

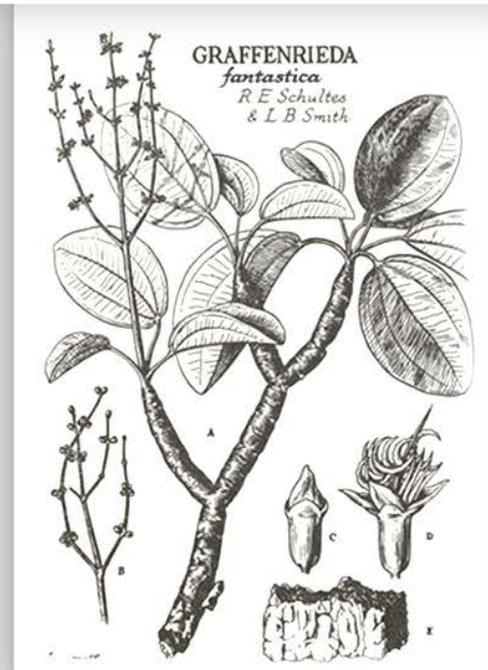


ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 163 • Págs. 127-260 • Abril-Junio de 2018 • Bogotá - Colombia





ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 163 • Págs. 127-260 • Abril - Junio de 2018 • Bogotá - Colombia

## Comité editorial

### Editora

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

### Editores asociados

#### Ciencias Biomédicas

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

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

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

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

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

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

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

#### Ciencias del Comportamiento

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

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

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

#### Ciencias Físicas

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

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

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

María Elena Gómez, Doctor  
Universidad del Valle, Cali

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

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

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

Hernando Ariza Calderón, Doctor  
Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

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

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

### **Ciencias Naturales**

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

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

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

Carlos Daniel Cadena Ordoñez, 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

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

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

### **Ciencias Químicas**

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

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

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

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

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

Ligia Sierra, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Luz Marina Jaramillo, Ph. D.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Edgar Páez, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

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

### **Ciencias de la tierra**

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

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

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

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

### **Matemáticas**

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

Luis Español González, Doctor  
Universidad de la Rioja, España

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

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

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

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

---

## **Comité científico internacional**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

---

**Asistencia y coordinación editorial**  
Carolina Acosta

**Corrección de estilo y ortografía**  
Marta Renza

**Diseño y diagramación**  
Johanna Morales

## Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana  
Agris  
Dialnet  
EBSCO  
Historia Mathematica

Index Kewensis  
Latindex  
Mathematical Reviews  
MathSciNet (on line data base)  
OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA  
Publindex, Colciencias  
SciELO, Colombia  
Zentralblatt für Mathematik  
Zoological Record

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

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

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

La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser repro-ducido, 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



1	2	3
4		5
6	7	8

### Portada

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

**1. Richard Evans Schultes.** La riqueza de la flora colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1951, 9 (30): 230-242. El yoco, liana de alto contenido de cafeína y empleado por siglos como estimulante muscular entre los indios del Putumayo, identificado botánicamente como especie nueva hace apenas ocho años. Dibujado por el señor G.W. Dillon y publicado con el permiso del Museo Botánico de la Universidad de Harvard

**2. José Cuatrecasas Arumi.** Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1958, 10 (40): 221-264. IV Raíz geotrópico positiva, inclinada, (normal) de *Euterpe cuatrecasana* (naidí) mostrando el crecimiento de ramas geotrópico negativas (ascendentes), las raíces terrífugas en bujía, también llamadas neumatóforos (Foto Cuatrecasas C2205).

**3. Richard Evans Schultes.** La riqueza de la flora colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1951, 9 (30): 230-242. Dibujo de una de las muchas especies nuevas recientemente descubiertas en la curiosa y antigua vegetación de los cerritos areniscos aislados en el Vaupés, vestigios de un macizo cretácico que se extendió de Colombia hasta Venezuela y las Guayanas. Dibujado por el señor E. W. Smith y publicado con el permiso del Museo Botánico de la Universidad de Harvard

**José Cuatrecasas Arumi.** Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1958, 10 (40): 221-264. **4.** XXXIV-2- Valle del Cauca.

*Nymphaea goudotiana*, flor de *Limnanthemum humboldtianum*, *Trapa natans*, *Cabomba aquatica*, *Eleocharis interstineta* (Foto Cuatrecasas C-2375). **5.** XV- Cordillera Central, Laguna del Ruiz, páramo 3.700 m. alt. Formación de caulirrosulettum de *Espeletia hartwegiana* con graminetumm de *Calamagrostis coarctata* (Foto Cuatrecasas I-247). **6.** X- *Syagrus sancona* (HBK) Kartsen, entre Cartago y La Virginia, ±1.200 m. alt. (Foto Cuatrecasas I-1816). **7.** Selva neotropical del rio Putumayo con el cono de fúlcreos típico de *Socratea elegans*. Pimpollo de *Gustavia* sp. con un penacho de grandes hojas. Un indio Kofán (Foto Cuatrecasas I-581). **8.** XVII. Cordillera Oriental, macizo de Bogotá, páramo 3.250 m. alt.; formación de *Puya goudotiana*, grandes haces de *Cortaderia nitida*, matas de *Aragoa cupresina* al fondo rosetones de *Espeletia grandiflora*, etc. (Foto Cuatrecasas I-129)

**Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

Cra. 28 A no. 39A - 63 Bogotá D.C., Colombia, CP 111311 • **PBX:** +57(1)555-0470

**Sitio web:** [www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co) • **Correo electrónico:** [revista@accefyn.org.co](mailto:revista@accefyn.org.co)



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 163 • Págs. 127-260 • Abril - Junio de 2018 • Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

### Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

- La fitoterapia como fuente de medicamentos reguladores del metabolismo tumoral y activadores de la respuesta inmunitaria** **AP**  
Phytotherapy as a source of medicaments that regulate tumoral metabolism and activate the immune response  
*Susana Fiorentino, Claudia Urueña* ..... 132

### Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences

- Sonidos del comer: propuestas para el estudio intermodal entre el sabor y la música** **E**  
Sounds of eating: proposals for the crossmodal study between flavour and music  
*Eugenia Razumiejczyk, Guillermo Macbeth, Gisela Hurtado, Carolina Pereyra Girardi, Fernando Marmolejo-Ramos* ..... 145

### Ciencias Físicas Physical Sciences

- Propiedades ópticas y de transporte de sistemas electrónicos cuasi-unidimensionales** **AP**  
Optical and transport properties of cuasi-one dimensional electronic systems  
*Ferney Javier Rodríguez Dueñas* ..... 150

- Evolution of the structural ordering of the  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  perovskite as a function of temperature** **OA**  
Evolución del ordenamiento estructural de la perovskita  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  en función de la temperatura  
*Yury Parada, Carlos Parra, Fania Caicedo, David A. Landínez Téllez, Jairo Roa-Rojas* ..... 162

- Un problema de osciladores acoplados analizado mediante la notación bra-ket empleada en mecánica cuántica** **AO**  
Analysis of a problem of coupled oscillators making use of the bra-ket notation used in quantum mechanics  
*Mauricio Rozo Clavijo* ..... 166

- XV Encuentro Nacional de Óptica – VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones**  
XV National Meeting on Optics – VI Andean and Caribbean Conference on Optics and its Applications  
*Jaime Enrique Meneses Fonseca* ..... 172

