de climas que se usan en estudios del clima y de efectos del cambio climático e influyen en la agenda política (**Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012**). A saber, fueron insumos importantes para la elaboración del AR5 de la variabilidad climática y el cambio climático que realizó el IPCC en 2008.

En general los modelos están conformados por una componente oceánica y una atmosférica (AOGCMs), un modelo de tierra (EMICs) de complejidad intermedia y en algunos casos componentes biogeoquímicos (ESMs) que consideran los importantes flujos de carbono entre el océano, la atmósfera y los reservorios terrestres (**Taylor, et al., 2012**).

Los experimentos del CMIP5 comprenden diferentes tipos de corridas dentro de los cuales se tiene las corridas siglo XXI, que consisten en corridas sometidas a forzamientos por emisiones y concentraciones específicas (rutas representativas de control RCPs) y corridas siglo XX que cubren el periodo histórico comprendido entre (1850-2005), forzadas por los cambios en las composiciones atmosféricas observados (**Taylor, et al., 2012**).

Para la validación, como se mencionó anteriormente, se tomaron las salidas de precipitación del experimento histórico de algunos modelos del CMIP5 (Tabla 1) disponibles en http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html.

Tabla 1. Modelos objeto de validación, centro de modelación encargado y resolución espacial característica.

Modelo	Centro o grupo de modelación encargado	Resolución espacial [°] (lon * lat)
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo Per I Cambiamenti Climatici.	1,88*1,88
FGOALS-G2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academic of Sciences and CESS, Tsinghua University.	2,81*2,81
HadCM3	Met Office Hadley Center.	3,75*2,47
HadGEM2-AO	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
INMCM4	Institute of Numerical Mathematics.	2,00*1,50
IPSL-CM5A-LR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	3,75*1,88
IPSL-CM5B-LR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	3,75*1,88
IPSL-CM5A-MR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	2,25*1,26
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic.	1,41*1,41
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81*2,81
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81*2,81
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88
MPI-ESM-P	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88

(Koutroulis, Grillakis, Tsanis, & Papadimitriou, 2015)

La longitud de las series tomadas, así como la espacialidad fue condicionada por las características ya mencionadas de la base de datos MHN.

Metodología

Dadas las diferentes resoluciones espaciales de los modelos objeto de validación, inicialmente se ajustó la resolución de la base de datos de MHN a la resolución particular de cada modelo, para lo cual se promediaron tantos pixeles de la primera como la resolución de los segundos lo demandasen. El periodo de tiempo de validación fue 1975-2005.

Una vez igualadas las resoluciones se procedió con el análisis píxel-píxel comprendido dos fases. La primera fase consistió en la estimación de los mapas de ciclos anuales para identificar cuales modelos representaban la distribución media mensual de la precipitación sobre el territorio colombiano y cuáles no, estimándose a su vez el número de pixeles para el que había sobrestimación o subestimación. La segunda fase por su parte consistió en la estimación del coeficiente de correlación de Pearson y medidas del error como el error medio absoluto (MAE), la raíz del error medio cuadrático (RMSE), el error sistemático, sesgo o BIAS, el índice de concordancia (d_r) (Willmott, Robeson & Matsuura, 2012), el coeficiente de determinación(r^2). Las

correlaciones se estimaron para las series sin estandarizar, para las series estandarizadas, para las series trimestrales y para las series de los ciclos anuales de cada píxel. En la tabla 2 se presentan las ecuaciones de dichas medidas del error.

La comparación de los resultados de un modelo particular P_i , con las observaciones O_i se apoya en las características centrales de los errores del modelo $P_i - O_i$. Es el caso del error medio absoluto, MAE y de la raíz del error medio cuadrático, $RMSE$. Para evitar la cancelación de los errores por exceso y defecto la primera usa el valor absoluto y la segunda el cuadrado. La diferencia entre ambas es que los errores más grandes pesan más en la segunda. En ambos casos un modelo es mejor mientras menor sea el indicador, con valor óptimo 0.

Para tener una idea del sesgo en la predicción, el indicador BN considera el promedio de los valores conservando el signo y no puede mirarse aislado de los dos anteriores por causa de la mencionada cancelación. Un valor de cero indica ausencia de sesgo en promedio, no necesariamente ausencia de error. El coeficiente de correlación r , mide el grado de asociación lineal entre la serie observada y simulada por el modelo, está acotada entre -1 y 1, ambos valores indican relación lineal perfecta y 0 indica ausencia de relación lineal. Para comparar valores observados y simulados se esperan

Tabla 2. Medidas del error usadas para la comparación. P_i es el valor simulado en el mes i , el valor observado es O_i , y $MAD = \frac{1}{n} \sum |O - \bar{O}|$ es la desviación absoluta media de las observaciones.

Medida del error	Ecuación	Valor óptimo
Error medio absoluto (mm)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	0
Raíz del error medio cuadrático (mm)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0
Índice de concordancia (adimensional)	$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{MAE}{2MAD}, & MAE \leq 2MAD \\ \frac{2MAD}{MAE} - 1, & MAE > 2MAD \end{cases}$	1
Error sistemático, sesgo o BIAS (mm)	$BN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$	0
Coefficiente de correlación de Pearson (adimensional)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$	1
Coefficiente de determinación (adimensional)	r^2	1

valores positivos y lo más cercanos a 1 posible. Sin embargo, un buen coeficiente de correlación no significa un buen modelo, porque este indicador no revela la escala ni la tendencia central de cada serie. En otras palabras, este indicador requiere que se mire a los anteriores que sí consideran esas características de las series. De manera semejante, el coeficiente de determinación, r^2 mide la fracción de la varianza de las observaciones explicada por el modelo.

El índice de concordancia d_r , mide la suma de la magnitud de las diferencias entre las observaciones y las predicciones del modelo (MAE) en comparación con la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones (MAD), ambas con la media observada (Willmott, Robeson & Matsuura, 2012). Nótese que las desviaciones de un modelo perfecto respecto a la media observada son iguales a las desviaciones de las observaciones (MAD), esto explica el 2 en el denominador. La motivación de comparar MAE con $2MAD$ viene de interpretar $MAE = \sum |P_i - O_i| = \sum |(P_i - \bar{O}) - (O_i - \bar{O})|$. El valor de este indicador para un modelo perfecto es 1. Un valor de 0,5 significa que la suma de las magnitudes de los errores es la mitad de la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones. Un valor de 0 indica que la suma de la magnitud de los errores es equivalente a la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones. Los valores negativos del indicador significan que la suma de la magnitud de los errores es mayor que el doble de MAD .

Para los modelos que mejor se desempeñaron de acuerdo con los anteriores criterios y medidas del error, se realizó un análisis estacional-regional que consistió en la estimación de medias trimestrales para cada una de las regiones naturales de Colombia (Caribe, Andina, Orinoquía, Amazonía y Pacífica). Se estimó también el error relativo entre las estimaciones de los modelos y la media trimestral obtenida mediante un filtro por polígonos realizado a la base de datos MHN.

Resultados

La fase 1 del análisis píxel a píxel permitió identificar los modelos con menor error en la distribución espacial de la precipitación mensual del periodo 1975-2005. Si bien ningún modelo representa rigurosamente dicha distribución para todos los meses, pues la mayoría presentan problemas en la representación de los meses de Junio, Julio y Agosto, debe mencionarse que el modelo CMCC-CMS es el modelo que mejor lo hace. Otros modelos como el INMCM4, el MIROC5, MIROC-4h y los modelos MPI-ESMLR, MPI-ESM-P y MPI-ESM-MR, la representan medianamente bien y, el modelo HadCM3 representa pobremente la distribución. Los modelos restantes no la representan bien y algunos no exhiben ninguna variabilidad espacial de la precipitación, como es el caso de los modelos IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5B-LR e IPSL-CM5A-MR. Los modelos MIROC5 y MIROC-4h sobrestiman la precipitación sobre la zona centro de la región Andina. Todos los modelos representan mal la lluvia en el Pacífico.

En la fase 2 se encontró que en general las correlaciones exhiben un patrón regional bien definido, pues para la mayoría de los modelos se encontraron correlaciones significativas mayores a 0,5 para los pixeles ubicados en los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Arauca y para partes de Vichada, partes de Antioquía (en especial en el golfo de Urabá) y partes de los Santanderes. Las correlaciones más bajas se ubicaron en el suroccidente del país, en la Amazonía, en el Pacífico y en el sur de la Región Andina. Los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, INMCM4, MIROC5, MIROC-4h, MPI-ESM-LR, MPIESM-P y MPI-ESM-MR, presentaron para las zonas mencionadas, correlaciones cercanas a 0.8 y en algunos casos mayores. La figura 1 muestra la distribución de las correlaciones mayores a 0,5 para los seis mejores modelos. Teniendo en cuenta que los modelos HadGEM2-(AO, ES y CC) y los modelos MPI-ESM-(LR, MR y P) presentan comportamientos muy similares, se escogió uno que representase cada uno de estos grupos. La figura 2

muestra ejemplos de la representación del ciclo anual para algunos pixeles ubicados en las zonas mejor correlacionadas. Los demás modelos no presentaron correlaciones altas y en el caso de MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, IPSLCM5A-LR, IPSL-CM5B-LR, IPSL-CM5A-MR presentaron correlaciones muy bajas. Como era de esperarse debido a la suavización, las correlaciones entre las series observadas y simuladas a escala trimestral y entre los ciclos anuales aumentaron para las zonas mencionadas, así como también el área de las regiones con buena correlación. Las correlaciones de las series estandarizadas, en ningún píxel y para ningún modelo sobrepasaron el rango -0.25 a 0.25, lo que muestra la dificultad de predecir la precipitación sobre una región tropical montañosa como Colombia.

En cuanto a las medidas del error debe decirse que se encontró un MAE mayor a 50 mm por mes para la mayoría del país, ubicándose dentro del intervalo 50-100 mm por mes para las zonas que se mencionó presentaban mejores correlaciones. Cómo era de esperarse y dado que los modelos

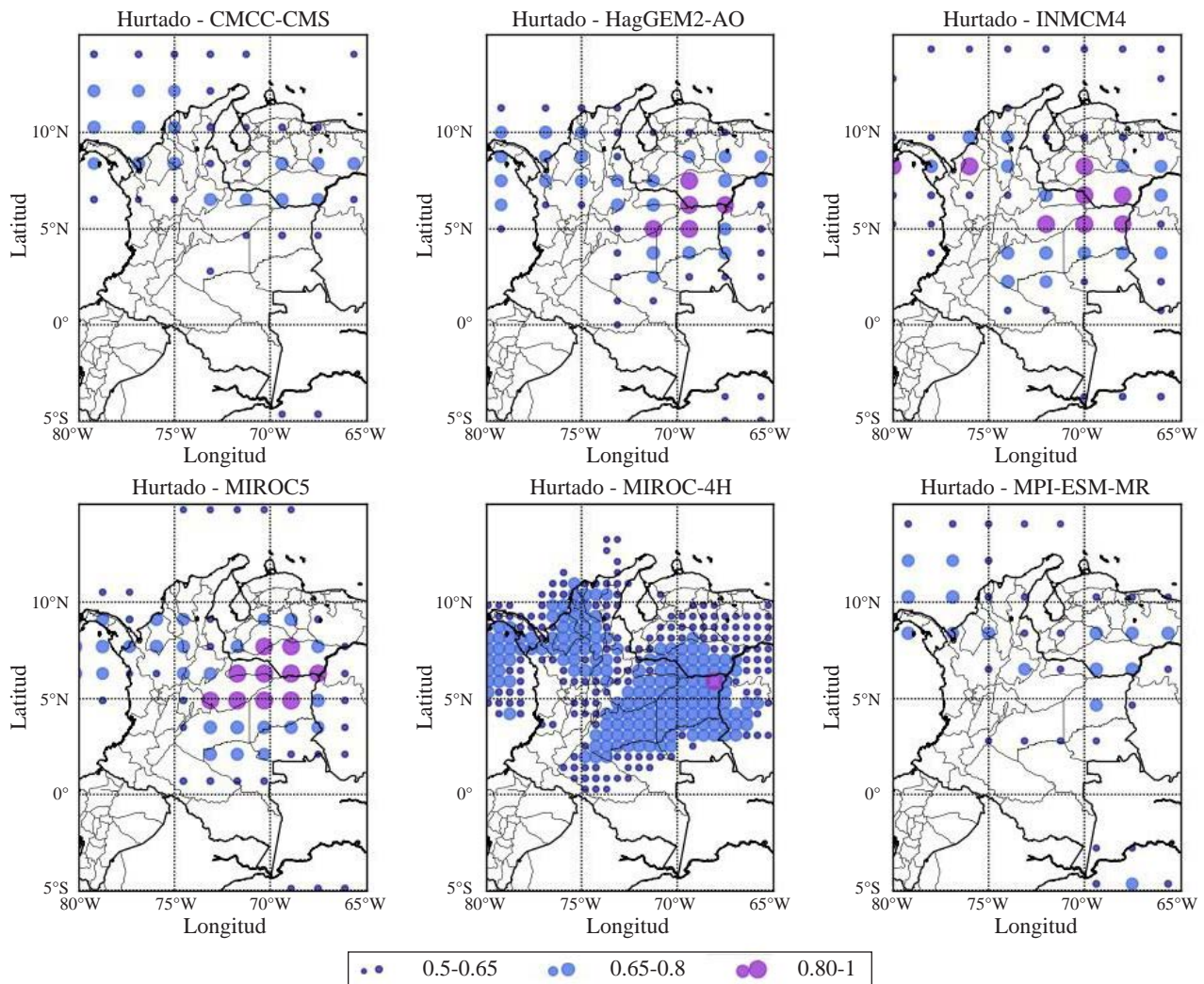


Figura 1. Correlaciones significativas mayores que 0,5 entre MHN y los modelos mejor correlacionados.

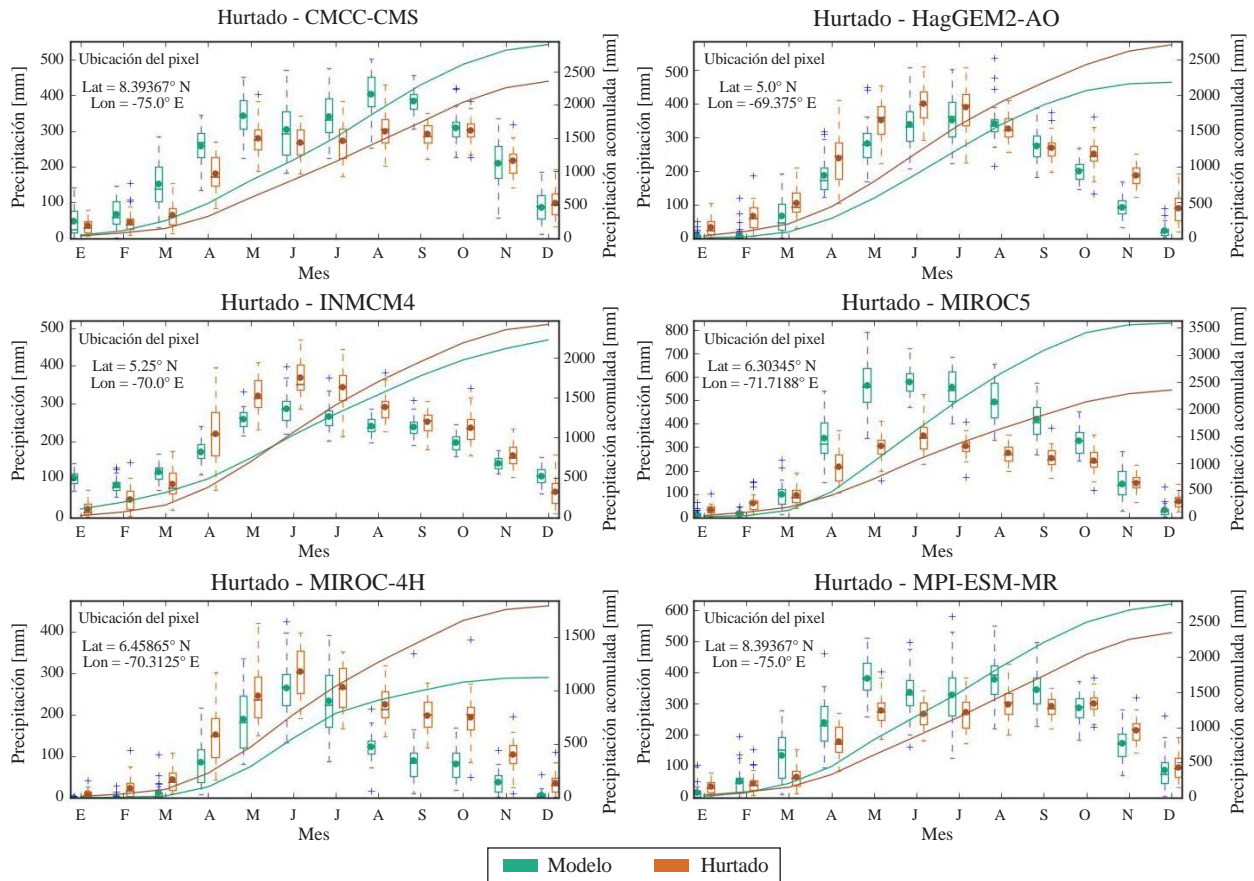


Figura 2. Ejemplo de ciclos anuales de pixeles ubicados en las regiones mejor correlacionadas para los mejores modelos. Curva de masa asociada.

no representaban bien la lluvia sobre el Pacífico, los mayores valores del *MAE* se encontraron en esa región del país. El comportamiento del *RMSE* tuvo un comportamiento similar al anterior, encontrándose valores que oscilaban entre 25-50 mm por mes para las zonas mejor correlacionadas. Los modelos con mejor desempeño fueron los mismos. Los modelos FGOALS-G2, IPSLCM5A(B)-LR e IPSL-CM5-LR, presentaron valores del *MAE* y *RMSE* mayores a 100 mm por mes para todo el país.