- Análisis multiespectral y digital de los nevos melanocíticos adquiridos** **AO**  
Multiespectral and digital analysis of acquired melanocytic nevi  
*Ariana C. Di Lorenzo V., Reimer A. Romero H., Aarón Muñoz T., Sandra C. Vivas, Irene Paredes* ..... 173

**Ciencias  
Físicas**

Physical Sciences

- Specklegramas de fibra óptica analizados mediante procesamiento digital de imágenes** **AO**  
Fiber specklegram sensor analysis by digital image processing  
*Luis C. Gutiérrez, Luis F. Castaño, Jorge A. Gómez, Jairo C. Quijano,  
Jorge A. Herrera-Ramírez, Alejandro Hoyos, Luiz C. Da Silva Nunez,  
Francisco J. Vélez, Victor H. Aristizabal* ..... 182

- Características del efecto Lau empleando redes de fase y de volumen fotorrefractivas** **AO**  
Features of the Lau effect by using a photorefractive volume phase grating  
*Gustavo Forte, Myrian Tebaldi, Nestor Bolognini* ..... 189

- Seguimiento de una reacción fotocatalítica modelo expuesta a la propagación de la superposición de dos vórtices ópticos con momento angular orbital entero definido y opuesto, por medio de espectroscopía UV-VIS** **AO**  
Monitoring of a photocatalytic reaction pattern exposed to the propagation of the superposition of two optical vortices with defined and opposite orbital angular momentum, by UV-VIS spectroscopy  
*Carlos Fernando Díaz Meza, Diego Fernando Motta Nieto, Yezid Torres Moreno,  
Fernando Martínez Ortega* ..... 194

- Completing the puzzle: Another species of *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) from Colombia** **OA**  
Se completa el rompecabezas: otra especie de *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) de Colombia  
*Andrés F. García, Daniela Ahumada-C.* ..... 200

- Propagación sexual y tolerancia a la desecación del agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) de tres fuentes semilleras localizadas en Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) y Gachetá (Cundinamarca)** **AO**  
Sexual propagation and desiccation tolerance of agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) of three seed sources located in Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) and Gachetá (Cundinamarca)  
*Carlos Iván Suárez-Ballesteros, Manuela Calderón-Hernández,  
Carolina Mancipe-Murillo* ..... 207

- Efecto de la cobertura vegetal de ribera en las comunidades ícticas en el bosque húmedo premontano y muy húmedo premontano del Alto Magdalena, Colombia** **AO**  
Effect of the riparian vegetation cover on fish communities in the humid premontane and very humid premontane forest in the Upper Magdalena, Colombia  
*José Luis Poveda Cuellar, Edwin Orlando López-Delgado, Francisco A. Villa-Navarro* ..... 216

- Estructura y composición de ensamblajes de anfibios en tres tipos de hábitat en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, Cordillera Central de Colombia** **AO**  
Structure and composition of amphibian assemblages in three types of habitat in the National Natural Park *Selva de Florencia*, Colombian Central Cordillera  
*Sebastián Duarte-Marín, Cristian González-Acosta, Fernando Vargas-Salinas* ..... 227

Vida de la Academia ..... 237

Comentarios bibliográficos ..... 246

**Enfoque y alcance**  
Focus and Scope ..... 249

# La fitoterapia como fuente de medicamentos reguladores del metabolismo tumoral y activadores de la respuesta inmunitaria

Susana Fiorentino<sup>1,\*</sup>, Claudia Urueña<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Inmunobiología y Biología Celular, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 1 de junio de 2017

## Resumen

El término cáncer integra un grupo de enfermedades complejas que responden a múltiples factores y se manifiestan de forma diferente según el órgano afectado o el mecanismo molecular implicado. En términos generales, se presenta una alteración en los mecanismos que regulan el crecimiento de las células, lo cual genera proliferaciones incontroladas que rompen la homeostasis normal del organismo y afectando no solo el órgano blanco sino a todo el organismo. La búsqueda de terapias contra el cáncer se basa en el conocimiento de estos mecanismos moleculares y sus innumerables consecuencias. En esta revisión se recogen los estudios realizados y publicados por nuestro grupo de investigación en los últimos 13 años en torno a *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze y *Petiveria alliacea* Linne (Phytolaccaceae), así como algunos datos aún no publicados. La revisión se centra en los mecanismos relacionados con el metabolismo energético tumoral y la regulación de la respuesta inmunitaria, así como en los últimos procedimientos requeridos para llevar a cabo el primer ensayo clínico de fase I para un medicamento contra el cáncer en Colombia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Cáncer; Fitomedicamentos; Metabolismo tumoral; Respuesta inmune antitumoral; Anamú; Dividivi.

**Phytotherapy as a source of medicaments that regulate tumoral metabolism and activate the immune response**

## Abstract

Cancer is the name for a group of complex and multifactorial diseases that manifest differently depending on the organ affected or the molecular mechanism involved. In general terms, there is an alteration in the mechanisms that regulate cell growth, generating their uncontrolled proliferation, which breaks the normal homeostasis of the organism, affecting not only the target organ, but the individual in general. The search for therapies against cancer is based on the knowledge of these molecular mechanisms and their countless consequences. In the present review, we include the work done and published in our research group during the past 13 years on *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze and *Petiveria alliacea* Linne (Phytolaccaceae), as well as some data not yet published. The review focuses on the mechanisms related to tumor energy metabolism and the regulation of the immune response, as well as the latest procedures that will allow us to conduct the first phase I clinical trial for a cancer drug in Colombia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Cancer; Phytomedicaments; tumor metabolism, antitumor immune response; Anamu; Dividivi.

## El metabolismo de las células tumorales

Una de las características de las células tumorales es su alta tasa de proliferación, la cual induce un aumento en el consumo de glucosa y glutamina, entre otras fuentes de energía, necesario en la producción del carbono requerido para la construcción de nuevas macromoléculas. Además, mediante la oxidación se generan otros factores como el dinucleótido de nicotinamida y adenina (NADH) o el dinucleótido de flavina y adenina (FADH<sub>2</sub>), los cuales median la transferencia de electrones a la cadena respiratoria para permitir la síntesis del trifosfato de adenosina (ATP), indispensable para la supervivencia energética de la célula.

El alto consumo de glucosa de las células tumorales fue registrado inicialmente por **Otto Warburg** (1956), trabajo que le mereció el Premio Nobel de Medicina en 1931 y cuyos resultados aportaron considerablemente al estudio del cáncer y la búsqueda de nuevas terapias (**Koppenol, et al.**, 2011). Estos hallazgos sirvieron de base para el desarrollo de la tomografía de emisión de positrones (TEP), la cual se basa en el consumo de la <sup>18</sup>F-fluodeoxiglucosa (<sup>18</sup>F-FDG),

### \*Correspondencia:

Susana Fiorentino; [Susana.florentino@javeriana.edu.co](mailto:Susana.florentino@javeriana.edu.co)

Recibido: 20 de octubre de 2017

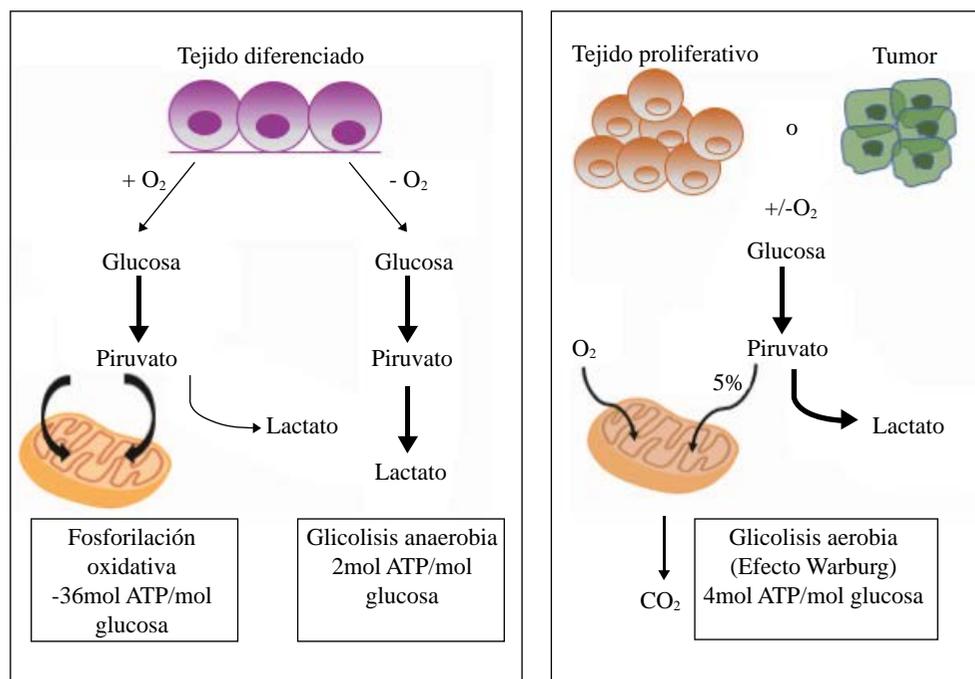
Aceptado: 3 de abril 2018

Editor: Luis Fernando García

ampliamente utilizada para el diagnóstico y seguimiento de un gran número de tumores de metabolismo glucolítico (Almuhaideb, *et al.*, 2011). La glutamina, por su parte, provee el nitrógeno necesario para la síntesis de nucleótidos de pirimidinas y purinas, de la glucosamina-6-fosfato y de los aminoácidos no esenciales. Su alto consumo en las células tumorales se ha documentado ampliamente y, más recientemente, se ha sugerido el uso de la  $^{18}\text{F}$ -glutamina como trazador del crecimiento tumoral cuando la glucosa no constituye un buen marcador (Lieberman, *et al.*, 2011; Venneti, *et al.*, 2015).

El papel de la glucosa como una de las principales fuentes de energía de las células tumorales, se ha relacionado con la poca capacidad mitocondrial observada en algunos tumores; sin embargo, algunos datos recientes muestran que la mitocondria de las células tumorales funciona muy bien y que, de hecho, las razones para que una célula tumoral consuma más glucosa se relacionan más con la capacidad de la glucólisis de participar en la generación de metabolitos intermediarios de múltiples procesos biosintéticos con la generación de ATP. Es así que el desacoplamiento de la glucólisis de la cadena respiratoria no parece tener un efecto importante en la célula tumoral, la cual favorece la producción de lactato a partir del piruvato mediante procesos de adaptación metabólica, lo que disminuye la entrada del piruvato al ciclo del ácido tricarbóxico (Pavlova & Thompson, 2016) y, por ende, protege de la sobrecarga energética. En la Figura 1 se presentan las diferencias entre el metabolismo energético de las células tumorales y las normales.

Aunque los tumores han desarrollado un sinnúmero de desviaciones metabólicas para protegerse del exceso de electrones generados por este metabolismo acelerado, que muchas veces exceden la capacidad de la ATP sintasa, es inevitable la formación de una gran cantidad de especies reactivas del oxígeno (ERO) en el microambiente tumoral. De hecho, estas especies intracelulares provienen de la mitocondria y del retículo endoplásmico, así como de la activación de las NAD(P)H oxidasas (Cairns, *et al.*, 2011), y cuando aumentan, particularmente el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), dañan la estructura de las macromoléculas celulares, fenómeno que se denomina estrés oxidativo (Sullivan & Chandel, 2014). En las células tumorales, este estrés oxidativo es controlado por la alta producción de enzimas antioxidantes mediante un mecanismo principal que conlleva la activación del factor nuclear (derivado de eritroide 2) similar al 2 (*Nuclear erythroid 2-related factor*, NRF2), el cual participa en la regulación de la expresión de múltiples genes antioxidantes (Sullivan & Chandel, 2014). Muchos de los tumores tienen mutaciones en este factor y, en consecuencia, presentan una marcada expresión constitutiva de muchas de las enzimas detoxificantes, lo que hace que, en términos generales, el nivel de ROS tumoral este elevado dado que ellas pueden tolerar una carga de ERO superior a la de las células normales. Este exceso de ERO, puede conllevar algunas veces al fenómeno denominado senescencia inducida por oncogenes (SIO) (Courtois-Cox, Jones, Cichowski, 2008), el cual está relacionado con la expresión de una mutación de *BRAS* o *RAF* que inhibe la proliferación tumoral en presencia de las ERO. La



**Figura 1.** Representación esquemática del metabolismo en un tejido diferenciado (células normales) en comparación con un tejido proliferativo o tumoral. Modificado de JF Hernández. Tesis de Doctorado.

disminución de dicha senescencia puede potenciar la génesis de los tumores (Kaplon, *et al.*, 2013), así como el uso de algunos antioxidantes, lo cual se discutirá más adelante. Es decir que no siempre la disminución de las ERO tumorales tiene un efecto benéfico, lo cual sugiere que se da un delicado equilibrio que debe mantenerse al interior del tejido tumoral. Las ERO, entonces, tienen un papel dual en la génesis tumoral, ya que su sobreproducción es deletérea para la célula eucariótica y, en contraste, cuando su concentración es baja resultan necesarias para mantener dicha génesis (Sullivan & Chandel, 2014).

Teniendo en cuenta estos antecedentes metabólicos, puede decirse que la diversidad tumoral se explica por la proliferación incontrolable de poblaciones de células, en principio glucolíticas, conjuntamente con poblaciones quiescentes, las cuales son menos glucolíticas y utilizan mucho más la fosforilación oxidativa. Entre éstas están, además, las células madre tumorales (CMT) que, por su propia naturaleza, expresan bombas de resistencia a drogas y otros mecanismos detoxificantes, lo cual les permite vivir en ambientes hostiles y con bajas concentraciones de oxígeno. Esta población es la responsable principal de las metástasis y de la resistencia tumoral a la quimioterapia (Dave, *et al.*, 2012; Margaryan, *et al.*, 2017). El conocimiento de su relación con el microambiente tumoral abre la posibilidad de estudiar terapias que regulen tales interacciones (Plaks, *et al.*, 2015), así como la resistencia a drogas, entre ellas, los medicamentos naturales (Cort & Ozben, 2015).

### El metabolismo tumoral y su relación con la respuesta inmunitaria

El metabolismo tumoral oscila entre la glucólisis y la fosforilación y puede afectar seriamente el microambiente tumoral. El alto consumo de glucosa y glutamina genera una acumulación de lactato extracelular, el cual produce, a su vez, un ambiente ácido e inmunosupresor que atenúa la activación de las células dendríticas, los linfocitos T y las células asesinas naturales (*natural killer*, NK), y favorece la generación de células supresoras de tipo mieloide o linfocitoide (Colegio, *et al.*, 2014; Fischer, *et al.*, 2007; Goetze, *et al.*, 2011; Husain, *et al.*, 2013). Por otra parte, el aumento de lactato incrementa la angiogénesis y estimula la producción de ácido hialurónico por parte de los fibroblastos, lo que favorece el crecimiento y la invasión tumoral (Pavlova & Thompson, 2016). Estos hallazgos ponen en evidencia el hecho de que el control del metabolismo tumoral podría tener un efecto benéfico no solo en la evolución misma del tumor sino en la generación de una efectiva respuesta inmunitaria antitumoral.