Los valores del índice de concordancia (d_c) en general fueron menores a 0,5 para gran parte del país y para casi todos los modelos, pero valores en el intervalo 0,6-0,75 se presentaron en la zona noroccidental y la zona de los llanos orientales para los mejores modelos mejor correlacionados, es decir, errores bajos. Los modelos FGOALS-G2, HadCM3, IPSL-CM5A(B)-LR e IPSL-CM5-LR, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-P y MPI-ESM-MR, presentaron valores generalizados menores al 0,5 para este índice, es decir todavía más malos. En general se presentaron valores negativos del d_c , en el Pacífico y para el caso de los modelos MIROC5 y MIROC-4h, en la región Andina, lo que refleja errores mayores al doble de la desviación absoluta. Los valores del error BIAS oscilaron entre -50 y 50 mm para

la mayoría del territorio nacional en los modelos mejor de mejor desempeño, presentándose subestimación para la mayoría del territorio y sobrestimación para la zona Andina y parte del Caribe. Las subestimaciones más altas se presentaron en la llanura Pacífica. Las figuras 3-6 presentan la distribución de estas medidas del error para los modelos mejor correlacionados.

Con el análisis regional-estacional se identificaron los modelos y los trimestres que representan mejor la precipitación en determinada región natural. Para el caso de la Región Pacífica no se tiene un buen desempeño de los modelos, pues a excepción de los modelos MIROC5 y MIROC-4h y para los trimestres SON y JJA respectivamente, no se tienen errores relativos pequeños. Para la Región Orinoquía se identificaron porcentajes de error relativamente bajos para las estimaciones de los modelos CMCC-CSM, HadGEM2-AO, INMCM4 y MIROC5 para los trimestres de MAM, JJA y SON. En el caso de la Región Caribe, la media trimestral mejor representada es la de MAM por los modelos CMCC-CSM, HadGEM2-AO, MIROC5 y MIROC-4h aunque el trimestre SON es bien estimado por CMCC-CSM, HadGEM2-AO y MIROC5. Para la Región Andina solo se tienen estimaciones aceptables por parte

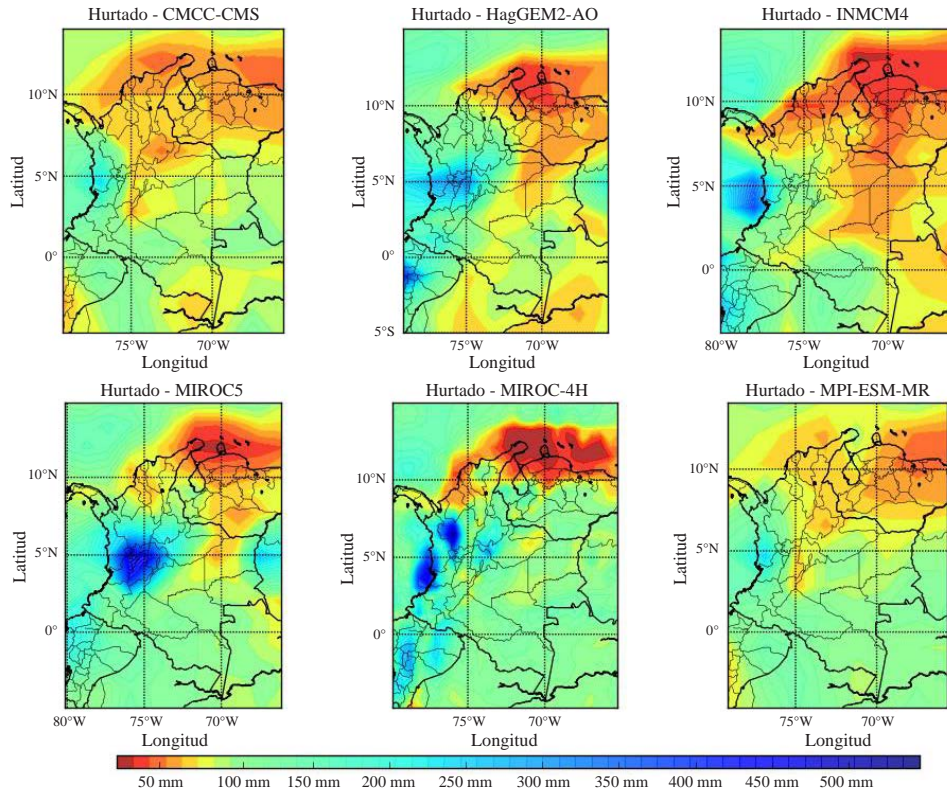


Figura 3. MAE para los mejores modelos.

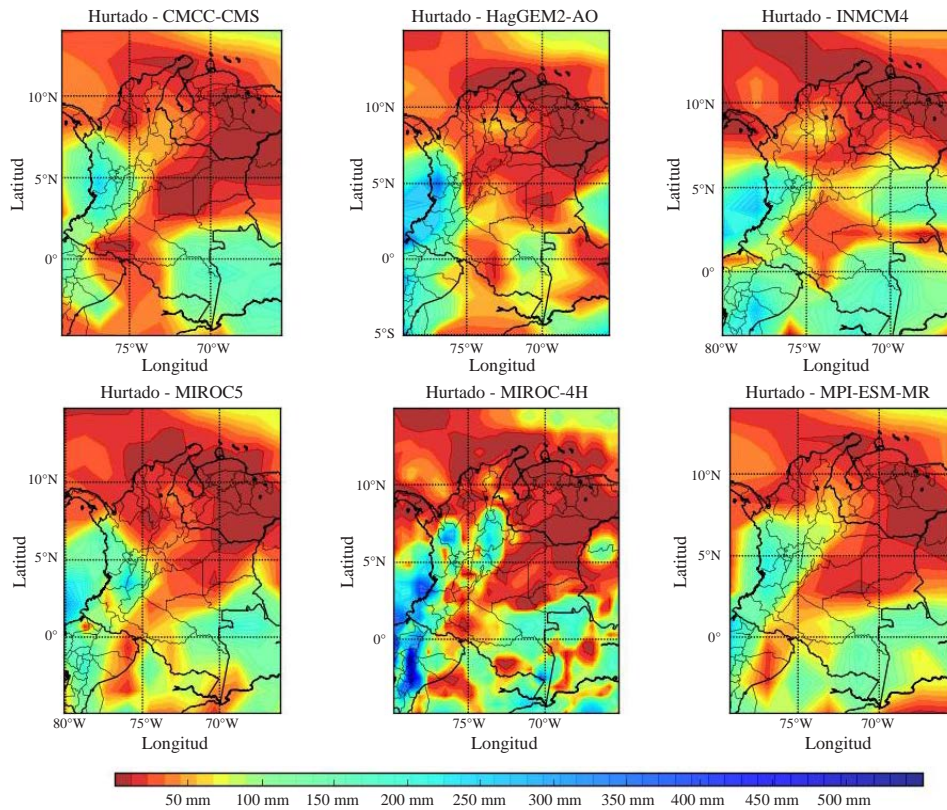


Figura 4. RMSE para los mejores modelos.

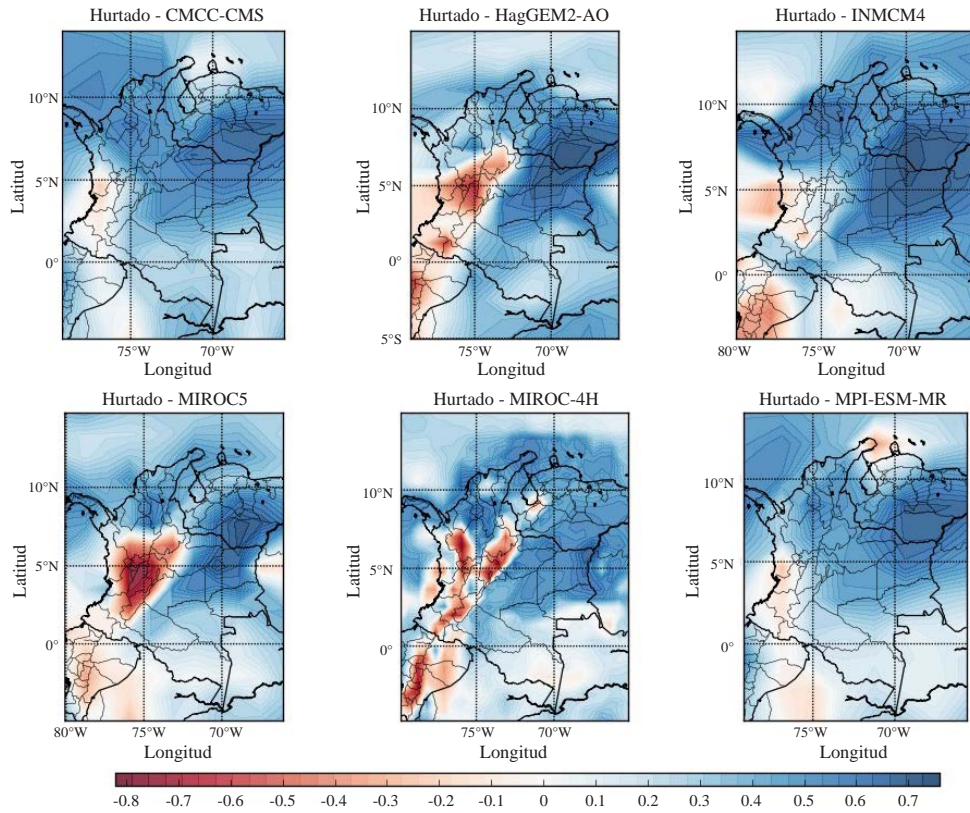


Figura 5. d_r para los mejores modelos.

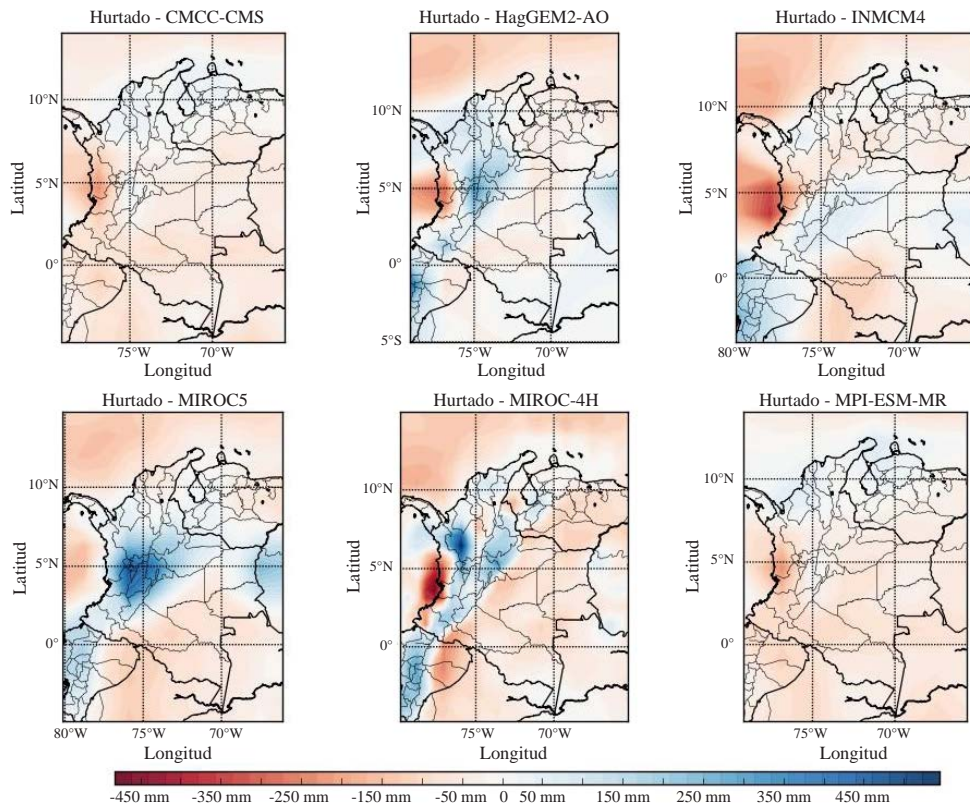


Figura 6. Error BIAS para los mejores modelos.

del modelo CMCC-CMS para los trimestres MAM, JJA y SON. Y para la Región Amazónica el modelo HadGEM2-AO presenta buenas estimaciones para los cuatro trimestres. La figura 7 presenta las medias trimestrales regionales y el total anual estimado por los mejores modelos y la base de datos MHN.

Se considera que el hecho de que las correlaciones significativas más altas se hayan presentado en la zona noroccidental del país y en las zonas de la Orinoquía, permite pensar que los modelos tienen fuertes deficiencias en la representación de la topografía y quizá de los procesos convectivos, determinantes de la precipitación del país.

Aunque hay consistencia entre los errores medios absolutos, las raíces del error medio cuadrático, los valores del BIAS y del índice d_r , y se puedan considerar aceptables para las regiones que presentaron buenas correlaciones, no puede decirse en rigor que los modelos tengan un buen desempeño o realicen una buena representación de la precipitación sobre el territorio nacional durante el período histórico. Y el hecho de que sumado a eso ningún modelo sea suficientemente bueno en cuanto a la representación de las medias trimestrales para todas las Regiones naturales, es una señal clara de la incertidumbre.

Aunque algunos de los resultados reseñados sobre el estudio de **IDEAM & Rodríguez (2012)** se comparten en este estudio, como por ejemplo que los errores más bajos se tengan en la zona Caribe y que allí mismo tengan lugar las correlaciones más altas, no es fácil hacer comparaciones entre ambos estudios pues las bases de datos usadas para la validación son diferentes, aunque provienen de las mismas observaciones.

Podría decirse que algunos modelos representan bien el ciclo anual de la precipitación en algunos pixeles de la región Caribe y Orinoquía en cuanto a las inflexiones entre temporadas secas y húmedas, pero la figura 2 claramente muestra que la media anual acumulada representada por las curvas de masa no es similar en algunos casos.