Por otra parte, la inflamación está implicada en el proceso de génesis tumoral, así como en la evolución del cáncer. Se cree que aproximadamente el 20 % de los cánceres está precedido de procesos inflamatorios crónicos; tal es el caso del carcinoma hepatocelular precedido por la hepatitis, el cáncer de colon por la enfermedad inflamatoria

del intestino y el cáncer gástrico por la infección con *Helicobacter pylori*. Sin embargo, la inflamación no solo se presenta como antecesora del cáncer, sino también como una consecuencia del crecimiento mismo del tumor, proceso que produce factores reguladores, recluta células de la respuesta inmunitaria y favorece la producción de citocinas proinflamatorias alterando, así, el microambiente tumoral, lo cual promueve el crecimiento y la metástasis de los tumores (Francescone, *et al.*, 2014). Estos hechos llevan a pensar que el control de la inflamación intratumoral es, sin duda, uno de los mecanismos que favorece la regresión tumoral y permite la activación de una respuesta inmunitaria efectiva.

### Los productos naturales como alternativa terapéutica contra el cáncer

Las plantas son una fuente inagotable de productos naturales con actividad biológica útil para la humanidad debido a su gran diversidad de especies y metabolitos, así como a su potencial para sintetizar un sinnúmero de moléculas complejas difíciles de reproducir en el laboratorio (Mondal, *et al.*, 2012). Del casi millón de productos naturales, aproximadamente el 25 % es biológicamente activo; de ellos, cerca del 60 % proviene de plantas (Newman & Cragg, 2016). Las plantas son útiles no solo por la posibilidad de encontrar en ellas metabolitos activos que puedan utilizarse en forma aislada, sino también como fuente de nuevas medicinas (denominadas actualmente como drogas botánicas) (Gertsch, 2011; Schmidt, *et al.*, 2007).

Las drogas botánicas son mezclas de metabolitos obtenidos a partir de una o varias plantas con actividad biológica establecida que, además, se han caracterizado químicamente, con el fin de conocer los metabolitos presentes en la mezcla (Zhu, *et al.*, 2014). Con las nuevas tecnologías, el desarrollo de la medicina herbal se ha modernizado enormemente, y hoy se lleva a cabo un trabajo riguroso que conjuga la caracterización química y la evaluación biológica de las mezclas, con el fin de obtener mezclas estandarizadas y valoradas biológicamente (Tilton, *et al.*, 2010). Son diversos los estudios en los que se reporta el desarrollo de drogas botánicas para diferentes enfermedades, entre ellas, la enfermedad inflamatoria del intestino (Algieri, *et al.*, 2015), y la activación de la respuesta inmunitaria antiviral (Wang, *et al.*, 2013), así como ayuda en el tratamiento del paciente con cáncer (Diwanay, *et al.*, 2004). La *Federal Drug Administration* (FDA) de los Estados Unidos ha aprobado ya algunas drogas botánicas (Lei, *et al.*, 2014), aunque son muy pocas teniendo en cuenta el inmenso potencial de la biodiversidad en la producción de nuevos medicamentos.

Las drogas botánicas presentan ventajas frente a las moléculas aisladas, pues actúan en diferentes blancos moleculares, lo cual es importante para combatir la mayoría de las enfermedades cuya naturaleza responde a múltiples factores. La fitoterapia con drogas botánicas se basa en la acción combinada de una mezcla de constituyentes y exhibe efectos farmacológicos producto de la interacción sinérgica

o antagonista de muchos de los fitoquímicos presentes en la mezcla. Las razones de estas interacciones desde el punto de vista mecánico son la biodisponibilidad, la interferencia con procesos de transporte celular, la activación de profármaco o la desactivación de compuestos activos y su conversión en metabolitos inactivos, la acción de patrones sinérgicos en diferentes puntos de la misma cascada de señalización o la inhibición de la unión a diferentes proteínas blanco, entre otras. Las tecnologías “ómicas” y la biología de sistemas podrían facilitar el estudio de esta multiplicidad de efectos en las mezclas herbales (Efferth & Koch, 2011).

### **Anamú y dividivi, dos plantas colombianas con enormes potenciales antitumorales**

La búsqueda de plantas con actividad antitumoral llevada a cabo en nuestro grupo de investigación en los últimos 14 años se basa en el conocimiento tradicional y la esperanza de que los avances que se logren beneficien a la comunidad. El anamú (*Petiveria alliacea* Linne Phytolaccaceae) se encuentra ampliamente distribuido en la zona andina del país, entre los 700 y los 1.500 msnm. El dividivi (*Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze), por su parte, esta principalmente presente en Boyacá, en la zona del alto Ricaurte, entre los 1.600 y 2.900 msnm. El conocimiento etnofarmacológico de estas plantas no hace parte de esta revisión, sin embargo, vale la pena resaltar que es a través de él que se ha podido inferir que la marcada actividad antioxidante del dividivi puede participar en la regulación de la producción de las ERO dentro y fuera del tumor, lo cual le conferiría un gran potencial antitumoral. Por otra parte, la actividad hipoglucémica del anamú permite pensar que la actividad antitumoral clásicamente atribuida a esta planta se debe a su capacidad de regular la disponibilidad de la glucosa en las células tumorales.

En este contexto, la hipótesis de trabajo de nuestro grupo de investigación en la búsqueda de la actividad antitumoral de estas plantas, se ha basado en el supuesto que los extractos complejos de plantas actuarían directamente sobre la célula tumoral regulando, entre otros, el metabolismo energético para reducir el crecimiento tumoral e, incluso, inducir la muerte de las células, lo que, en consecuencia, activaría la respuesta inmunitaria adaptativa actuando como una vacuna *in situ*. Esta multiplicidad de funciones de la fitoterapia podría explicar los beneficios observados a lo largo de los años y abriría nuevos interrogantes acerca de la complejidad de las enfermedades crónicas como el cáncer. Esta hipótesis se ha demostrado parcialmente, y en estos próximos años esperamos confirmar nuestros hallazgos y aplicar los resultados al desarrollo de fitomedicamentos efectivos para el tratamiento del cáncer.

### **Anamú (*Petiveria alliacea*) como modulador del metabolismo energético de las células tumorales**

El anamú, *Petiveria alliacea* Linne (Phytolaccaceae), es una hierba perenne, ampliamente utilizada por la medicina tradicional en el Caribe, y en Centroamérica y Suramérica. La

infusión de las hojas o de las raíces se conoce por su actividad antiespasmódica, antireumática y antiinflamatoria sistémica, así como antiinflamatorio bucal, como analgésico, y contra la cistitis, el dolor de cabeza, la polineuralgia (beriberi) y como diurético, entre otras; Luz, *et al.*, 2016). Más específicamente, la infusión acuosa se ha utilizado en el tratamiento de la leucemia y el cáncer de seno (García-Barriga, 1974). En cuanto a su actividad sobre el metabolismo, el conocimiento tradicional le atribuye propiedades hipoglucémicas, pero los datos son contradictorios, ya que se ha evidenciado que el tratamiento con infusión de anamú aumenta la glucemia en forma significativa durante las primeras semanas de consumo (García-González, *et al.*, 2006).

Los extractos de plantas pueden obtenerse de múltiples formas. Una de ellas es la purificación biodirigida, la cual permite determinar la o las sustancias responsables de la actividad biológica mediante procesos simultáneos de separación y ensayo, por lo cual se seleccionó para la obtención del extracto de anamú (Cifuentes, 2010). Con esta tecnología se identificaron varias fracciones del anamú que presentaron actividades biológicas complementarias. Tres de las fracciones concentradas a partir del extracto obtenido en acetato de etilo, denominadas S1 a S3, demostraron actividad citotóxica en líneas de células leucémicas (K562 y NB4) e indujeron apoptosis por la vía mitocondrial, dado que se observó una despolarización temprana e irreversible de la membrana mitocondrial, fragmentación del ADN y modulación intracelular de la HSP70, conocida como una proteína de estrés intracelular (Cifuentes, *et al.*, 2011).

El rendimiento en la obtención de las fracciones con mayor actividad biológica ha sido bajo, lo cual ha impedido optimizar el proceso para obtener un producto con potencial farmacéutico y supuso la necesidad de mejorar el rendimiento. Para ello, se utilizó solamente la fracción completa obtenida en acetato de etilo y se evaluó la actividad en modelos biológicos. En el análisis mediante polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados de ADN complementario (cDNA-AFLP) se observó que esta fracción compleja de anamú, también con actividad citotóxica, indujo una expresión diferencial de genes en células K562. En esta fracción se identificaron algunos de los compuestos presentes en las ‘subfracciones’ obtenidas previamente (Santander & Urueña, 2009).

La fracción que se pudo obtener en mayores cantidades fue caracterizada química y biológicamente para confirmar algunos de los hallazgos previos. Se encontró que presentó actividad citotóxica en líneas celulares tumorales de melanoma de ratón y humanas, conservando la citotoxicidad frente a las líneas de células leucémicas. Además, indujo cambios morfológicos, posiblemente por su acción en los filamentos de actina, lo cual se observó principalmente en las líneas adherentes, acompañado de una detención en la fase G2 del ciclo celular (Urueña, *et al.*, 2008). Este último efecto había sido reportado previamente para algunos de los compuestos identificados en el extracto alcohólico del anamú (Rösner, *et al.*, 2001).

El análisis proteómico en las células tumorales tratadas con la fracción arrojó un perfil complejo en respuesta al tratamiento, el cual afectó las proteínas que participan en la proliferación celular y en el metabolismo energético. Ello sugiere que el extracto de anamú utiliza múltiples mecanismos biológicos para regular el crecimiento tumoral (Uruña, *et al.*, 2008). La actividad de esta fracción se verificó en diversas líneas celulares, particularmente de cáncer de seno, con el objeto de evaluar posteriormente su actividad *in vivo* en modelos animales. Se observó que en la línea de adenocarcinoma mamario de ratón 4T1 el extracto indujo apoptosis con activación de la caspasa 3, fragmentación del ADN sin despolarización de la membrana mitocondrial y disminución de la capacidad de clonación de las células tumorales.

Los cambios observados previamente en la expresión de las enzimas glucolíticas, se vieron reflejados en este modelo con una disminución en la captación de glucosa y en la producción de lactato. En el modelo *in vivo* el extracto disminuyó la evolución de tumores mamarios de ratón después del trasplante ortotópico de células 4T1 marcadas con la proteína verde fluorescente, lo que confirmó su actividad antitumoral en un modelo de ratón con cáncer de seno altamente agresivo (Hernández, *et al.*, 2014).

Más recientemente, se ha observado que la actividad del anamú es específica de las células tumorales, en las cuales se encontró una reducción en la expresión de la enzima  $\beta$ -F1-ATPasa, en la activación del flujo glucolítico, en la concentración de ATP intracelular y en la respiración mitocondrial, con un bajo consumo de oxígeno. Como consecuencia de esta catástrofe energética inducida por el extracto, se observó una disminución de la proliferación celular tanto en los cultivos convencionales en dos dimensiones (2D), como en las esferas cultivadas en tres dimensiones (3D) y enriquecidas en células madre tumorales. En los modelos *in vivo* en ratones con trasplante ortotópico de la línea celular de adenocarcinoma mamario de ratón TS/A, se observó una disminución en el tumor primario y una mayor supervivencia de los animales, corroborando así el potencial de este extracto en el tratamiento del cáncer de seno (Hernández, *et al.*, 2017).

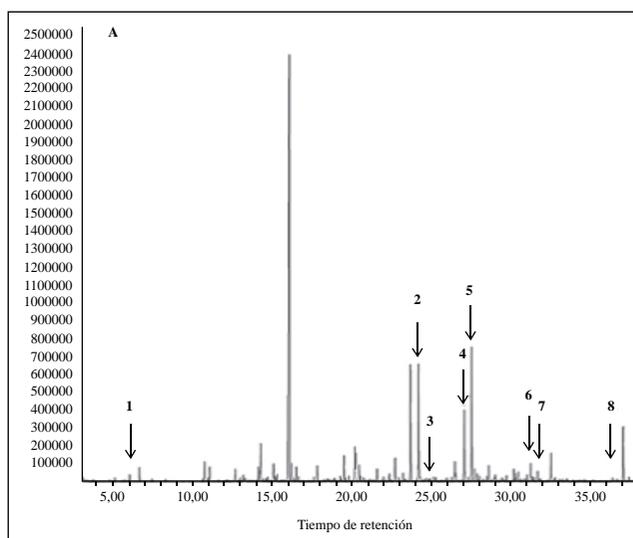
### Compuestos aislados de *Petiveria alliacea* y su participación en la actividad citotóxica

Recientemente se publicaron los principales compuestos presentes en el anamú, así como su actividad biológica, (Luz, *et al.*, 2016), por lo que no se discutirá en esta revisión. El trabajo del grupo se centró en la búsqueda de los metabolitos que se encontraban presentes en la fracción con actividad biológica, con el fin de utilizarlos como marcadores para su estandarización. Para ello se realizó inicialmente la derivatización de la fracción completa y se analizó por espectrometría de masas acoplada a cromatografía de gases (GC-MS). Los espectros de masas de cada uno de los compuestos detectados se analizaron empleando