Llegados a este punto es importante resaltar que es mejor el estudio de las tendencias observadas en la información primaria que el uso de modelos globales que simulan la precipitación en un territorio tan complejo como el colombiano (**Mesa & Hurtado, 2015**). Lo anterior seguirá siendo válido hasta que se disminuya la incertidumbre en los MGCs. Aparte, también deben evaluarse para Colombia las corridas de otros experimentos del CMIP5, tales como la AMIP, HistoricaNat, HistoricalGHG e HistoricalMisc,

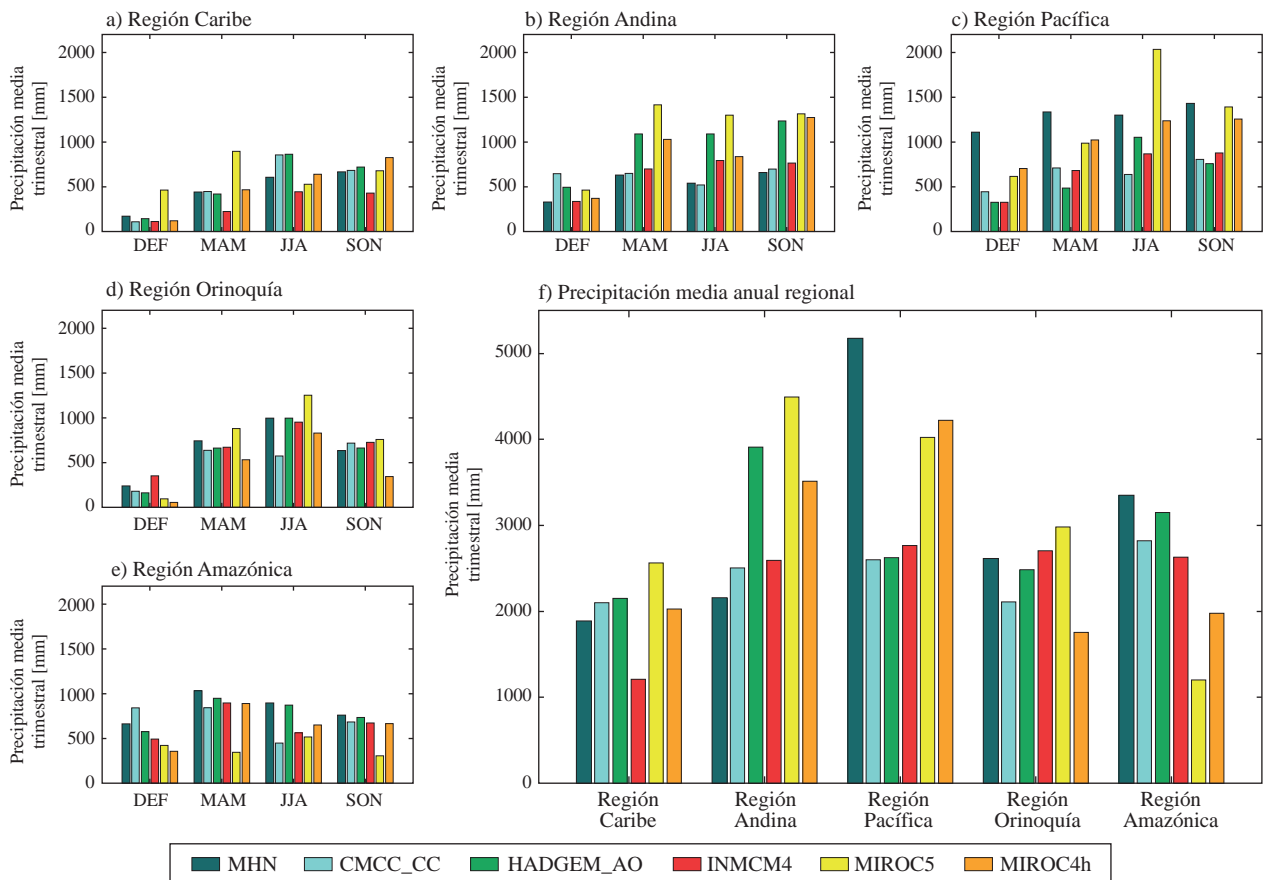


Figura 7. Precipitación media trimestral (a,b,c,d,e) y precipitación media anual (f) de cada región natural en Colombia según la base de datos MHN y según los modelos del CMIP5 que mejor se desempeñaron.

puesto que incluyen otros forzamientos, como la temperatura del mar, que eventualmente pueden producir mejores correlaciones, dado el conocido efecto del fenómeno ENSO sobre la hidrología de Colombia.

Conclusiones

Ninguno de los modelos del CMIP5 evaluados representa adecuadamente el ciclo anual de precipitación en el territorio colombiano. El modelo que más cercano está de hacerlo es el modelo CMCC-CMS.

Los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, INMCM4, MIROC5, MIROC-4h, MPI-ESM-LR, MPIESM-P y MPI-ESM-MR presentan correlaciones significativas entre las observaciones y las simulaciones, con valores mayores a 0,6 para la zona norte de la Orinoquía y para la zona Caribe excluyendo su parte más norte, y correlaciones cercanas a 0,8 para los ciclos anuales pixel-pixel. En consecuencia, se representan aceptablemente los ciclos anuales en dichos píxeles. Sin embargo, las correlaciones para las series estandarizadas, en ningún píxel y para ningún modelo sobrepasaron el rango -0,25 a 0,25, lo que muestra la dificultad de predecir la precipitación sobre una región tropical montañosa como Colombia.

Las medidas del error usadas presentan los resultados más favorables para las regiones que presentan también las mejores correlaciones, aunque no son buenas en general. El índice de concordancia por ejemplo es inferior a 0,5 y negativo en algunas regiones.

No existe una representación generalizada de las medias trimestrales para las regiones naturales para ningún modelo. La región Orinoquía es a la que corresponden las mejores estimaciones para los trimestres MAM, JJA y SON por los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, INMCM4 y MIROC5.

El uso de estos modelos para la toma de decisiones no es recomendable y es necesario persistir en un esfuerzo de mayor envergadura para acercarnos a respuestas útiles a la pregunta trascendental sobre cuál será el impacto del cambio climático sobre la precipitación de Colombia.

Se sugiere la conformación de un panel nacional de expertos que enfrente con toda su dimensión la pregunta y produzca informes de consenso que sirvan de apoyo para que los responsables de las decisiones cuenten con la mejor información posible. Están en juego asuntos de mucha trascendencia, con importantes implicaciones no solo económicas, sociales y ambientales sino también científicas. La participación debe ser amplia, los criterios deben ser los de la ciencia: comprobación con observaciones y rigor conceptual. La magnitud y trascendencia del asunto merece la creación de un programa nacional de investigación, construido a partir de las fortalezas existentes y abiertas a la cooperación internacional.

Conflicto de intereses

Los autores del presente artículo manifestamos que no existe conflicto de intereses a nivel personal, comercial, académico, político o financiero.

Referencias

- Cantor, D., & Ochoa, A.** (2011). Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1573.0326>
- Carmona, A. M., & Poveda, G.** (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, **123** (2): 301-313. article. <http://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3>
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen.** (2013). Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hurtado, A.** (2009). *Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Hurtado, A. F., & Mesa, O. J.** (2015). Cambio climático y variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*, **12** (24): 131-150
- Hurtado, A. F. & Mesa, O. J.** (2014) Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *Dyna*, **81** (186): 251-258.
- IDEAM, Mayorga, R., Hurtado, G., & Benavides, H.** (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. *Ideam-Meteo*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Clim%C3%A1tico+en+Colombia+con+base+en+informaci%C3%B3n+estad%C3%ADstica.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLETERÍA.** (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá.
- IDEAM, & Rodríguez, A.** (2010). Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. *Ideam-Meteo*.
- IDEAM, & Rodríguez, A.** (2012). Evaluación de las simulaciones de precipitación y temperatura de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 con el clima presente en Colombia. *Ideam-Meteo*, 34. Retrieved from <http://fs03eja1.cornmagdalena.com.co/nuevaweb/Niveles/Definiciones.pdf>
- IDEAM, & Ruíz, J. F.** (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (PANORAMA 2011-2100). *Ideam-Meteo*.
- Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., & Papadimitriou, L.** (2015). Evaluation of precipitation and temperature simulation performance of the CMIP3 and CMIP5 historical experiments. *Climate Dynamics*, 1-18. <http://doi.org/10.1007/s00382-015-2938-x>

- Legates, D. R., & McCabe, G. J.** (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro-climatic model validation. *Water resources research*, **35** (1): 233-241.
- Mesa, O.J.** (2007). *¿Adónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 328 p.
- Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L.** (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pabón, J. D.** (2005). Escenarios de Cambio climático para territorio colombiano. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional.
- Petisco, E.** (2008). *Método de regionalización de precipitación basado en análogos*.
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, (28).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A.** (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **93** (4), 485-498. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O.** (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014. Lima.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K.** (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*. **32** (13): 2088-2094. <http://doi.org/10.1002/joc.2419>

Composición física y química de los suelos fluviovolcánicos de Armero Tolima, Colombia

Alfredo José Torres-Benítez^{1,2,*}, Héctor Eduardo Esquivel², Fernando Tinoco²

¹Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia

²Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

Los cambios en la calidad de los suelos son determinados por su composición física y química y se relacionan directamente con el desarrollo, el crecimiento y los cambios en la dinámica de los procesos de sucesión vegetal. El objetivo de este estudio fue evaluar la composición física y química del suelo y su relación con la vegetación proveniente de procesos de sucesión ocurridos sobre los lodos fluviovolcánicos del municipio de Armero, Tolima, Colombia. Se establecieron 10 parcelas de 10 x 20 metros y en cada unidad de muestreo se dio apertura a tres calicatas para la obtención de una muestra compuesta. En cada muestra de suelo se determinaron los parámetros físicos y químicos y se estableció la relación entre las variables edáficas mediante un análisis multivariado de componentes principales. Las variables físicas, las densidades real y aparente, el porcentaje de porosidad y de humedad y las variables químicas: pH, fósforo (P), manganeso (Mn), cinc (Zn), calcio (Ca), la saturación de bases: magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), la relación de magnesio y potasio (relación Mg/K), la relación de calcio más magnesio con potasio ((Ca+Mg)/K), y la saturación y concentración de aluminio (Al), presentaron alta variabilidad y valores sustentables para el desarrollo de la vegetación en la zona de Armero debido a los procesos ecológicos de sucesión. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Sucesión; Físicoquímica; Parcelas; Parámetros físicos y químicos.

Physical and chemical composition of fluviovolcanic soils in Armero, Tolima, Colombia

Abstract

Changes in soil quality are determined by their physical and chemical composition and are directly related to the development, growth and changes in the dynamics of plant succession processes. The objective of this study was to evaluate the physical and chemical composition of the soil and its relationship with vegetation from successional processes developed on fluviovolcanic sludge in the municipality of Armero, Tolima, Colombia. Ten plots of 10x20 m were established and three trial pits were opened in each unit to obtain a composite sample. We determined physical and chemical parameters in each soil sample and we established the relationship between the edaphic variables through a multivariate analysis of principal components. Physical variables, actual and apparent density, porosity and humidity percentages and chemical variables: pH, P, Mn, Zn, Ca, base saturation: Mg, Fe, Cu, Mg/K ratio, (Ca+ Mg)/K ratio, and Al saturation and concentration presented high variability and sustainable values for the development of vegetation in Armero as a result of sequential ecological processes. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Succession; Physical chemistry; Plots; Physical and chemical parameters.

Introducción

El suelo es un cuerpo natural, puede considerarse vivo, y está sujeto a la acción de los factores formadores (clima, organismos, material parental, tiempo y relieve); por lo que nace, crece, se reproduce y muere; en escalas temporales mayores a la humana; además, es también un recurso no renovable (Loaiza, 2011). Los procesos geodinámicos vulcanológicos son mecanismos naturales que renuevan la estructura de los suelos, su aporte de nutrientes es significativo y permiten, de ésta forma, a los grupos de especies vegetales; desarrollarse y adaptarse a condiciones edáficas

específicas. Sin embargo, varios estudios (Cantillo, Lozada, Pinzón, 2009; Torres, *et al.*, 2012) nos muestran como la composición y las características físicas y químicas de los suelos diseñan un patrón vegetal que predominará sobre otras especies, observándose cómo la sustentabilidad de un cultivo o un bosque de especies forestales, es inherente al estado de fertilidad del suelo que suministra los requerimientos

*Correspondencia:

Alfredo José Torres-Benítez, alfredo.torres@unibague.edu.co

Recibido: 22 de diciembre de 2016

Aceptado: 14 de marzo de 2017

nutricionales de la planta. El conocimiento de los procesos de sucesión y edáficos en áreas afectadas por erupciones volcánicas en Colombia no se ha desarrollado suficientemente; por lo que, consideramos necesario fortalecer la investigación de éstos procesos de la dinámica ecológica.

Con el fin de caracterizar los sedimentos depositados por la avalancha en las tierras de Armero, **Frye** (1986) reportó en la caracterización física que el espesor del material varía entre 0,6 y 1,3 m., la textura de los lodos es franco arenosa gravillosa con un contenido moderado de limo (19,6 %) y bajo de arcillas (12,5 %), lo que le confería una baja capacidad de absorción de agua y de nutrientes. En el análisis químico, reportó un pH de 3,9, una presencia importante de sales solubles con predominancia de sulfatos de Ca y Mg, una reducida capacidad de intercambio catiónico y con respecto a características de fertilidad, reporta una buena capacidad de suministro de nutrientes, con excepción del N y el P.

Cháves, Guevara (1987) realizaron la mapeación de los lodos con base en las fotografías aéreas tomadas y ampliadas por el IGAC. en 1985 y 1986, lo cual permitió delimitar los lodos en unidades cartográficas a nivel de consociación, procediendo luego a la selección de los sitios para la descripción, muestreo y clasificación de los perfiles que fueron confirmados mediante análisis de laboratorio.

Malagón (1989) caracterizó a los lodos de Armero de la siguiente forma: Con respecto a sus características físicas reportó un color pardo grisáceo oscuro los primeros 30 cm.; una textura conformada por arena 70,6 %, limo 19,2 % y arcilla 10,2 %; fertilidad baja debida a la alta acidez, bajo contenido de material orgánico y de N, valores bajos de cambio y salinidad ligera. En cuanto a las propiedades químicas, reportó un pH de 4,4 a 4,5 y una capacidad de intercambio catiónico baja de 9,1 m.e. 100 g⁻¹.

En el primer estudio florístico de los lodos fluviovolcánicos, en la zona de Armero, **Esquivel, Leguizamón** (1989) citaron la descripción de las consociaciones y tierras de Ripio según el IGAC. En él se muestra la composición química del suelo y las principales especies desarrolladas en cada una de ellas. Las series de los lodos designados en éste estudio y que sirvieron como base para establecer las diferencias florísticas entre cada una de las consociaciones fueron: Serie Armero, Serie San Lorenzo, Serie El Puente, Serie La Playa, Serie Lavapatás, Serie Santuario, Serie La Estación, Serie Cofa y tierras de Ripio.

Castillo, Salinas (1992) en un estudio del análisis de los lodos de Armero y su vegetación en tres partes alrededor del río Lagunilla, reportaron en la parte alta una vegetación muy baja que se correlaciona con las características que presentaba el suelo: C.I.C. bajo, porcentaje de acidez alto y una alta concentración de Fe. En la parte media reportaron deficiencia de K consecuencia de la lixiviación y una alta concentración de Fe que causaba un suelo ligeramente ácido. En la parte baja reportaron un equilibrio entre elementos mayores como N, P y K, favoreciendo el desarrollo de cultivos.

En el segundo estudio de la sucesión vegetal de los lodos fluviovolcánicos de Armero, **Esquivel, Ramírez** (1994) reportaron la relación íntima entre el proceso de sucesión vegetal y los cambios de las características del suelo, como un incremento en la textura por la arcilla en las consociaciones con sucesión más avanzada, aumento del pH o disminución de la acidez con el incremento de la vegetación, disminución de la salinidad, disminución de Al, Zn, Fe, Cu y Mn, incremento de materia orgánica por el aumento de la vegetación, aumento del K a medida que avanzó el proceso sucesional, incremento amplio de P en las asociaciones constituidas por especies de gramíneas, tendencia a disminuir la presencia de S, pero se mantuvo alto en el sector dominado por *Cyperus ligularis* (*Mariscus ligularis*), y tendencia a la disminución de Mg. Esto es evidencia de que la composición física y química del suelo interviene en la continuidad del proceso sucesional.

En el tercer estudio del estado de sucesión vegetal de los lodos de Armero, **Esquivel, Frye, Ramírez** (1999), reportaron niveles de pH entre 3,6 a 6,3 favorables para el desarrollo de la vegetación, tendencia a niveles normales de salinidad, excepto en sectores dominados por *Cyperus ligularis* (*Mariscus ligularis*), incremento de Al y tendencia a la variación en la concentración de S activo entre 25 ppm a 625 ppm. Los objetivos del presente estudio fueron evaluar la composición física y química de los suelos en la zona de Armero (Tolima-Colombia), analizar su variación en el tiempo y su relación con la vegetación proveniente de procesos de sucesión vegetal.

Materiales y métodos

La zona de estudio se encuentra en el área de influencia de los lodos fluviovolcánicos en la margen izquierda del río Lagunilla en el municipio de Armero-Guayabal (Tolima-Colombia), inicialmente abarca una extensión de 3500 hectáreas que inician en el Piedemonte de la Cordillera Central a 400 metros de altura, extendiéndose 16 km hasta la orilla del río Magdalena a 280 m de altura y de sur a norte abarca 6 km desde el río Lagunilla hasta el río Sabandija (4° 58' N y 74° 54' O). En la actualidad, la zona de estudio está notablemente reducida, debido a que en la mayor parte del área afectada se cultiva arroz (*Oriza sativa*), sorgo (*Sorghum bicolor*) y algodón (*Gossypium herbaceum*). La zona tiene una temperatura promedio de 27,8 °C, una precipitación promedio anual entre 1100 y 1960 mm, la humedad relativa fluctúa entre 55% y el 83 % y los valores de evaporación llegan a 1712.8 anual (**Esquivel, et al.**, 1999). La región corresponde a la formación de bosque seco tropical según la clasificación de Holdridge (1979).