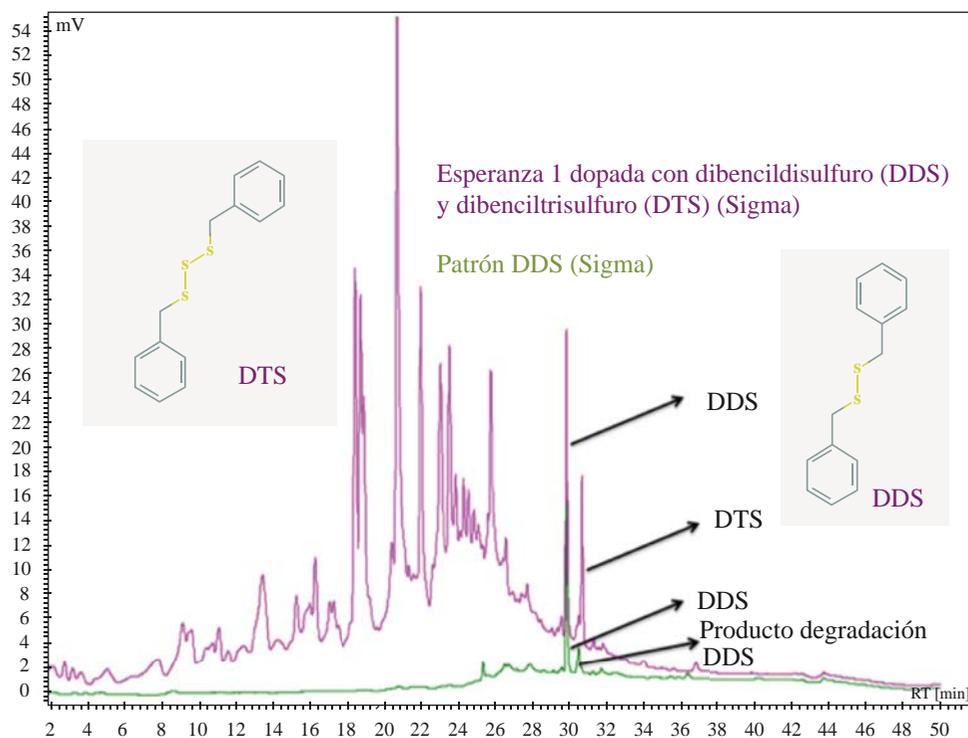
la base de datos MSD Chemstation y NIST MS2011. En la Figura 2 se muestra el espectro de masas obtenido para la fracción total acetilada, señalando los compuestos identificados: (1) benzaldehído, (2) leridol, (3) petiveral, (4) petiveral-4-etil, (5) bencilmiltidilsulfuro, (6) pinitol, (7) dibencil disulfuro (DDS) y (8) dibencil trisulfuro (DTS), compuestos previamente reportados en la especie por otros autores (Adesogan, 1974; Ayedoun, *et al.*, 1998; De Sousa, *et al.*, 1990; Suárez & Delle Monache, 1992). El DDS y el DTS ya se han encontrado implicados en la actividad en el citoesqueleto celular (Rösner, *et al.*, 2001).

Una vez identificados los principales compuestos, se estableció la huella cromatográfica de la fracción de anamú adicionando un estándar de DDS y DTS, como se muestra en la Figura 3. La fracción estandarizada se denominó “Esperanza”.

Con el fin de evaluar la participación de cada uno de los compuestos en la actividad citotóxica de la fracción, se aislaron algunos de los compuestos. En la Tabla 1 se presentan los compuestos y la actividad citotóxica en las líneas de células tumorales 4T1 de cáncer de seno de ratón y MCF7 de cáncer de seno humano. Entre los compuestos aislados se encontró un caroteno, el dibencil disulfuro, una mezcla de esteroides, el  $\beta$ -isoarborinol, y un ácido graso insaturado (ácido octadeca-7,10,13-trienoico) que está presente en gran cantidad en el extracto.

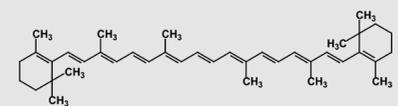
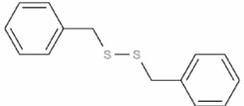
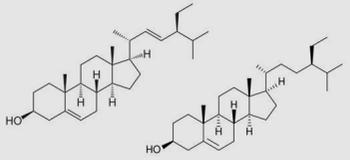
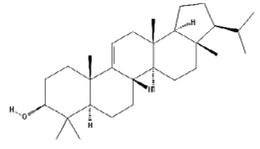


**Figura 2.** El recuento total de iones (*total ion chromatogram*, TIC) obtenido por espectrometría de masas acoplada a cromatografía de gases (GC-MS) para la fracción de *P. alliacea* derivatizada con anhídrido acético. La porción lipofílica de dicha fracción se analizó por GC-MS empleando una columna HP-5MS en un equipo Agilent GC 6850II con un detector de masas Agilent 5975CVL. Las flechas indican los siguientes compuestos detectados: (1) benzaldehído, (2) leridol, (3) petiveral, (4) petiveral-4-etil, (5) bencilmiltidilsulfuro, (6) pinitol, (7) dibencil disulfuro (DDS) y (8) dibencil trisulfuro (DTS). Los datos se compararon con las bases de espectros MSD (*Mass Selective Detector*) Chemstation y NIST MS 2011.



**Figura 3.** Huella dactilar cromatográfica de la fracción (3µg) “Esperanza I” adicionada con los patrones de DDS y DTS (perfil violeta). La fracción se analizó mediante HPLC a 254 nm en una columna C18 de 1,6 x 150 mm, gradiente de la fase móvil H<sub>2</sub>O – ACN t 0-1 90: 10; t 25-36 0:100; t 50 90:10. Flujo de 0,4 ml/min en un equipo Jasco PU2089plus con detector UV2070. Bajo las mismas condiciones analíticas se analizó el patrón de DDS (perfil verde).

**Tabla 1.** Compuestos aislados y caracterizados a partir de un extracto de Anamú con actividad citotóxica sobre líneas de cáncer de seno murino (4T1) y humano (MCF-7) por MTT.

Compuesto	Nombre	Nombre Iupac	Actividad Citotóxica CI50 (mg/ml)	
			4T1	MCF-7
	UJAV-A-2	Caroteno	110,8 ± 4,01	66,87 ± 2,62
	UJAV-ScSi 2-2	Dibencildisulfuro	1,262 ± 4,63	4,019 ± 4,85
	UJAV-19	Mezcla esteroides (stigmasterol y sitosterol)	> 250	189,0 ± 3,14
	UJAV-A9-4	3β-isoarborinol	> 250	7,206 ± 3,22
	UJAV-AN4-4	Ácido graso insaturado	86,59 ± 3,92	58,24 ± 1,78

## Efecto inmunomodulador del anamú

Al igual que muchos otros compuestos obtenidos a partir de plantas, el anamú se ha reportado como un inmunomodulador (Lopes-Martins, *et al.*, 2002; Muruganathan, *et al.*, 2013; Queiroz, *et al.*, 2000; Williams, *et al.*, 1997). Se entiende por inmunomodulación la actividad que se ejerce sobre los componentes del sistema inmunitario, la cual puede inducir cambios en el número de células de la respuesta inmunitaria en los diferentes compartimentos tisulares, o activándolas, así como alteraciones en el perfil de las citocinas, cuya función es permitir la comunicación intercelular. La célula dendrítica es una de las principales células que participan en la presentación de antígenos y en la generación de la respuesta inmunitaria adaptativa, es decir la respuesta de los linfocitos T específicos de antígeno, y por ello se evaluó la actividad del anamú en ellas. Teniendo en mente que el uso tradicional del anamú se hace en infusión, y que estas preparaciones están enriquecidas por metabolitos primarios, entre los cuales puede haber polisacáridos que son potenciales activadores de las células dendríticas (Amon, *et al.*, 2014; Ferreira, *et al.*, 2015), se comparó la actividad inducida por los extractos acuosos y orgánicos de la planta sobre dichas células. Los resultados mostraron que los extractos acuosos indujeron cambios morfológicos relacionados con la activación celular, como la formación de dendritas, así como la expresión de las CD86, pero solo en un pequeño porcentaje de la población total. El CD86 es un marcador de activación de las células dendríticas, sin embargo, la expresión parcial indica que su activación fue incompleta. Se encontró, además, un perfil de citocinas que participan en la respuesta inmunosupresora, como son las interleucinas (IL) IL-1 $\alpha$ , IL-6, IL-8, IL-10, así como citocinas proinflamatorias como la IL-12p70 y el TNF- $\alpha$ , pero estas últimas en concentraciones menores que el lipopolisacárido conocido por activar esta población. Se observó, además, el incremento de la expresión de NF- $\kappa$ B y la regulación negativa de la expresión de TGF- $\beta$ . Estos resultados sugieren que la fracción acuosa puede tener un papel en la supresión de la respuesta inflamatoria y, probablemente, en la inducción de tolerancia a través de la activación parcial de las células dendríticas, lo cual debería evaluarse en detalle en el contexto de la inmunidad antitumoral. Cabe resaltar que estos efectos sobre la célula dendrítica no se observaron con la fracción orgánica (Santander, *et al.*, 2012).

## El dividivi (*Caesalpinia spinosa*) como compuesto antitumoral e inmunoestimulante

**Antecedentes y caracterización química.** *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, comúnmente denominada dividivi o dividivi, es un arbusto al que se le atribuyen propiedades antimicrobianas (Aguilar-Gálvez, *et al.*, 2014), antitumorales (Aguilar-Gálvez, *et al.*, 2014; El-Nashar, *et al.*, 2015), y es conocida por su alta capacidad antioxidante (Chambi, *et al.*, 2013; Skowrya, *et al.*, 2014). En América Latina, particularmente en Perú, se ha estudiado

ampliamente y se explota como fuente de taninos para el tratamiento de los cueros y la producción de derivados utilizados en la industria química. En Colombia se da en forma silvestre y no ha recibido la atención necesaria a pesar de su potencial agroindustrial. La actividad biológica de la planta se ha atribuido a la presencia de estos taninos hidrolizables (derivados del ácido gálico) en los frutos, los cuales se caracterizan por tener anillos fenólicos, que se encuentran frecuentemente en plantas vasculares.

Clifford, *et al.* (2007) determinaron la presencia de al menos 45 compuestos fenólicos derivados del ácido caféico y del ácido gálico mediante un análisis de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas. La extracción llevada a cabo a partir de frutos de dividivi recolectados de arbustos silvestres en la provincia de Ricaurte en Boyacá, nos ha permitido confirmar en una primera aproximación fitoquímica la presencia de galotaninos y derivados del ácido gálico, así como de pentagaloil glucosa, entre otros metabolitos (Pombo, 2008). El extracto obtenido, el cual denominamos P2Et, se ha podido producir a escala piloto y en él se han identificado los metabolitos presentes; se aislaron, asimismo, por lo menos diez compuestos para su estandarización y se determinó su actividad biológica en diferentes líneas celulares (Sandoval, *et al.*, 2016). En la Figura 4 se muestra el perfil cromatográfico de diferentes lotes de P2Et en los cuales se identificaron los metabolitos marcadores: ácido gálico (AG), galato de metilo (MG) y galato de etil (EG); en ellos se analizó la variación de la concentración en cada lote calculando el área bajo la curva, y se determinó la variación de la actividad citotóxica en las células tumorales de ratón 4T1, la cual presentó la concentración inhibitoria requerida para matar el 50 % de las células (IC<sub>50</sub>) entre 25 y 37 (ug/ml) en los diferentes lotes (datos de nuestro laboratorio). En la Tabla 2 se presentan algunos de los metabolitos aislados a partir de la fracción P2Et y su participación en la actividad citotóxica

## Actividad antitumoral del P2Et mediante la inducción de la respuesta inmunitaria

Los estudios realizados con el extracto P2Et han demostrado que induce apoptosis en líneas de células humanas y de ratón con cáncer de seno y leucemias mediante la despolarización de la mitocondria, la activación de la caspasa 3, la condensación de la cromatina y la disminución de la capacidad clonogénica en células K562 y 4T1. Además, cuando se usó en conjunto con fármacos quimioterapéuticos como la doxorubicina en concentraciones no letales, se observó una reducción de la IC<sub>50</sub>, lo que representa un aumento en la actividad antitumoral neta del medicamento, la cual se traduciría en la posibilidad de utilizar menos doxorubicina cuando se administre en asocio con el extracto de dividivi (Castañeda, *et al.*, 2012; Pombo, 2008; Uruña, *et al.*, 2013)

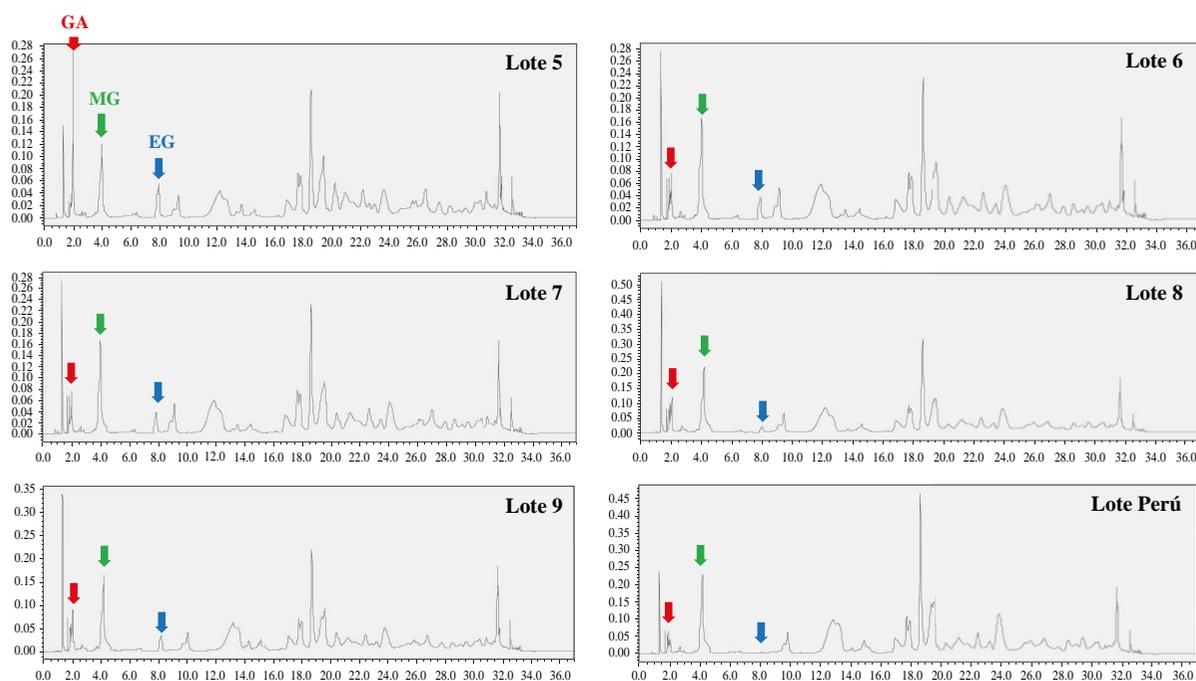
En el modelo *in vivo*, además, el extracto redujo el tumor primario de ratones BALB/c con trasplante ortotópico de células 4T1 de cáncer de seno y disminuyó las metástasis,

principalmente en el bazo. Por otra parte, se observó una reducción de la reacción leucemoide, así como de los niveles séricos de IL-6, ambos factores relacionados con un peor pronóstico de la enfermedad, lo que sugiere que el extracto no solamente actúa sobre el tumor primario, sino que también reduce la migración celular a órganos distantes, es decir, implica su actividad en el microambiente tumoral (Urueña, *et al.*, 2013).