Caracterización de las parcelas de muestreo: las unidades de muestreo correspondieron a 10 parcelas de 10x20 metros, establecidas en los estudios realizados por **Esquivel, Leguizamón** (1989), **Esquivel, Ramírez** (1994) y **Esquivel, et al.**, (1999) para la caracterización de la vegetación sucesional y el análisis edafológico de los lodos (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación de las parcelas establecidas en los lodos fluvio-volcánicos de Armero (Tolima-Colombia)

Parcelas	Coordenadas		Altura (msnm)
	Norte	Oeste	
1	4°57'49,5"	74°55'25,7"	409
2	4°57'54,5"	74°55'0,99"	410
3	4°57'48,5"	74°55'30,6"	400
4	4°57'42,5"	74°54'45,7"	410
5	4°57'52,8"	74°53'56,4"	349
6	4°58'0,3"	74°54'15,6"	385
7	4°59'55,2"	74°54'28,5"	340
8	4°57'44,5"	74°54'29,7"	380
9	4°57'43"	74°53'57,1"	410
10	4°57'18,7"	74°54'28,6"	335

Fase de campo: se procedió a la apertura de tres calicatas por parcela para obtener tres submuestras que conformaron una muestra compuesta en cada una de las parcelas (ICA, 1992). Cada una de las calicatas contó con las siguientes especificaciones: 50 cm de ancho, 50 cm de largo y 70 cm de profundidad, elaborando una al extremo izquierdo, una en el centro y otra en el extremo derecho de la parcela, con el fin de tener una muestra representativa del suelo correspondiente al horizonte A que se identifica como el más sensible a las variaciones de la calidad del suelo (Arbelo, Guerra, Mora, Laguna, 2002).

Las 10 muestras de suelos se guardaron en bolsas estériles (Cuestas, 2005; Alfaro, Alvarado, Chaverri, 2001; FAO, 1990) previamente marcadas con el nombre del sitio y se trasladaron a los laboratorios de Análisis de Suelos de la Universidad del Tolima.

Fase de laboratorio: con cada una de las muestras se determinaron los parámetros físicos de textura, porosidad, humedad, densidad aparente y densidad real, consistencia, color y estructura, así como los parámetros químicos de pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, elementos mayores (P, Ca, Mg, K), elementos menores (Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B, S, Al), saturación de aluminio, saturación de bases, relación Ca/Mg, relación (Ca+Mg)/K y relación Mg/K.

Análisis de los datos: se analizaron las características de los suelos de cada una de las parcelas mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) generado por el programa Infostat, para establecer relaciones entre las variables físicas y químicas. Se analizó la variación química del suelo a través del tiempo mediante un análisis descriptivo y su efecto sobre el proceso de sucesión vegetal.

Resultados

Relación entre variables físicas: los dos primeros factores del análisis de componentes principales (PCA) explicaron la variabilidad del 78% (Figura 1). Las parcelas 3 y 5 aportaron un porcentaje de variación del 50% al factor 1,

mientras que las parcelas 8, 7, 4 y 2 aportaron un porcentaje de variación del 28% al factor 2. Las variables densidad real (Dr), porcentaje de porosidad (% P), densidad aparente (Da) y porcentaje de humedad (% H) fueron robustas y aportaron información para el análisis, sin embargo, no se presentaron agrupamientos significativos entre las variables.

Se encontró que la variable Da estaba influenciada por las parcelas 8, 7, 4 y 2, agrupando la mayor similaridad, y correlacionándose negativamente con % P y % H influenciada por las parcelas 9 y 10, la cual estaba correlacionada negativamente con la variable Dr.

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis físico (Tabla 2), el comportamiento de las variables en el sistema edáfico se describe de la siguiente manera: la densidad aparente presenta valores altos que responden a la característica textural del suelo, beneficiando aspectos como la porosidad, capacidad de aireación e infiltración. La densidad real presenta valores bajos debido a la característica textural de franco-arenosa que presenta el suelo. El porcentaje de porosidad presenta valores altos a muy altos, indicando una condición porosa ideal para el movimiento de las moléculas de agua y aire en el suelo. El porcentaje de humedad presenta valores medios que se correlaciona con la capacidad porosa del suelo para el almacenamiento de agua, sin embargo, las parcelas 3 y 8 presentan niveles medianamente bajos debido a la evaporación por presentar vegetación herbácea desprovista de árboles y a una desintegración del suelo por procesos de erosión favorecidos por la cercanía al río. El color predominante es el café amarillento, que representa una cantidad relativamente baja de materia orgánica. La textura es franco-arenosa generalizada, la cual mantiene un porcentaje de porosidad y humedad adecuado para el mantenimiento de la fase gaseosa y líquida. La consistencia se presenta en valores nulos como en la parcela 9 que corresponde a una zona de humedad hasta valores relativamente altos como en la parcela 7 donde la compactación del suelo es mayor. La estructura

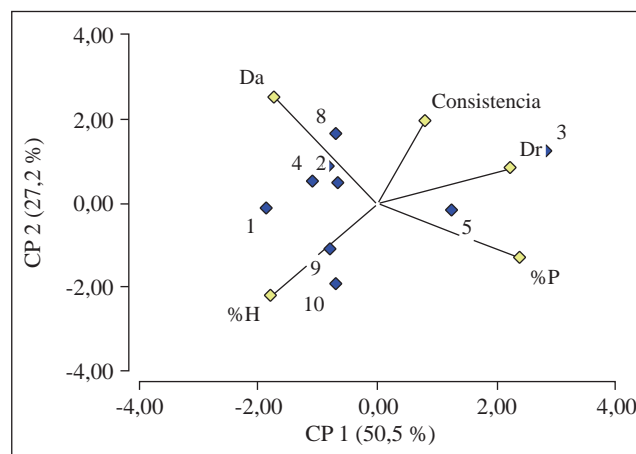


Figura 1. Relaciones entre variables físicas con PCA presentes en los lodos fluviovolcánicos de Armero (Tolima-Colombia).

Tabla 2. Parámetros físicos evaluados en los lodos fluviovolcánicos de Armero (Tolima-Colombia)

Parcela	Da	Dr	% P	% H	Textura	Estructura	Consistencia	Color
1	1,52	2,42	37,19	3,96	FA	Migajosa	2,25	10 y R-marrón
2	1,52	2,46	38,21	3,46	FA	Granular	2,42	10 y R-marrón muy pálido
3	1,48	2,55	41,96	2,32	FA	Granular	3,08	10 y R-marrón pálido
4	1,52	2,43	37,44	3,16	FA	Migajosa	1,75	2,5 y-marrón amarillento claro
5	1,47	2,50	41,20	3,34	FA	Granular	2,83	10 y R- marrón amarillento oscuro
6	1,40	2,47	43,30	3,10	FA	Migajosa	3,00	10 y R-marrón pálido
7	1,53	2,41	39,04	3,34	FA	Granular	3,50	7,5 y R-gris muy oscuro
8	1,52	2,42	37,19	2,98	FA	Granular	4,00	10 y R- marrón amarillento claro
9	1,49	2,44	38,93	3,40	FA	Migajosa	0,00	10 y R-marrón muy pálido
10	1,44	2,40	40,00	4,12	FA	Granular	2,20	2,5 y- marrón amarillento claro

Da: densidad aparente

Dr: densidad real

%P: porcentaje de porosidad

%H: porcentaje de humedad

FA: franco-arenosa

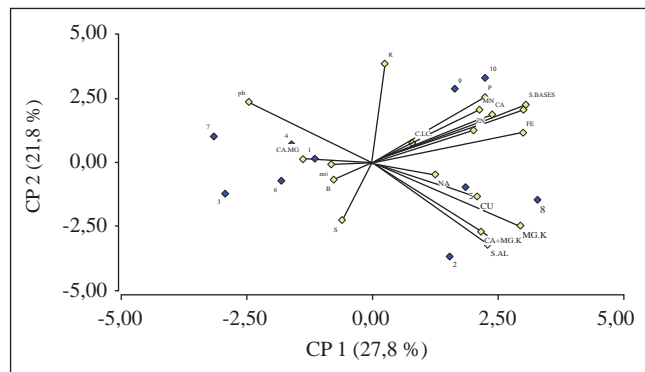
predominante es la granular seguida de la migajosa, lo cual indica un movimiento que los agregados formados permiten un buen movimiento del agua, así como el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas.

Relación entre variables químicas: los cuatro primeros factores del análisis de componentes principales (PCA) explicaron la variabilidad del 76 %, sin embargo, entre los dos primeros se encuentra variabilidad del 50% (Figura 2). Las parcelas 8, 5 y 2 aportaron un porcentaje de variación del 28% al factor 1, mientras que las parcelas 7, 4, 6, y 3 aportaron un porcentaje de variación del 22% al factor 2.

Las variables pH, P, Mn, Zn, Ca, saturación de bases, Mg, Fe, Cu, relación Mg/K, relación (Ca+Mg)/K, saturación de Al y concentración de Al fueron robustas y aportaron información para el análisis.

La variable pH se correlacionó negativamente con la relación (Ca+Mg)/K, relación Mg/K, saturación de Al y concentración de Al. El Na y el K no presentaron ninguna relación de interacción y se evidenció una correlación positiva entre P, Mn, Ca, Zn, saturación de bases, Fe y Mg.

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis químico (Tabla 3), el comportamiento de las variables en el sistema edáfico se describe de la siguiente manera: el pH se presenta en niveles medianamente ácidos hasta niveles neutros, favoreciendo la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, puede llegar a ser desfavorable para la solubilidad de la materia orgánica. Los niveles de materia orgánica presentan un contenido relativamente bajo, lo cual determina un aumento en los niveles de pH y reduce medianamente la disponibilidad de los nutrientes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presenta unos niveles adecuados para retener y tener a disposición nutrientes procedentes de la meteorización o mineralización de la materia orgánica.

**Figura 2.** Relaciones entre variables químicas con PCA presentes en los lodos fluviovolcánicos de Armero (Tolima-Colombia).

El P se encuentra en niveles medios, como consecuencia del bajo contenido de materia orgánica que influye en la oferta nutricional de éste elemento; en las parcelas 8, 9 y 10 aunque el contenido de materia orgánica es bajo, el P es alto debido posiblemente a la C.I.C. que se encuentra en niveles altos.

El Ca en las parcelas 3, 6 y 7 se presentan niveles bajos y en las otras ya se aprecia un aumento considerable en su concentración. El Mg presenta niveles bajos en las parcelas 2, 3, 4, 5, 6 y 7; en las parcelas 1, 8, 9 y 10 hay un aumento considerable en su concentración.

El Na en las parcelas 1, 3, 6, 7, 8 y 10 presenta niveles bajos y en las parcelas 2, 4, 5 y 9 el valor se encuentra en niveles normales.

El K en las parcelas 2, 3 y 5 presenta niveles muy bajos, en las otras parcelas de igual forma los niveles tienden a hacer bajos, situación que influye en la condición de acidez, al igual que la cantidad de materia orgánica.

El Fe en las parcelas 5, 8, 9 y 10 presenta valores altos que intervienen en las condiciones de acidez y aumentan por el aporte de descomposición mineral.

Tabla 3. Parámetros químicos evaluados en los lodos fluviovolcánicos de Armero (Tolima-Colombia)

Parámetros	Parcelas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	5,70	4,00	5,80	7,20	5,00	5,50	5,50	4,00	5,60	5,40
Materia orgánica	0,90	0,60	0,50	0,90	0,80	0,90	1,10	1,00	0,50	0,70
Capacidad Intercambio Catiónico	11,00	10,00	11,00	14,00	10,00	11,00	9,00	13,00	12,00	11,00
Fosforo (P) (ppm)	27,00	34,00	52,00	54,00	55,00	53,00	44,00	81,00	93,00	83,00
Calcio (Ca) (meq.)	4,90	4,50	2,50	7,10	4,70	2,60	3,30	6,00	5,90	6,50
Magnesio (Mg) (meq.)	2,70	2,10	1,20	1,30	1,80	1,70	1,10	3,30	3,90	3,90
Sodio (Na) (meq.)	0,10	0,20	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10
Potasio (K) (meq.)	0,23	0,12	0,12	0,19	0,14	0,19	0,37	0,21	0,37	0,36
Hierro (Fe) (ppm)	15,00	12,00	16,00	12,00	88,00	4,40	8,00	72,00	91,00	46,00
Cobre (Cu) (ppm)	0,80	0,80	0,20	0,30	2,60	1,80	0,30	2,00	0,20	1,20
Zinc (Zn) (ppm)	1,30	1,30	0,30	2,70	3,90	3,30	1,60	2,80	2,90	2,80
Manganeso (Mn) (ppm)	9,00	9,00	5,60	7,60	32,00	9,20	6,80	12,00	12,00	56,00
Boro (B) (ppm)	0,60	0,60	0,80	0,40	0,80	0,90	0,40	0,30	0,60	0,60
Azufre (S) (ppm)	58,00	58,00	72,00	83,00	57,00	73,00	51,00	89,00	57,00	28,00
Aluminio (Al) (meq.)	0,00	1,60	0,00	0,00	0,60	0,20	0,20	1,60	0,00	0,20
Saturación de aluminio	0,00	16,00	0,00	0,00	6,00	1,80	2,20	12,30	0,00	1,80
Saturación de bases	72,10	69,20	35,60	62,80	68,40	41,70	54,10	73,90	86,40	98,70
Relación Ca/Mg	1,80	2,10	2,10	5,50	2,60	1,50	3,00	1,80	1,50	1,70
Relación (Ca+Mg)/K	33,00	55,00	30,80	44,20	46,40	22,60	11,90	44,30	26,50	28,90
Relación Mg/K	11,70	17,50	10,00	6,80	12,90	8,90	3,00	15,70	10,50	10,80

El Cu en las parcelas 1, 2, 3, 4, 7 y 9 presenta niveles bajos, indicando que el pH al acercarse a la neutralidad reduce su solubilidad en el suelo y los niveles altos que se presentan de Fe también disminuyen su absorción.

El Zn en las parcelas 1, 2, 3 y 7 presentan niveles muy bajos que influyen en la disminución de la acidez y están siendo afectados posiblemente por los niveles de P que disminuyen su absorción.

El Mn en las parcelas 5 y 10 presentan niveles altos, en las otras parcelas los niveles son bajos lo cual favorece la disminución en la acidez y se ve influido por la cantidad de materia orgánica que aunque es baja va en incremento.

El B en general es bajo e influye en la mediana acidez del suelo y se ve afectado por la textura franco-arenosa.

El S presenta niveles altos en todas las parcelas excepto en la parcela 10 donde existe vegetación arbórea alrededor y es notable la alteración del terreno debido a siembras y el ganado.

Los niveles variables de Al y saturación de Al sólo se registran en las parcelas 2, 5, 6, 7, 8 y 10, debido a que tienen un pH más ácido que el resto de las parcelas donde disminuye la movilización y captación del Al.

La saturación de bases $(Ca+Mg+Na+K)/CIC \cdot 100$ en las parcelas 3, 6 y 7 presenta los niveles más reducidos debido a la baja concentración que tienen de las bases. La relación Ca/Mg presenta una calificación de baja a media y adecuada solo para la parcela 4, en relación con el Ca con quien establece una correlación directa. Por otro lado, este

valor presenta una calificación muy baja y media solo para la parcela 4, en relación con el Mg con quien establece una correlación inversa.

La relación $(Ca+Mg)/K$ presenta un valor medio para las parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 y un valor adecuado para las parcela 9 y 10, se relaciona inversamente con el contenido de K el cual se encuentra en condiciones bajas. La relación Mg/K presenta valores medios en las parcelas excepto en la 7 donde la concentración es baja, teniendo en cuenta, que existe una relación antagónica entre éstos dos elementos y en éste caso la baja presencia de K aumenta los niveles de magnesio.

Variación de las condiciones edáficas en el tiempo: de acuerdo con los datos de la tabla 4 en el primer estudio de sucesión vegetal y edafológica se reportaron unos niveles altos de S (1463 ppm) y de Fe (278,8 ppm), un porcentaje de acidez alto (3,3) y un contenido de materia orgánica bajo; mientras que para el segundo estudio se presentó una reducción significativa de S (413 ppm) y el Fe (136,6 ppm) en un 70% y 50% respectivamente, el pH mostró una disminución en su acidez (4,34) y el incremento de materia orgánica fue alto.

En el tercer estudio se evidenció una reducción considerable en los niveles de S (182,47 ppm) y de Fe (20,88 ppm), un aumento en el pH (5,12) y una reducción muy baja en los niveles de materia orgánica. Para el cuarto estudio se reportó una continua reducción en el S (62,6 ppm) y un incremento en el contenido de Fe (36,44 ppm); el valor del

Tabla 4. Parámetros químicos comparables en los cuatro estudios de sucesión vegetal de los lodos fluviovolcánicos de Armero (Tolima-Colombia)

Estudio	pH	Materia orgánica	S (ppm)	P (ppm)	K (meq.)	Ca (meq.)	Mg (meq.)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)
1	3,30	0,38	1463,00	104,70	0,03	5,10	3,08	278,80	17,80	100,00
2	4,34	1,44	413,00	107,20	0,178	7,24	3,42	136,60	3,72	23,76
3	5,12	1,11	182,47	56,30	0,35	6,99	1,53	20,88	5,93	17,52
4	5,37	0,79	62,60	57,60	0,23	4,80	2,30	36,44	2,29	15,92

pH se encontró con una baja acidez y los contenidos de materia orgánica presentaron una reducción. En los cuatro estudios realizados se reportó una textura franco-arenosa.

Análisis suelo-vegetación: en los cuatro estudios de sucesión vegetal realizados en la zona de Armero afectada por los lodos fluviovolcánicos se registraron 565 especies distribuidas en 72 familias, de las cuales sobresalen las familias Leguminosae, Poaceae, Asteraceae, Malvaceae, Euphorbiaceae y Cyperaceae. Es evidente que el cambio en las diferentes concentraciones de los parámetros físicos y químicos ha sido proporcional a la variación en la vegetación, encontrándose el predominio de hierbas en un 45%, y árboles en un 20%.

Discusión

Las condiciones edáficas que se presentaron después de la deposición de los lodos favorecieron en un primer momento la aparición de 294 especies que colonizaron a través de la formación de montículos, siendo las especies más notables *Sarcostemma clausum*, *Melinis repens* (*Rhynchelitrum repens*) y *Cyperus ligularis* (*Mariscus ligularis*). En el segundo estudio la riqueza florística se aumentó en 38 especies, conformando cuatro asociaciones básicas que fueron Rhynchelitretum, Indigoferetum, Ficetum y Panicetum; la segunda asociación dominada por especies del grupo de las leguminosas fue determinante en el proceso de cambio de las condiciones edáficas al contribuir a la fertilización de los lodos por la acción de los nódulos con bacterias nitrificantes presentes en las raíces. Para el tercer estudio solo las asociaciones vegetales Panicetum y Ficetum fueron notables y se notó un amplio cubrimiento de las leguminosas en todos los sectores; el número de especies disminuyó considerablemente y para el último estudio se registraron 195 especies, con dominio del hábito de crecimiento arbóreo y arbustivo. Es evidente la acción de las leguminosas como grupo funcional clave en el mejoramiento de la calidad del suelo, teniendo en cuenta, los servicios agroecológicos que proporcionan en cuanto al aumento de la vegetación, incremento de biomasa e influencia positiva en la abundancia y diversidad microbiana (Duchene, et al., 2017).

Por lo anterior, se puede inferir que el asentamiento de nuevas especies vegetales sobre los lodos está relacionado con los cambios en las condiciones edáficas, y de acuerdo con los planteado por Arbelo, et al., (2002), esto influye para que las formaciones actuales de vegetación boscosa se

establezcan en condiciones favorables para su desarrollo, reflejado en mayor contenido de materia orgánica y la disminución de los niveles de Fe, S y Al, los cuales en altas concentraciones generan toxicidad y acidez del suelo, así como la inhibición de actividades enzimáticas mediadas por microbios en los ciclos de nutrientes (Kunito, 2016).

Actualmente existe una similitud en la vegetación entre el primer y último estudio de sucesión debido a la fuertes actividades de intervención a la que se ha visto sometida el área de Armero entre las que se encuentra la agricultura intensiva, el monocultivo de especies promisorias y quemadas, las cuales modifican la estructura física del suelo y altera la concentración de los nutrientes disponibles haciendo que el proceso de sucesión se reinicie con el establecimiento de especies pioneras, esto es similar a lo planteado por Evans (2006) quien indica que la sucesión no es unidireccional sino que por el contrario es un proceso dinámico que puede presentar un retroceso. De igual forma, la vegetación continúa en un cambio progresivo en su estructura y composición y a pesar de que el cambio de la comunidad vegetal esté fuertemente relacionado con la variación de las condiciones del suelo, estos procesos se dan a largo plazo (Rodríguez, Arbelo, Guerra, Mora, 2001).

En cuanto a las variables físicas y químicas del suelo y su influencia en la vegetación a través de los años, Esquivel, Ramírez (1994) reportaron una íntima relación entre el proceso de sucesión vegetal y la evolución de las características del suelo. Según Gómez (1988) la textura franco arenosa presenta una adhesividad media, una infiltración buena, una retención de humedad regular y una aireación buena conformándose en éste suelo una textura que tiende al equilibrio y dispone de unas condiciones efectivas para el desarrollo de las funciones fisiológicas de las plantas (Fajardo, 2005). Sin embargo, en suelos de origen volcánico es notable la combinación textural que proporciona distribuciones de minerales frecuentemente homogéneas, con la acción de elementos como el Mg y Ca que actúan en su movilidad y estabilidad (Cuadros, 2016).

Los elevados contenidos de Fe y S que se reportaron en el primer estudio son consecuentes por la alta carga de estos elementos que fueron depositados por los lodos volcánicos. A medida que se inició el crecimiento de la vegetación mediante una sucesión primaria, los niveles de éstos elementos se redujeron considerablemente por la incorporación realizada a las plantas, especialmente en las forrajeras (Malavolta, 1985).

La acidez del suelo al estar relacionada con las propiedades físicas y químicas ha sido fundamental para el establecimiento de la vegetación actual, el cual ha presentado una disminución progresiva de la acidificación, favoreciendo la disponibilidad y asimilación de los nutrimentos por las plantas (Marín, Lora, 1979).

El contenido de la materia orgánica ha sido favorecido por la temperatura (Lora, 1971), también la textura francoarenosa ha permitido el balance entre los procesos de aporte al suelo; de igual forma las condiciones cercanas de neutralidad que se presentan en el suelo ha favorecido la descomposición de la materia orgánica dentro de los rangos ideales para la obtención de productos aprovechables por las plantas (Raheja, 1966). Según Taboada (2016), el grado de meteorización, el horizonte del suelo y las zonas bioclimáticas están relacionadas con la cantidad de materia orgánica ofertada por el suelo, lo cual sugiere que la ubicación geográfica y altitudinal de Armero ha contribuido con la descomposición y aprovechamiento de los elementos químicos presentes en el medio edáfico.

Las concentraciones de K en los últimos 25 años se han elevado lo cual ha significado un beneficio para el establecimiento de la vegetación, teniendo en cuenta que, es un macronutriente absorbido por las plantas en grandes cantidades, siendo superado sólo por el nitrógeno y, a veces por el Ca (Sanzano, 2001). Los niveles de P han mantenido un comportamiento de disminución a través de los años, posiblemente por el porcentaje de materia orgánica pero, sin embargo, sigue con un efecto positivo que da continuidad al proceso de sucesión (Ramírez, 1994). Estas variaciones de las condiciones químicas se sustentan en el tiempo por la disponibilidad y reserva de nutrientes que ha generado la disposición de los lodos fluviovolcánicos, a través de largos procesos de intemperización que generan oferta de nutrientes suficientes para satisfacer las necesidades ecológicas de restauración y producción (Anda, 2015).

Conclusiones

Las características físicas y químicas del suelo se modificaron drásticamente durante los 30 años posteriores a la erupción volcánica y actualmente las variables presentan niveles aptos para el desarrollo de la vegetación. Han pasado de un sistema de acidez, salinidad y sobresaturación de elementos al establecimiento de un ecosistema edáfico propicio para el desarrollo de especies típicas de la formación vegetal de bosque seco tropical.

Las variables físicas del suelo han establecido condiciones para que la vegetación se desarrolle, a través de niveles óptimos de humedad, porosidad y una estructura que facilita el desplazamiento y la toma de los nutrientes por parte de las raíces.

El pH ha incrementado, pero la mayor parte de los lodos se mantiene en un nivel moderado de acidez que no afecta drásticamente la vegetación, pero, disminuye la concentración de materia orgánica y de elementos como el

P y el K, sin embargo, otros elementos como el Fe presenta niveles adecuados para su participación en el mantenimiento y la demanda fisiológica de la planta.

Las condiciones edáficas han estado directamente relacionadas con el establecimiento de la vegetación sucesional en un proceso ecológico alterno a las perturbaciones naturales y humanas, lo cual se expresa en la evidente sucesión a tal punto que especies que fueron dominantes en los primeros años del proceso, actualmente son escasas como sucede con *Melinis repens* (Poaceae), *Sarcostemma clausum* (Apocynaceae), *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) e *Indigofera hirsuta* (Leguminosae), entre otras.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Oficina de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Alfaro, E., Alvarado, A. & Chaverri, A. (2001). Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales del bosque tropical seco en Guanacaste. *Agronomía Costarricense*. **25**: 7-20.
- Anda, M., Suryani, E. & Djadja, H. (2015). Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. *Soil and Tillage Research*. **150**: 10-20.
- Arbelo, C., Guerra, J., Mora, J. & Laguna L. (2002). Calidad del suelo y sucesión vegetal en andosoles forestales de las islas canarias. *Edafología*. **9**: 31-38.
- Castillo, A. & Salinas, N. (1992). Análisis de los lodos de Armero seis años después de la avalancha en la parte alta-media-baja y su vegetación alrededor del Río Lagunilla. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Cantillo, E., Lozada, A. & Pinzón, J. (2009). Caracterización sucesional para la restauración de la resea forestal Cárpatos, Guasca, Cundinamarca. *Revista Colombia Forestal*. **12**: 103-118.
- Cuestas, P. (2005). El análisis de suelos: Toma de muestras y recomendaciones de fertilización para la producción ganadera. En Corpoica-MADR (ed). Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones caribe y valles interandinos. (pp. 1-10). Bogotá.
- Cuadros, J., Díaz, J., Sanchez, A., García, A. & Yepes, J. (2016). Chemical and textural controls on the formation of sepiolite, palygorskite and dolomite in volcanic soils. *Geoderma*. **271**: 99-114.
- Chaves, H. & Guevara, J. (1987). Delimitación de los suelos (protosuelos). En IGAC (ed). Proyecto de restauración forestal y corrección de torrentes en las zonas afectadas por la erupción del Volcán Nevado del Ruíz. Bogotá.
- Duchene, O., Vian, F. & Celette, F. (2017). Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **240**: 148-161.

- Esquivel, H. & Leguizamón, G.** (1989). Estudio florístico de la región cubierta por los lodos fluviovolcánicos en la zona, como consecuencia de la erupción del Volcán Nevado del Ruiz en 1985. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Esquivel, H. & Ramírez, L.** (1994). Estudio sucesional de los lodos fluviovolcánicos del municipio de Armero. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Esquivel, H., Frye, A. & Ramírez, L.** (1999). Estado de la sucesión vegetal y edafológica de los lodos de Armero 15 años después de la erupción del Volcán Arenas del Nevado del Ruiz. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Evans, M.** (2006). Caracterización de la vegetación natural de sucesión primaria en el Parque Nacional Volcán Pacaya y Laguna de Calderas. Guatemala: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Fajardo, N.** (2005). Uso y manejo de suelos. Ibagué: Universidad del Tolima.
- FAO.** (1990). Guidelines for soil profile description. Holanda: ROME/ISRIC, Wageningen.
- Frye, A.** (1986). Caracterización físico-química y diagnóstico edafológico de los aluviones volcánicos de Armero. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Gomez, A.** (1988). La zona andina colombiana. Erosión y conservación de suelos. Chinchiná, Caldas: CENICAFÉ.
- Holdridge, L.** (1979). Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- ICA.** (1992). Fertilización en diversos cultivos. Bogotá: PRODUMEDIOS.
- Kunito, T., Isomura, I., Sumi, H., Park, H., Toda, H., Otsuka, S., Nagaoka, K., Saeki, K. & Senoo, K.** (2016). Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. **97**: 23-30.
- Loaiza, J.** (2011). El recurso suelo. *Suelos ecuatoriales*. **41**: 6-18.
- Lora, S.** (1971). Materia orgánica y nitrógeno en el suelo. Interpretación de análisis de suelos y recomendaciones de fertilizantes. Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Malagón, D.** (1989). El flujo de los lodos en la región de Armero (Tolima-Colombia). Caracterización y Manejo inicial. En Resurgir (ed). Aspectos médicos de la catástrofe volcánica del Nevado del Ruiz. (pp. 49-52). Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Malavolta, E.** (1985). Desordens nutricionais no cerrado. Piracicaba, Brasil: POTAFOS.
- Marin, G. & Lora, R.** (1979). Acidez y enclamiento de suelos. Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Raheja, P.** (1966). Organic matter and carbón-nitrogen relationships. Soil productivity and crop growth. New York, Estados Unidos: P. HOUSE.
- Rodriguez, A., Arbelo, C., Guerra, J. & Mora, J.** (2001). Influences of changes in use on the properties of andosols and andic soils. Volcanic soils: Properties, processes and land use internat. Azores, Portugal.
- Sanzano, A.** (2001). El Potasio del suelo. Argentina: Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, UNT.
- Taboada, T., Rodríguez, L., Ferro, C., Stoops, G. & Martínez, A.** (2016). Chemical weathering in the volcanic soils of Isla Santa Cruz (Galápagos Islands, Ecuador). *Geoderma*. **261**: 160-168.
- Torres, A., Adarve, J., Cárdenas, M., Vargas, J., Londoño, V., Rivera, K., Home, J., Duque, O. & González, A.** (2012). Dinámica sucesional de un fragmento de bosque seco tropical del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*. **13**: 66-88.

Computation of matrices and submodular functions values associated to finite topological spaces

Julian L. Cuevas Rozo^{1,*}, Humberto Sarria Zapata¹

¹Dpto. de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Abstract

The submodular functions have shown their importance in the study and characterization of multiple properties of finite topological spaces, from numeric values provided by such functions (Sarria, Roa & Varela, 2014). However, the calculation of these values has been performed manually or even using Hasse diagrams, which is not practical. In this article, we present some algorithms that let us calculate some kind of polymatroid functions, specifically f_U , f_D , \bar{f} and r_A , which define a topology, by using topogenous matrices.

Key words: Finite topological spaces, submodular functions, topogenous matrix, Stong matrix.

Cálculo de matrices y funciones submodulares asociadas a espacios topológicos finitos

Resumen

Las funciones submodulares han mostrado su importancia en el estudio y la caracterización múltiples propiedades de los espacios topológicos finitos, a partir de valores numéricos proporcionados por dichas funciones (Sarria, Roa & Varela, 2014). Sin embargo, el cálculo de éstos valores se ha realizado manualmente e incluso haciendo uso de diagramas de Hasse, lo que no es práctico. En este artículo, presentamos algunos algoritmos que nos permiten calcular cierta clase de funciones polimatroides, específicamente f_U , f_D , \bar{f} y r_A , las cuales definen una topología, por medio del uso de matrices topogéneas.

Palabras clave: Espacios topológicos finitos, funciones submodulares, matriz topogénea, matriz de Stong.

Introduction

Alexandroff proved that finite topological spaces are in correspondence one-to-one with finite preorders (Alexandroff, 1937), showing that such spaces can be viewed from other mathematical structures. Likewise, Shiraki named as *topogenous matrices* the objects worked by Krishnamurthy, in an attempt to count the topologies that can be defined on a finite set (Krishnamurthy, 1966), a problem still unsolved. Moreover, such matrices provide all the information about the topology of a finite space (Shiraki, 1968), showing the relevance of these objects in the topological context.

Recently, connections between submodular functions and finite topological spaces have been developed (Abril, 2015), (Sarria et al., 2014), allowing to interpret many topological concepts through numeric values provided by

such associated functions, which is really important if we want to mechanize the verification of topological properties on subsets of an arbitrary finite space.

In view of the above, we regard some matrices, as topogenous and Stong matrices defined in sections 2 and 3, which are useful, for example, in the study of lattice of all topologies on a fixed set, and we link such matrices with particular submodular functions (f_U , f_D , \bar{f} and r_A), important in the finite topological spaces context, by algorithms created to improve the computations shown in (Abril, 2015) and (Sarria et al., 2014).

*Corresponding autor:

Julian L. Cuevas Rozo, jlcuevasr@unal.edu.co

Received: September 30, 2016

Accepted: March 6, 2017

From now on, we shall use exclusively the symbol X to denote a set of n elements $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, unless explicitly stated otherwise. We define $I_n = \{1, 2, \dots, n\}$ and for a permutation σ of I_n , we use P_σ to denote the matrix whose entries satisfy

$$[P_\sigma]_{ij} = \delta(i, \sigma(j))$$

where δ is the Kronecker delta.

Topogenous matrix

Given a finite topological space (X, \mathcal{T}) , denote by U_k the minimal open set containing x_k :

$$U_k = \bigcap_{x_k \in E \in \mathcal{T}} E$$

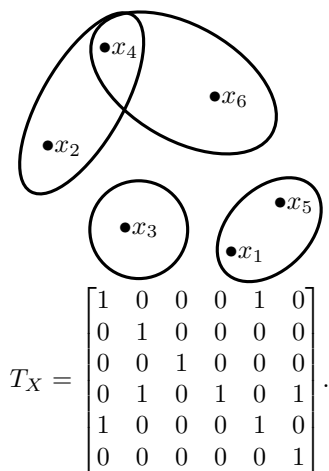
and consider the collection $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_n\}$, which is the minimal basis for the space in the sense that \mathcal{U} is contained in any other basis for the topology \mathcal{T} .

Definition 0.1. Let (X, \mathcal{T}) be a finite topological space and $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_n\}$ its minimal basis. The *topogenous matrix* $T_X = [t_{ij}]$ associated to X is the square matrix of size $n \times n$ that satisfies:

$$t_{ij} = \begin{cases} 1 & , x_i \in U_j \\ 0 & , \text{in other case} \end{cases}$$

Remark 0.2. (Shiraki, 1968) introduce the term *topogenous matrix* to denote the transpose matrix of that in above definition.

Example 0.3. In the next diagram, we represent the minimal basis for a topology on $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$. The minimal open sets are $U_1 = U_5 = \{x_1, x_5\}$, $U_2 = \{x_2, x_4\}$, $U_3 = \{x_3\}$, $U_4 = \{x_4\}$, $U_6 = \{x_4, x_6\}$ and the associated topogenous matrix is as follows:



Example 0.4. Consider the topological space (X, \mathcal{T}) where $X = \{a, b, c, d, e\}$ and

$$\mathcal{T} = \{\emptyset, \{b\}, \{d\}, \{b, d\}, \{d, e\}, \{b, d, e\}, \{a, b, d\}, \{a, b, d, e\}, \{a, b, c, d\}, X\}$$

For the following orderings of the elements, we obtain the respective topogenous matrices as can be verified by calculating the minimal basis in each case:

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (a, b, c, d, e)$$

$$T_{X_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (b, d, e, a, c)$$

$$T_{X_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Topogenous matrices can be characterized by the following result.

Theorem 0.5. (Shiraki, 1968) Let $T = [t_{ij}]$ be the topogenous matrix associated to (X, \mathcal{T}) . Then T satisfies the following properties, for all $i, j, k \in I_n$:

1. $t_{ij} \in \{0, 1\}$.
2. $t_{ii} = 1$.
3. $t_{ik} = t_{kj} = 1 \implies t_{ij} = 1$.

Conversely, if a square matrix $T = [t_{ij}]$ of size $n \times n$ satisfies the above properties, T induces a topology on X .

Homeomorphism classes are also described by similarity via a permutation matrix between topogenous matrices.

Theorem 0.6. (Shiraki, 1968) Let (X, \mathcal{T}) and (Y, \mathcal{H}) be finite topological spaces with associated topogenous matrices T_X and T_Y , respectively. Then (X, \mathcal{T}) and (Y, \mathcal{H}) are homeomorphic spaces if, and only if, T_X and T_Y are similar via a permutation matrix.

Transiting Top(X)

Using topogenous matrices, we can find a way to *transit* through $\text{Top}(X)$, the complete lattice of all topologies on a fixed set X . Given two topologies \mathcal{T}_1 and \mathcal{T}_2 in $\text{Top}(X)$, the *supremum* of them, denoted by $\langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$, is the topology whose open sets are unions of finite intersections of elements in the collection $\mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2$.

Proposition 0.7. (Cuevas, 2016) Let (X, \mathcal{T}_1) and (X, \mathcal{T}_2) be finite topological spaces with minimal basis $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_n\}$ and $\mathcal{V} = \{V_1, \dots, V_n\}$, respectively. Then, the minimal basis $\mathcal{W} = \{W_1, \dots, W_n\}$ for the space (X, \mathcal{T}^*) , where $\mathcal{T}^* = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$, satisfies $W_k = U_k \cap V_k$ for all $k \in I_n$.

The next theorem shows a way to move ahead in $\text{Top}(X)$, that is, it allows to find the supremum of two topologies. The symbol \wedge is regarded in the following sense: if E and F are $n \times n$ matrices, $E \wedge F$ is the square matrix whose entries satisfy $[E \wedge F]_{ij} = \min\{[E]_{ij}, [F]_{ij}\}$.

Theorem 0.8. Let $X_1 = (X, \mathcal{T}_1)$, $X_2 = (X, \mathcal{T}_2)$ and $X^* = (X, \mathcal{T}^*)$ be finite topological spaces with topogenous matrices T_{X_1} , T_{X_2} and T_{X^*} , respectively. If $\mathcal{T}^* = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$ then

$$T_{X^*} = T_{X_1} \wedge T_{X_2} \quad (1)$$

Conversely, if there exist finite spaces X_1 , X_2 and X^* which satisfy (1) then $\mathcal{T}^* = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$.

Proof. Suppose that $\mathcal{T}^* = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$ and fix an index $k \in I_n$. By proposition 0.7, we know that $W_k = U_k \cap V_k$, thus $x_i \in W_k \iff x_i \in U_k$ and $x_i \in V_k$. Since the column k of a topogenous matrix represents the minimal open set which contains x_k , then for each $i \in I_n$ it is satisfied that $[T_{X^*}]_{ik} = \min\{[T_{X_1}]_{ik}, [T_{X_2}]_{ik}\}$.

The second part of the theorem holds by uniqueness of the minimal basis for a topology, since if (1) is satisfied, by the above argument we would have $T_{X^*} = T_{X_1} \wedge T_{X_2} = T_{(X, \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle)}$ and thus $\mathcal{T}^* = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle$. ■

A way to go back in $\text{Top}(X)$ is finding subtopologies, which is possible using topogenous matrices as is shown in the next result.

Corollary 0.9. Let $X_1 = (X, \mathcal{T}_1)$ and $X_2 = (X, \mathcal{T}_2)$ be finite topological spaces. Then $\mathcal{T}_1 \subseteq \mathcal{T}_2$ if, and only if, $[T_{X_2}]_{ij} \leq [T_{X_1}]_{ij}$ for all $i, j \in I_n$.

Proof. The result follows from the next chain of equivalences:

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_1 \subseteq \mathcal{T}_2 &\iff \mathcal{T}_2 = \langle \mathcal{T}_1 \cup \mathcal{T}_2 \rangle \\ &\iff T_{X_2} = T_{X_1} \wedge T_{X_2} \iff [T_{X_2}]_{ij} \leq [T_{X_1}]_{ij} \end{aligned}$$

Triangularization of topogenous matrices

Let (X, \mathcal{T}) be a finite topological space with minimal basis $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_n\}$ and associated topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]$. Define the binary relation \leq on X as follows:

$$x_i \leq x_j \iff x_i \in U_j \iff U_i \subseteq U_j \iff t_{ij} = 1 \quad (2)$$

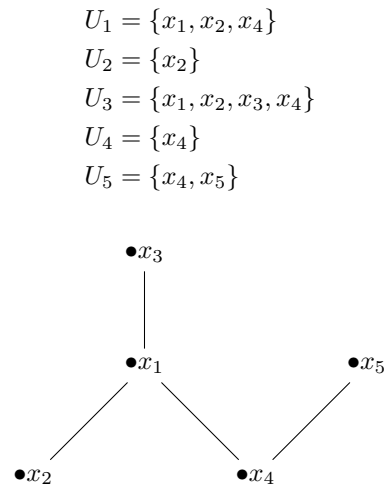
This relation is a preorder on the space, that is, it is reflexive and transitive. The next theorem shows under which condition such a relation is a partial order on X .

Theorem 0.10. (Alexandroff, 1937) Topologies on a finite set X are in one-to-one correspondence with preorders on X . Moreover, a finite topological space (X, \mathcal{T}) is T_0 if, and only if, (X, \leq) is a poset.

Example 0.11. Consider the space (X, \mathcal{T}) given in the example 0.4 with the ordering

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (a, b, c, d, e).$$

Such space satisfies the T_0 axiom. Hasse diagram of the poset (X, \leq) is the next:



In the example 0.4, it was possible to associate an upper triangular topogenous matrix to the considered space since such topological space is T_0 , as shows the next Shiraki's theorem.

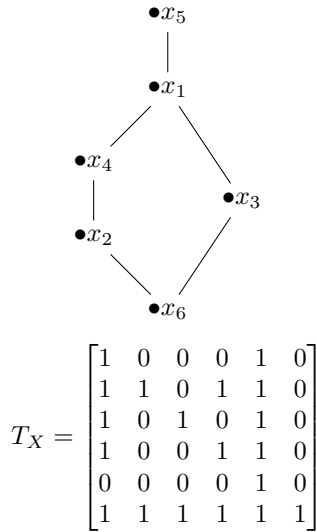
Theorem 0.12. (Shiraki, 1968) A finite topological space (X, \mathcal{T}) is T_0 if, and only if, its associated topogenous matrix T_X is similar via a permutation matrix to an upper triangular topogenous matrix.

A procedure to triangularize a topogenous matrix of a T_0 space X is described below. Given a topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]$ define $M_k = \sum_{i=1}^n t_{ik} = |U_k|$, for each $k \in I_n$; if we organize them in ascending order

$$M_{k_1} \leq M_{k_2} \leq \dots \leq M_{k_n} \quad (3)$$

and consider the permutation $\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{pmatrix}$, the topogenous matrix $P_\sigma^T T_X P_\sigma$ is upper triangular: if $i > j$ and $t_{\sigma(i)\sigma(j)} = 1$, we would have $x_{\sigma(i)} < x_{\sigma(j)}$ and therefore $M_{k_i} < M_{k_j}$ which contradicts the ordering of M_k , hence $t_{\sigma(i)\sigma(j)} = 0$.

Example 0.13. Consider the topological space X , represented by the next Hasse diagram and topogenous matrix:



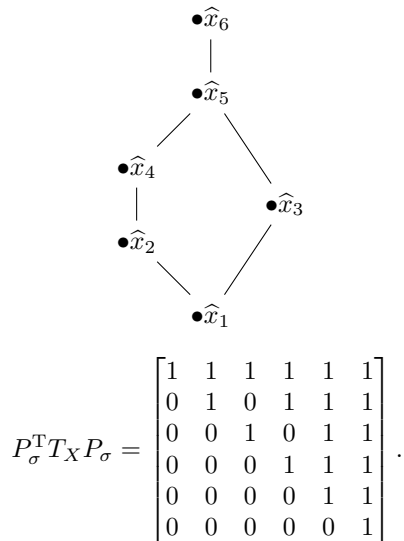
First, we find that: $M_1 = 5, M_2 = M_3 = 2, M_4 = 3, M_5 = 6$ and $M_6 = 1$. Therefore we obtain the permutation

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 6 & 2 & 3 & 4 & 1 & 5 \end{pmatrix} = (165)$$

whose associated matrix is given by

$$P_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

If we denote by $\hat{x}_k = x_{\sigma(k)}$, the new ordering of the elements is represented in the topogenous matrix as follows:



Remark 0.14. Observe that, in general, the permutation σ constructed using the relations in (3) is not unique. In example 0.13, we could have used $\sigma' = (165)(23)$ (and, in this case, no other!) to triangularize T_X obtaining the upper triangular matrix:

$$P_{\sigma'}^T T_X P_{\sigma'} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Despite of this lack of uniqueness to choose such permutation σ , the resulting T_0 spaces are always homeomorphic (Theorem 0.6), so the topological properties are the same.

Remark 0.15. From now on, when (X, \mathcal{T}) is a T_0 space, we assume a fixed ordering in the elements of X such that its topogenous matrix T_X is upper triangular.

Stong matrix

Definition 0.16. Given X a T_0 space, we define the *Stong matrix* $S_X = [s_{ij}]$ as the square matrix of size $n \times n$ that satisfies

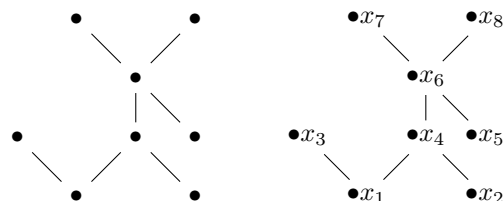
$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & , x_i \leq x_j \text{ and there is no } k \text{ with } x_i < x_k < x_j \\ 0 & , \text{ in other case.} \end{cases}$$

A simple method to calculate the topogenous matrix T_X and the Stong matrix S_X of the space X , from the associated Hasse diagram, is described below. Number the vertices so that $x_i < x_j \implies i < j$, that is, number them *from bottom to top* ensuring that the topogenous matrix is upper triangular. For each $i \neq j$:

- $t_{ij} = 1$ if, and only if, there exists a chain whose minimum is x_i and maximum is x_j .
- $s_{ij} = 1$ if, and only if, (x_i, x_j) is an edge of the diagram.

Remark 0.17. $t_{ij} = 0 \implies s_{ij} = 0$ and $s_{ij} = 1 \implies t_{ij} = 1$.

Example 0.18. Consider the Hasse diagram (left) numbering its vertices as described before (right):



For example, for x_5 we have $x_5 \leq x_5, x_5 \leq x_6, x_5 \leq x_7$ and $x_5 \leq x_8$ then the fifth row of T_X is $[0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1]$. Also, the edges with initial point x_1 are (x_1, x_3) and (x_1, x_4) , then the first row of S_X is $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$. The associated matrices are the following:

$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Relation between topogenous and Stong matrices

We can reconstruct the topogenous matrix from the Stong matrix and vice versa. In the first case, using theorem 0.5, we see that the topogenous matrix is the incidence matrix of the transitive closure of the binary relation represented by the Stong matrix. For the matrix given in example 0.18

$$S_X = [s_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

we add ones in each upper subdiagonal. The first subdiagonal, consisting of the elements $s_{k,k+1}$, $1 \leq k \leq 7$, is not modified because if there is a k such that $s_{k,k+1} = 0$ and $t_{k,k+1} = 1$, there would exist x_j with $x_k < x_j < x_{k+1}$, which is not possible since the ordering we have chosen in remark 0.15 would imply $k < j < k + 1$, a contradiction. For the second subdiagonal, whose elements are $s_{k,k+2}$, $1 \leq k \leq 6$, there are zeros in the entries s_{35} and s_{57} . Since $s_{56} = s_{67} = 1$ we have $t_{56} = t_{67} = 1 \implies t_{57} = 1$ (theorem 0.5) and thus we add a one in the entry (5,7). In the case $s_{35} = 0$ there is no modification, because $s_{34} = s_{45} = 0$:

$$S_X^{(2)} = [s_{ij}^{(2)}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

For the third subdiagonal, with elements $s_{k,k+3}$, $1 \leq k \leq 5$, we have zeros in the entries $s_{25}^{(2)}$, $s_{36}^{(2)}$, $s_{47}^{(2)}$ and $s_{58}^{(2)}$. For example, since $s_{46}^{(2)} = s_{67}^{(2)} = 1$ then $t_{46} = t_{67} = 1 \implies t_{47} = 1$, and hence we add a one in the entry (4,7). Similarly for the entry (5,8) since $s_{56}^{(2)} = s_{68}^{(2)} = 1$. Entry (2,5) is not changed because there exists no k such that $s_{2k}^{(2)} = s_{k5}^{(2)} = 1$, and for the same reason we do not modify the entry (3,6):

$$S_X^{(3)} = [s_{ij}^{(3)}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Proceeding similarly for the following subdiagonals, we obtain the matrices $S_X^{(4)}$, $S_X^{(5)}$, $S_X^{(6)}$ and $S_X^{(7)}$:

$$S_X^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_X^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_X^{(6)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_X^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Since we reached the last upper subdiagonal, we obtain the topogenous matrix $T_X = S_X^{(7)}$, which coincides with the matrix of example 0.18.

The above procedure can be applied to any finite T_0 space X by using the following algorithm.

Algorithm: TOPOGENOUS MATRIX FROM STONG MATRIX

Input: Stong matrix $S_X = [s_{ij}]_{n \times n}$ associated to the T_0 space X .

Output: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the T_0 space X .

1. **if** $n = 1, 2$ **do** $T = S$, **else**
2. **if** $j \leq i + 1$ or $s_{ij} = 1$ **do** $t_{ij} = s_{ij}$, **else**
3. **for** $j = 3 \dots n$
4. **for** each zero element $s_{i,i+j-1}$ in the j -th upper subdiagonal
5. **if** there exists r such that $s_{ir} = 1 = s_{r,i+j-1}$ **do** $t_{i,i+j-1} = 1$
 else $t_{i,i+j-1} = 0$.
6. **end for**
7. **end for**

Reversing the above process, we obtain an algorithm to find the Stong matrix knowing the topogenous matrix of the space.

Algorithm: STONG MATRIX FROM TOPOGENOUS MATRIX

Input: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the T_0 space X .

Output: Stong matrix $S_X = [s_{ij}]_{n \times n}$ associated to the T_0 space X .

1. **for** $i = 1 \dots n$

2. **for** $j = 1 \dots n$
3. **if** $j \leq i + 1$ or $t_{ij} = 0$ **do** $s_{ij} = t_{ij}$, **else**
4. **if** there exists k , between $i + 1$ and $j - 1$, such that $t_{ik} = 1 = t_{kj}$
 do $s_{ij} = 0$, **else** $s_{ij} = 1$
5. **end for**
6. **end for**

Calculating submodular functions values

The entropy function and \bar{f}

The entropy function r_A defined on an arbitrary FD-relation is studied in (Sarria et al., 2014), in an attempt to apply the information theory in different structures. For each \mathcal{N} FD-relation, there exists an special set A such that $r_A \in \lambda(\mathcal{N})$, which in our particular case of topological FD-relations, allows to find a polymatroid that characterizes the topological properties of the space, as is shown in (Sarria et al., 2014). Here $\lambda(\mathcal{N})$ is the set of submodular and non-decreasing functions such that $\mathcal{N}_f = \mathcal{N}$. We intend in this subsection to propose an algorithm to find the values of such entropy function in any subset.

We know that $E = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_r}\} \subseteq X$ is a closed set if, and only if, it coincides with its closure which means that every adherent point of E is in E . Using the minimal basis $\mathcal{U} = \{U_x\}_{x \in X}$ of the space X , we have the following characterization:

$$E \text{ is a closed set of } X \iff U_x \cap E = \emptyset \text{ for all } x \notin E \quad (4)$$

Bearing in mind that each column k of the topogenous matrix represents the minimal open set U_k , we shall find one by one the adherent points of E , not in E , finding the smallest closed set C which contains it, using the characterization given in (4), by the following procedure: we take $C^{(1)} := E = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_r}\}$; for each x_k such that $k \notin \{i_1, \dots, i_r\}$, we consider the k -th column of the topogenous matrix and check the elements in rows i_1, \dots, i_r in such column; if they are all zero, we take $C = C^{(1)}$, otherwise, there would exist j_1 such that x_{j_1} is an adherent point of E hence we take $C^{(2)} = E \cup \{x_{j_1}\}$. Now, for each x_k such that $k \notin \{i_1, \dots, i_r, j_1\}$, we consider the k -th column of the topogenous matrix and check the elements in rows i_1, \dots, i_r, j_1 in such column; if they are all zero, we take $C = C^{(2)}$, otherwise, there would exist j_2 such that x_{j_2} is an adherent point of E , hence we take $C^{(3)} = E \cup \{x_{j_1}, x_{j_2}\}$.

Proceeding recursively, we continue adding points to obtain a set $C^{(m)} = E \cup \{x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_{m-1}}\}$ such that $C^{(m)} = X$, in which case the set E is dense in X , or $C^{(m)}$ is such that for all $k \notin \{i_1, \dots, i_r, j_1, \dots, j_{m-1}\}$, the k -th column has zeros in entries $i_1, \dots, i_r, j_1, \dots, j_{m-1}$, in which case $C = C^{(m)}$.

Example 0.19. We shall find the closure of $\{x_2, x_4\}$ in the topological space X whose topogenous matrix is the following:

$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Initially, we take $C^{(1)} = \{x_2, x_4\}$. Since the first column has zeros in rows 2 and 4, the element x_1 is not added to $C^{(1)}$; the third column has a one in the second row and so we make $C^{(2)} = \{x_2, x_3, x_4\}$. Every time we add a point, we must look again at those elements that we had discarded in the previous step, in this case x_1 . The first column has zeros in rows 2, 3 and 4, then x_1 is not added to $C^{(2)}$; finally the fifth column has zeros in 2, 3 and 4, so x_5 is not added to $C^{(2)}$, and as we have exhausted all points of space, we conclude that the closure of $\{x_2, x_4\}$ is $C = C^{(2)} = \{x_2, x_3, x_4\}$.

The above comments help find the closure of an arbitrary subset using the following algorithm.

Algorithm: CLOSURE OF A SUBSET $I \subseteq X$

Input: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the space X , a subset $I \subseteq X$.

Output: Closure of I : $c(I) = C$.

1. Define $C = I$ and $r = 1$.
 2. **while** $r = 1$
 3. **for** $x_i \notin C$
 4. **if** $\sum_{x_k \in C} t_{ik} \neq 0$ **do** $C \leftarrow C \cup \{x_i\}$ and go to step 3.
 5. **if** $i = \max \{j : x_j \notin C\}$ **do** $r = 0$.
 6. **end for**
 7. **end while**
-

Remark 0.20. In (Sarría et al., 2014) is proved that the map

$$\begin{aligned} \bar{f} : 2^X &\longrightarrow \mathbb{Z} \\ I &\longrightarrow \bar{f}(I) = |c(I)| \end{aligned}$$

where c is the closure operator associated to the finite topological space (X, \mathcal{T}) , is a polymatroid which satisfies $\bar{f} \in \lambda(\mathcal{N}_{\mathcal{T}})$ hence, in particular, the above algorithm allows to determine the function values of \bar{f} completely.

Now, let $n_K = |c(K)|$ be the cardinal number of the closure of K . In (Sarría et al., 2014) it is shown that if $F_K = 2^n - 2^{n_K}$, the entropy function $r_A : 2^X \rightarrow \mathbb{R}$ satisfies

$$r_A(I) = \ln |A| - \frac{2S_I}{|A|} \ln 2$$

where

$$S_I = \sum_{I \subseteq c(K)} F_K$$

$$M_I = \sum_{I \not\subseteq c(K)} F_K$$

$$|A| = 2(M_I + S_I)$$

We can rewrite S_I and M_I as follows:

$$\begin{aligned} S_I &= \sum_{I \subseteq c(K)} F_K = \sum_{I \subseteq c(K)} (2^n - 2^{n_K}) \\ &= 2^n \sum_{I \subseteq c(K)} [1 - 2^{n_K - n}] =: 2^n S_I^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_I &= \sum_{I \not\subseteq c(K)} F_K = \sum_{I \not\subseteq c(K)} (2^n - 2^{n_K}) \\ &= 2^n \sum_{I \not\subseteq c(K)} [1 - 2^{n_K - n}] =: 2^n M_I^* \end{aligned}$$

so that $|A| = 2^{n+1}(M_I^* + S_I^*)$ and hence

$$\begin{aligned} r_A(I) &= \ln |A| - \frac{2S_I}{|A|} \ln 2 \\ &= \ln(2^{n+1}(M_I^* + S_I^*)) - \frac{2^{n+1}S_I^*}{2^{n+1}(M_I^* + S_I^*)} \ln 2 \\ &= (n+1) \ln 2 + \ln(M_I^* + S_I^*) - \frac{S_I^*}{(M_I^* + S_I^*)} \ln 2 \\ &= \ln(M_I^* + S_I^*) + \left[n + \frac{M_I^*}{M_I^* + S_I^*} \right] \ln 2 \end{aligned}$$

Having the algorithm to find the closure of a subset K , and therefore to calculate the values n_K , S_I^* and M_I^* , we can evaluate the function r_A by the following algorithm.

Algorithm:ENTROPY FUNCTION r_A VALUE IN A SUBSET $I \subseteq X$

Input: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the space X , a subset $I \subseteq X$.

Output: Value $r_A(I)$.

1. Define $M_I^* = S_I^* = 0$.
 2. **for** $K \subseteq X$
 3. Calculate $n_K = |c(K)|$.
 4. **if** $I \subseteq c(K)$ **do** $S_I^* \leftarrow S_I^* + 1 - 2^{n_K - n}$
 else $M_I^* \leftarrow M_I^* + 1 - 2^{n_K - n}$
 5. **end for**
 6. Calculate $r_A(I) = \ln(M_I^* + S_I^*) + \left[n + \frac{M_I^*}{M_I^* + S_I^*} \right] \ln 2$
-

Functions f_U and f_D : matrices U_X and D_X

Let (X, \mathcal{S}) be a finite topological space, \mathcal{U} its minimal basis and \mathcal{D} the minimal basis for X^{op} , the opposite space of X , and consider the non-decreasing submodular function $f_\Delta : 2^X \rightarrow \mathbb{Z}$ defined by

$$f_\Delta(I) := \sum_{J \in \Delta} q_J(I)$$

where $\Delta \subseteq 2^X$ and $q_J : 2^X \rightarrow \{0, 1\}$ is the map which satisfies

$$q_J(I) := \begin{cases} 1, & I \not\subseteq J \\ 0, & I \subseteq J \end{cases}$$

for each $I, J \subseteq X$. In (Abril, 2015) is proved that if B is a subset of X then

$$\begin{aligned} f_U(B) &= |X| - |B^\nabla| \\ f_D(B) &= |X| - |B_\Delta| \end{aligned}$$

where B^∇ and B_Δ denote the sets of upper and lower bounds of B in (X, \leq) , respectively.

These functions f_U and f_D are important to describe the topology of the space, since they characterize the order relation \leq given in (2):

$$x_i \leq x_j \iff f_D(x_i) = f_D(x_i, x_j) \tag{5}$$

$$x_i \leq x_j \iff f_U(x_j) = f_U(x_i, x_j) \tag{6}$$

Definition 0.21. Given a finite topological space X , we define the matrix $U_X = [u_{ij}]$ associated to the function f_U , as the matrix which satisfies $u_{ij} = f_U(x_i, x_j)$. Analogously, we define the matrix $D_X = [d_{ij}]$ associated to the function f_D as the matrix satisfying $d_{ij} = f_D(x_i, x_j)$.

Proposition 0.22. If T_X is the topogenous matrix associated to the finite topological space X , then

$$U_X = n\mathbf{1} - T_X T_X^T$$

$$D_X = n\mathbf{1} - T_X^T T_X$$

where $\mathbf{1} = [a_{ij}]$ is the square matrix of size $n \times n$ such that $a_{ij} = 1$ for all $i, j \in I_n$.

Proof. If $E = \{x_i, x_j\}^\nabla$, we show that $|E| = \sum_{k=1}^n t_{ik}t_{jk}$: in fact, we have the equivalences:

$$\begin{aligned} x_k \in E &\iff x_i \leq x_k \text{ y } x_j \leq x_k \\ &\iff t_{ik} = 1 \text{ y } t_{jk} = 1 \\ &\iff t_{ik}t_{jk} = 1 \end{aligned}$$

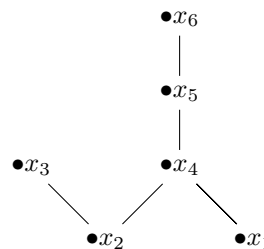
then each $x_k \in E$ provides a one in the sum $\sum_{k=1}^n t_{ik}t_{jk}$, thus having the required equality. Now, if $T_X T_X^T = [c_{ij}]$ then $c_{ij} = \sum_{k=1}^n t_{ik}t_{jk} = |E|$ and hence

$$u_{ij} = f_U(x_i, x_j) = |X| - |E| = n - c_{ij} = [n\mathbf{1} - T_X T_X^T]_{ij}.$$

Let $A = \{x_i, x_j\}_\Delta$. By a similar argument above, we have $|A| = \sum_{k=1}^n t_{ki}t_{kj}$ from which we get

$$d_{ij} = f_D(x_i, x_j) = |X| - |A| = [n\mathbf{1} - T_X^T T_X]_{ij}. \quad \blacksquare$$

Example 0.23. For the next T_0 space



$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

matrices U_X and D_X are:

$$U_X = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 6 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 1 & 5 & 3 & 4 & 5 \\ 6 & 5 & 5 & 6 & 6 & 6 \\ 3 & 3 & 6 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 4 & 6 & 4 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 6 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

$$D_X = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 6 & 5 & 5 & 5 \\ 6 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 6 & 5 & 4 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 3 & 3 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 2 & 2 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Proposition 0.24. *Let X be a finite topological space and $M = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_m}\}$ a subset of X , then*

$$f_{\mathcal{U}}(M) = n - \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m t_{i_k r} \right)$$

$$f_{\mathcal{D}}(M) = n - \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m t_{r i_k} \right)$$

Proof.

$$\begin{aligned} x_r \in M^\nabla &\iff x_{i_k} \leq x_r \text{ for all } k = 1, \dots, m \\ &\iff t_{i_k r} = 1 \text{ for all } k = 1, \dots, m \\ &\iff \prod_{k=1}^m t_{i_k r} = 1 \\ x_r \in M_\Delta &\iff x_r \leq x_{i_k} \text{ for all } k = 1, \dots, m \\ &\iff t_{r i_k} = 1 \text{ for all } k = 1, \dots, m \\ &\iff \prod_{k=1}^m t_{r i_k} = 1 \end{aligned}$$

Therefore

$$|M^\nabla| = \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m t_{i_k r} \right) \text{ and } |M_\Delta| = \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m t_{r i_k} \right).$$

■

Proposition 0.22 allows to obtain the matrices U_X and D_X from the topogenous matrix T_X . Consider now the reverse process of obtaining the topogenous matrix from U_X and from D_X . In our matrix language, (5) and (6) are equivalent to having

$$t_{ij} = 1 \iff u_{jj} = u_{ij} \iff d_{ii} = d_{ij}$$

Therefore, we can reconstruct the topogenous matrix by using the following algorithms:

Algorithm: TOPOGENOUS MATRIX FROM U_X

Input: Matrix $U_X = [u_{ij}]_{n \times n}$ associated to the function $f_{\mathcal{U}}$ of X .

Output: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the space X .

1. **for** $i = 1 \dots n$
 2. **for** $j = 1 \dots n$
 3. **if** $i > j$ **do** $t_{ij} = 0$, **else**
 4. $t_{ij} = \delta(u_{ij} - u_{jj}, 0)$
 5. **end for**
 6. **end for**
-
-

Algorithm: TOPOGENOUS MATRIX FROM D_X

Input: Matrix $D_X = [d_{ij}]_{n \times n}$ associated to the function $f_{\mathcal{D}}$ of X .

Output: Topogenous matrix $T_X = [t_{ij}]_{n \times n}$ associated to the space X .

1. **for** $i = 1 \dots n$
 2. **for** $j = 1 \dots n$
 3. **if** $i > j$ **do** $t_{ij} = 0$, **else**
 4. $t_{ij} = \delta(d_{ij} - d_{ii}, 0)$
 5. **end for**
 6. **end for**
-
-

Remark 0.25. From proposition 0.24 and above algorithms, we see that if $M = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_m}\} \subseteq X$ we have:

$$f_{\mathcal{U}}(M) = n - \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m \delta(f_{\mathcal{U}}(x_r) - f_{\mathcal{U}}(x_{i_k}, x_r), 0) \right)$$

$$f_{\mathcal{D}}(M) = n - \sum_{r=1}^n \left(\prod_{k=1}^m \delta(f_{\mathcal{D}}(x_{i_k}) - f_{\mathcal{D}}(x_{i_k}, x_r), 0) \right)$$

Therefore, functions $f_{\mathcal{U}}$ and $f_{\mathcal{D}}$ can be calculated for any subset M of the space X , from the functions values in the subsets of cardinality one and two through the above explicit formulas.

Conclusions

We have seen how the considered matrices make easier the topological study in finite spaces when we use submodular functions, achieving to eliminate the need to draw Hasse diagrams to find its values as was worked in (Abril, 2015) and (Sarria et al., 2014). In future works, it can be studied complexity of the shown algorithms and try to find other topological concepts which could be characterized from this matrix point of view.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Abril J. A.** (2015). *Una aproximación a la noción de homotopía entre espacios topológicos finitos desde las funciones submodulares* (Trabajo Final de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá, Colombia.
- Alexandroff P.** (1937). Diskrete Räume. *Mat. Sb. (N.S.)***2**, 501-518.
- Cuevas Rozo J. L.** (2016). *Funciones submodulares y matrices en el estudio de los espacios topológicos finitos* (Trabajo Final de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá, Colombia.
- Krishnamurthy V.** (1966). On the number of topologies on a finite set. *Amer. Math. Monthly* **73**, 154-157.
- Sarria, H., Roa L. & Varela R.** (2014). Conexiones entre los espacios topológicos finitos, las fd relaciones y las funciones submodulares. *Boletín de Matemáticas*, **21**(1), 31-50.
- Shiraki, M.** (1968). On finite topological spaces. *Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ.*, **1**, 1-8.
- Stong R. E.** (1966). Finite topological spaces. *Trans. Amer. Math. Soc.*, **123**(2), 325-340.

Un ‘Héroe de la Salud’: Hernando Groot Liévano 1917 - 2016

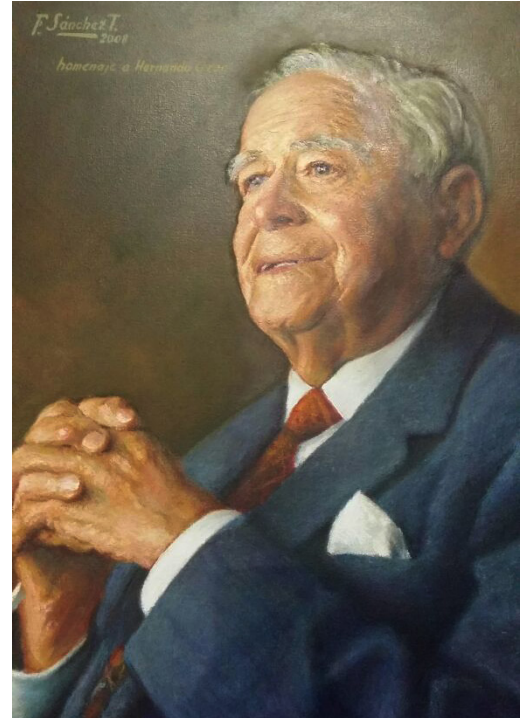
En octubre del año pasado, unos meses antes de cumplir los 100 años, murió en Bogotá el académico Hernando Groot Liévano, después de haber vivido una de las más fructíferas y ejemplares carreras en la historia de la ciencia y la salud colombianas. Pocas de sus distinciones lo definen mejor que la que le hizo la OPS (Organización Panamericana de la Salud) llamándolo ‘Héroe de la Salud’.

Desde niño parecía destinado a convertirse en un sabio. Él mismo contaba que a la edad de siete años, en una temporada de vacaciones en Villeta, se enfermó con un mal que llamaban la “chapetonada”, una fiebre que al decir de la gente le daba a los españoles, no acostumbrados a la inclemencia del trópico. El niño se hizo la pregunta fundamental de por qué se enferma la gente, y esa pregunta lo acompañó toda la vida. Durante ella hizo muchos y grandes esfuerzos para responderla, y no solo para su “chapetonada”, sino para casi todas las enfermedades infecciosas que aquejaban a la gente de esta tierra suya. La incógnita de la “chapetonada” la resolvió unos 24 años después cuando, armado de instrumentos diagnósticos de laboratorio, regresó a Villeta, tomó muestras de sangre a todos los habitantes que habían estado en el pueblo un cuarto de siglo antes y encontró que más del 25% de ellos tenían anticuerpos contra el virus del dengue. Así, tiempo después, llegó a la conclusión de que muy probablemente ese virus había sido el culpable de sus vacaciones frustradas.

Cuando era apenas un joven de 21 años, estudiante de medicina de la Universidad Nacional de Colombia que hacía su internado en el Hospital San Juan de Dios, publicó sus dos primeros artículos científicos: *Frecuencia de los parásitos intestinales en los enfermos del Hospital San Juan de Dios* y *Frecuencia con que se encuentran los huevos infecundados de Ascaris lumbricoides*. No era de los estudiantes que aprenden, diagnostican y curan. Él necesitaba entender algo más: conocer patrones generales, prevalencias y estadísticas. Quería saber cuáles eran los agentes que infectaban y en qué proporción lo hacían, cómo se llevaba a cabo su multiplicación y su diseminación. Desde tan joven ya entendía el enorme valor del conocimiento, el potencial que éste genera para atacar los males de raíz y en las poblaciones numerosas, más que en los individuos.

Se graduó de médico con una tesis que era bioquímica por un lado, porque estudiaba parámetros como la fosfatasa, el calcio y el fósforo inorgánico en plasma de pacientes, pero también era de salud pública porque los pacientes estudiados provenían del leprocomio de Agua de Dios, cuyo laboratorio dirigió después de una breve experiencia estudiantil como técnico del laboratorio clínico del Hospital San Juan de Dios. Fue esa otra característica que también lo acompañó toda la vida: usaba la mejor tecnología de laboratorio que pudiera conseguir para estudiar los problemas más reales que aquejaban a la gente. Fue un médico “anfíbio” que funcionaba muy bien en el laboratorio y en el campo, pero que lo hacía mejor aún cuando tenía los dos.

Sus aportes al conocimiento de la patología del trópico, especialmente la colombiana, fue inmenso y vastísimo. Perteneció a un grupo de brillantes jóvenes pioneros, apasionados y altruistas, que se acercaron a un terreno desconocido en una forma tal vez parecida a la de los grandes exploradores de la historia quienes se internaban en lugares ignotos, seguramente llenos de peligros, con curiosidad y valor. Eran verdaderos descubridores. Aquellos jóvenes publicaron juntos y en diversas combinaciones, estudios sobre patógenos muy diversos: bacterias, virus y parásitos. También sobre la forma como éstos eran transmitidos, sobre todo si era a través de insectos vectores y de circunstancias ambientales. Su nombre se encuentra cruzado con los de otras figuras egregias de nuestra historia científica como César Uribe Piedrahita, Luis Patiño Camargo, Santiago Rengifo Salcedo, Carlos Sanmartín Barberi, Ernesto Osorno Mesa y Augusto Gast Galvis, entre otros.



Academia Nacional de Medicina, Bogotá, Colombia

Empezó estudiando enfermedades generadas por bacterias, como fueron tífus exantemático, afecciones por *Shigella* y *Salmonella*, además de bartonelosis y sífilis. Hizo avances extraordinarios con enfermedades virales. Se le debe mucho de lo que sabemos sobre la epidemiología de la fiebre amarilla y la distribución de sus insectos vectores, tanto urbanos como rurales. Aportó a su control al caracterizar la vacuna y la permanencia en el tiempo de anticuerpos en los vacunados. Estudió brotes y recomendó normas y buenas prácticas para su manejo. Aisló, por primera vez en Colombia, el virus del dengue y estudió la primera epidemia descrita en el mundo de encefalitis equina en humanos. Identificó un nuevo virus, el Guaroa, y mostró como las infecciones que causaba eran asintomáticas.

En parasitología sus aportes fueron muy importantes. Publicó trabajos sobre *Leishmania* y *Plasmodium*, pero seguramente sus investigaciones más significativas fueron con los tripanosomas. Describió el agente que llamó *Trypanosoma ariarii*, el que más tarde fuera reconocido como el mismo (o variante cercana) del *Trypanosoma rangeli*, identificado previamente en Venezuela. Describió su ciclo biológico y el vector que lo transmitía y logró cultivarlo en el laboratorio.

En ese campo un suceso excepcional, casi de novela, muestra otro aspecto de su altruismo apasionado. Él y sus colegas plantearon una hipótesis, a saber, que el *Trypanosoma ariarii* infectaba al humano, pero no causaba enfermedad. Este hecho era de gran importancia médica y podría tener implicaciones para una eventual vacuna para combatir al muy virulento *Trypanosoma cruzi* agente de la enfermedad de Chagas. Decidieron entonces él, Santiago Rengifo Salcedo y Carlos Sanmartín Barberi, inocularse a sí mismos para demostrar esa hipótesis. Su muy afortunada longevidad demostró que también en ello tenía la razón.

Además de hacer ciencia fue su defensor e impulsor y una verdadera autoridad en ética médica; participó en la redacción de la Ley que la regula en el país y fue, por años, miembro y presidente del Tribunal Nacional que la aplica. Asesoró a comités nacionales e internacionales como el Comité de Investigación de Medicina Tropical de la Unión Europea, el Comité Científico Asesor de la OMS (Organización Mundial de la Salud), del Comité Asesor de la OPS y de la Biblioteca Regional de Medicina. Además de haber estado vinculado con su accionar a varios de los afluentes del Instituto Nacional de Salud actual, fue su director y continuó asesorándolo en múltiples actividades científicas muchos años después de su jubilación.

Su actividad académica fue extraordinaria: miembro de la Sociedad de Biología de Bogotá, de la Academia Nacional de Medicina donde fue vicepresidente, presidente y secretario perpetuo, de la Academia de Medicina de Chile, de la Real Academia Española de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la Sociedad Americana de Medicina Tropical e Higiene, de la Sociedad Belga de Medicina Tropical, de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, de la Academia Colombiana de la Lengua y miembro de número y honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

Maestro desde que era estudiante, la educación fue una de sus preocupaciones constantes. Fue profesor en su *Alma Mater*, la Universidad Nacional de Colombia, precursor y profesor de medicina tropical en la Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Javeriana, organizador del primer programa de pre-médica en la Universidad de los Andes, fundador en ella de su primera Facultad de Ciencias (luego Facultad de Artes y Ciencias), donde fuera también su decano y vicerrector.

Recibió honores, quien sabe si suficientes. Los más notables tal vez, además de los cargos honorarios en las academias fueron la medalla Donald Macky otorgada por la *Royal Society of Tropical Medicine* de Inglaterra y la *American Society of Tropical Medicine and Hygiene* de Estados Unidos, y el Premio *Abraham Horowitz* otorgado por la OPS.

Pero, creo que no me equivoco al decir que el logro más grande de Hernando Groot Liévano fue ser él mismo. Lo conocí cuando yo era un joven que recién retornaba al país del doctorado, y él ya era una leyenda nacional y la voz más autorizada en el Instituto Nacional de Salud. Una voz pausada, tranquila y amable. Sus reflexiones eran agudas y rigurosas pero siempre positivas, no señalaba los defectos de un trabajo sino que proponía las mejoras que lo harían útil. Siendo yo un recién llegado, ni siquiera imaginaba que él supiera quien era yo, se me concedió una vez una mención honorífica. Cuando llegué muy temprano al laboratorio, en mi tablero ya había un mensaje de congratulación y apoyo, escrito con tiza y en su letra clara. Él llegaba aún más temprano y sabía todo lo que pasaba en el INS.

Sus charlas eran tan interesantes y apasionantes como una novela, sus intervenciones y preguntas eran siempre relevantes, tocaban el meollo del asunto, con frecuencia le explicaban al público las implicaciones más ocultas de lo que acababa de exponer otro académico. Hasta la última reunión a la que asistió, poco antes de morir, dio lecciones de sensatez, inteligencia, amabilidad y positivismo. La OPS lo nombró “Héroe de la Salud” pero su heroísmo, en verdad, se extendió a la ciencia en general y a la educación de los otros, amplia e integral, en la cual se empeñó aún imperceptiblemente, hasta el final de los días.

Moisés Wasserman, Ph.D.

Académico de número

Expresidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

José Ignacio Martínez Rodríguez 1956-2016



El clima de los últimos 2.7 millones de años es bastante inusual en la historia geológica de nuestro planeta, ya que combina cuatro atributos climáticos que rara vez se dan en conjunto. Estos son: un alto gradiente de temperatura latitudinal, hielo permanente en el Ártico, niveles de CO₂ por debajo de 200 ppm, y un alto gradiente de temperatura meridional a lo largo del océano Pacífico tropical. Es en este último punto, que José Ignacio Martínez hizo aportes muy importantes a la ciencia. José Ignacio realizó múltiples investigaciones sobre la piscina caliente en el Pacífico occidental durante el Pleistoceno, en especial del Mar de Tasmania, y señaló cómo ésta se relacionaba con el gradiente longitudinal de temperatura a lo ancho del Ecuador, desde el Pacífico Oriental hasta el Occidental. José Ignacio también hizo aportes importantes para entender como este gradiente variaba durante los periodos glaciales/interglaciales. Estos estudios los complementó con una serie de investigaciones en el Pacífico ecuatorial occidental al estudiar la cuenca de Panamá y el margen del Pacífico Colombiano, donde encontró que durante periodos glaciales la corriente de chorro superficial del Chocó, uno de los principales componentes del clima de Colombia, se intensificaba, transportando grandes cantidades de aire húmedo del Pacífico ecuatorial hacia la Cordillera Central,

posibilitando así el rápido desarrollo de los glaciares Andinos. Los resultados de su vida como investigador son ahora utilizados para entender y predecir el clima tropical, y en especial el colombiano, durante el cambio climático que nuestro planeta experimenta en la actualidad.

José Ignacio empleaba los foraminíferos, pequeños organismos que viven en los océanos, como herramienta principal en su investigación. Era uno de los líderes en este campo en toda Latinoamérica. Esa experticia en foraminíferos, también hizo que parte de su investigación se enfocara en el uso de estos microorganismos como herramientas bioestratigráficas y paleoecológicas a diversas escalas de tiempo, desde el Cretácico superior del Oriente colombiano, hasta modelos bioestratigráficos para el Cenozoico del Caribe Colombiano, investigaciones que son y seguirán siendo consultadas por geólogos durante muchas décadas. Durante los últimos años, José Ignacio estudió además el cambio climático del Holoceno tardío a través de las terrazas sedimentarias del río Cauca.

José Ignacio Martínez nació en Bogotá el 15 de mayo de 1956. Sus padres fueron Don José Martínez y Doña Narcisca Rodríguez. Lo sobreviven su esposa Ingrid Escobar y sus hijos Luisa y Daniel. En la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá recibió el título de geólogo en 1982. Posteriormente se vinculó a Ingeominas. Luego fue becado por el gobierno británico para adelantar estudios de maestría en micropaleontología en *Hull University*, la cual finalizó en 1987. Al terminar este programa universitario regresó a Colombia para continuar trabajando en Ingeominas y como consultor micropaleontólogo para la industria del petróleo. En 1990 fue becado por el gobierno australiano, donde realizó estudios de doctorado en la *Australian National University*, hasta el año 1994. A su regreso a Colombia se vinculó con el Instituto Colombiano del Petróleo por dos años. Sin embargo, su amor y dedicación por la investigación del Pleistoceno/Holoceno lo motivó a aceptar un postdoctorado ofrecido por la *Australian National University* para regresar nuevamente a Colombia en 1998 y vincularse como profesor del Departamento de Geología de la Universidad EAFIT (Medellín), posición que conservó durante los últimos 18 años.

Participó en numerosos cruceros oceanográficos, incluyendo el ODP 134 en Vanuatu, FR2 y FR10 en el océano Índico, Nemo-3 y Amadeus en el Pacífico ecuatorial oriental, y Knoee 176 en la cuenca de Panamá. José Ignacio fue miembro del consejo editorial de la revista *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, del comité científico de PAGES (Past Global Changes - IGBP), miembro correspondiente de la Academia Colombiana de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y editor asociado de la Revista de la Academia.

José Ignacio recibió también menciones como mejor profesor de la carrera de Geología en EAFIT, el premio anual de investigación de la Universidad EAFIT y una mención de Honor en Ciencias Naturales de la Fundación Alejandro Ángel Escobar. Su producción intelectual quedó registrada en más de sesenta artículos científicos en revistas internacionales y nacionales, lo que lo acredita como uno de los científicos colombianos más productivos y de mayor reconocimiento internacional en la historia de la Geología Colombiana.

Muchos de sus estudiantes disfrutaron al reconocer la belleza y los misterios del mundo natural a través de la ciencia. Su respeto y su trato siempre amable, su paciencia, alegría, calma y seguridad para actuar, su pasión por la ciencia, franqueza para expresar sus ideas de una manera siempre respetuosa, con rigurosidad científica, además de su conocimiento amplio y profundo contribuyó a que todos los que trabajamos con él llegáramos a ser mejores personas. José Ignacio enseñaba con el ejemplo de su diario vivir.

Extrañaremos mucho su fino humor, ácido y oportuno. Ese uso inteligente de palabras para contar chistes y hacernos reír. También extrañaremos su oficina siempre abierta para debatir no solo sobre ciencia sino para ofrecer sus consejos sobre muchas cosas más. Hoy le damos una despedida, demasiado temprana, a nuestro mentor, maestro, colega y amigo. Siempre lo recordaremos.

Carlos Jaramillo

Académico correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Jaime Escobar

Universidad del Norte, Barranquilla

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias físicas (física, físico-química, materiales); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias del comportamiento o ciencias humanas (filosofía, sicología, antropología, sociología); ciencias biomédicas, químicas y matemáticas, está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, 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.

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, al acceso y a la difusión de la producción científica.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 40 volúmenes.

Criterios para publicar

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan como propiedad permanente de la Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo internet (Ver transferencia de derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por “Internacional Code of Botanical Nomenclature”

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deben enviarse a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
3. Título corto
4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.

6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
9. Figuras en formato jpg o tiff.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio, indicando además la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y la metodología empleada en el estudio.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en la literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada. En cuyo caso la sección se denominará Resultados y Discusión.

Conclusiones: Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Citación: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al.*", desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es "responder a las causas de los eventos físicos o sociales" (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

Parafraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de "*et al.*" (sin cursiva y con punto después del "al.>").

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de "*et al.*". En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice "*et al.*"

Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

Libros

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Revista seriada

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

Artículo de revista electrónica

Ejemplo:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Artículo de periódico impreso:

Ejemplo:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Tesis

Ejemplo:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresos y simposios

Ejemplo:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Trabajos inéditos o publicaciones informales

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: <http://..>

Materiales legales

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible

número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tablas y figuras

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben en hoja separada. Si se trata de micro fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías de lo contrario se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos

Podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado a la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoya económicamente.

Proceso de revisión por pares

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a una tercera evaluación.

En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha y el número del volumen en que será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificaciones de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de interés que pueda de alguna manera

influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, etc.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, etc.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito a la revista de ACCEFYN.

b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.

c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo y/o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.

d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

Criteria for publication

Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

1. The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality in an area related to the Exact, Physical or Natural Sciences. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the authors' rights have not been previously granted to a third party. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsibility of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
4. In accordance with the ICMJE (www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name , first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies.

The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusion: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

Bibliography: these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

Direct or textual quotation

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is “to respond to the causes of the physical or social events” (Hernández, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

Paraphrase or summary

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today’s construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they are cited and afterwards include the surname of the first author followed by “et al.” (not in italics and with a period after the “al.”).

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by “et al.” In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use “ et al.”

Bibliographical list

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

Books

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Article from periodical journal

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del Perú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 38(147):218-22.

On line periodical article

Example:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Newspaper article

Example:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Thesis

Example:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresses and symposia

Example:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Unpublished manuscript or informal publications

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de <http://...>

Legal documents

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tables and graphics

The tables and frames are called tables and carry an arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column headings.

If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments

These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

The peer-review process

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles

will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become property of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

Publication of the manuscript

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

Conflicts of interest

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc).

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), except in the following cases:

a) The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations and distribution to some colleagues of reprints of their

own published work, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista of ACCEFYN.

b) If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.

d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.