La disminución de las metástasis puede deberse a varios factores, entre ellos una actividad sobre las células madre tumorales o la activación de la respuesta inmunitaria, la cual puede controlar la población tumoral que ha migrado a órganos distantes. Con el fin de evaluar la primera hipótesis, se evaluó la actividad citotóxica del P2Et después de múltiples pasajes *in vivo* en células tumorales que presentaban diferentes perfiles de resistencia a drogas, sea por la sobreexpresión de bombas de resistencia a drogas de tipo Pgp o por enriquecimiento de la población de células madre tumorales. Se observó que, *in vitro*, el P2Et es citotóxico tanto en las líneas Pgp<sup>+</sup> como en las Pgp<sup>-</sup>, y que, además, pudo modular la actividad de las bombas de resistencia, principalmente con sus compuestos más hidrofóbicos, lo que conlleva un aumento de la sensibilidad de las células resistentes a fármacos como la doxorubicina cuando estas se tratan previamente con el P2Et en cultivos 2D y 3D. Es interesante que los resultados obtenidos *in vitro* no siempre concordaron con lo observado *in vivo*. De hecho, cuando se evaluó el efecto del P2Et en células TS/A CD44<sup>+</sup>CD24<sup>low</sup>, no se observó sinergia con la doxorubicina, sin embargo, cuando el tratamiento se aplicó *in vivo*, se observó claramente que

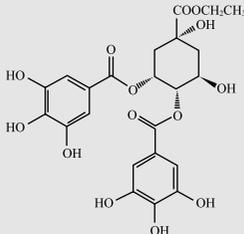
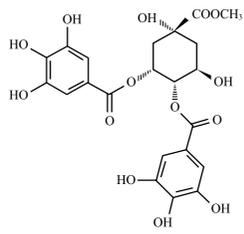
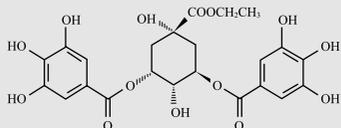
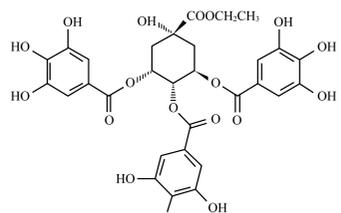
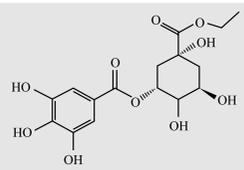
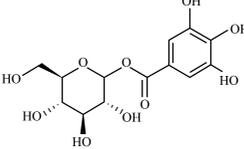
el tratamiento conjunto de P2Et con doxorubicina resultaba más eficaz en términos de tamaño tumoral y supervivencia de los animales con trasplante ortotópico con estas células (Sandoval, *et al.*, 2016). Estos resultados sugieren que el P2Et puede contrarrestar la resistencia a las drogas, al menos cuando está mediada por la expresión de bombas de resistencia, dado que hallazgos más recientes han demostrado que el P2Et no tiene actividad contra las células tumorales que expresan la enzima ALDH, la cual constituye un marcador relevante de las células madres tumorales y que participa activamente en la detoxificación intracelular (Xu, *et al.*, 2015). Por el contrario, estas células pueden eliminarse cuando se activa la respuesta inmunitaria (artículo en preparación), lo que evidencia, una vez más, que el tratamiento antitumoral debe aplicarse en múltiples niveles para poder dar cuenta de la heterogeneidad celular presente en los tumores *in vivo*.

La segunda hipótesis en torno a la activación de la respuesta inmunitaria se estudió inicialmente en el modelo de cáncer de seno con células 4T1. Se observó que el tratamiento de las células tumorales con el extracto P2Et indujo la expresión de marcadores de muerte celular inmunogénica, conocidos por su papel en la activación de las células dendríticas (Krysko, *et al.*, 2012), tales como la expresión de calreticulina en la membrana plasmática, la movilización extranuclear de la proteína HMGB-1 y la liberación de ATP. Cuando los animales se vacunaron con células 4T1 tratadas *in vitro* con P2Et, se controló mejor el desarrollo del tumor y se detectaron directamente *ex vivo* linfocitos T CD4 y CD8 de larga vida, multifuncionales,



**Figura 4.** Perfil cromatográfico de diferentes lotes de P2Et. Se identifican los metabolitos marcadores del extracto P2Et: ácido gálico (AG), metil galato (MG) y etil galato (EG)

**Tabla 2.** Compuestos aislados del Dividivi y actividad citotóxica medida por la técnica de MTT sobre células tumorales de cáncer de seno murino (4T1) y humano (MCF7).

Compuesto	Nombre	Nombre IUPAC	Actividad citotóxica CI50 (µg/ml)	
			4T1	MCF-7
	B12-3	4,5-digaloil quinato de etilo	69,15 ± 1,73	207,8 ± 3,67
	IV 2-2	4,5-digaloil quinato de metilo	211,2 ± 4,10	250
	B12-2	3,5-digaloil quinato de etilo	35,73 ± 2,35	145,4 ± 5,16
	B 12-4	3,4,5-trigaloil- quinato de etilo	39,40 ± 4,80	97,12 ± 3,57
	I	5-galoil-quinato de etilo	134,1 ± 4,52	250
	P 1-1-4	Glucosil-galato	63,48 ± 0,35	122,15 ± 3,74

y productores de citocinas como las IL-2, IFN-γ y TNF-α. Además, esta población responde a la estimulación *in vitro* con un extracto de tumor, lo que produjo IL-2, TNF-α, IL-4, IL-5, e IFN-γ y demostró la generación de células de memoria específicas del antígeno, las cuales se han activado suficientemente como para llegar a un estado de diferenciación que les permita producir citocinas de tipo Th2 (Uruña, *et al.*, 2013). Estos hallazgos fueron muy interesantes para la comprensión de la actividad del extracto

y nos han llevado a plantear nuevas hipótesis. Es posible que el extracto no solo actúe sobre el tumor sino también sobre las células presentadoras de antígeno, lo que permite la activación de la respuesta inmunitaria, con un patrón parcialmente inmunomodulador al encontrar citocinas del tipo de las Th2, las cuales podrían modular también el proceso inflamatorio deletéreo por su papel antiinflamatorio.

En el modelo tumoral con células 4T1 es muy difícil determinar si realmente hay activación de la respuesta

específica de antígeno, dado que no hay antígenos claramente identificados. Por esta razón, en colaboración con Pedro Romero, del Instituto Ludwig de Lausana, se evaluó el efecto del extracto P2Et en el modelo de melanoma de ratón con células B16 en animales C57BL/6. En este modelo, se han identificado varios antígenos tumorales que permiten detectar más fácilmente la población de linfocitos T específicos de antígeno. Los resultados obtenidos demostraron que el tratamiento de las células B16 con el P2Et indujo activación de las caspasas 3 y 9, movilización del citocromo c al citoplasma y externalización de la fosfatidilserina como marcador de apoptosis. Además, indujo autofagia, la cual se ha vinculado recientemente como un evento necesario en la activación de la respuesta inmunitaria de las células tumorales (Martins, *et al.*, 2014) y la expresión de marcadores de muerte celular inmunogénica, tal como se observó en el modelo de cáncer de seno. Además, se encontraron células CD8 dirigidas contra el antígeno de melanoma (Trp-2) productoras de IFN- $\gamma$ , lo que refleja un proceso de sensibilización cruzada que permitió la activación de linfocitos T específicos. Por otra parte, se encontró que el efecto protector del P2Et, al menos en este modelo, queda abolido en ratones inmunodeficientes en los cuales se pierde parcialmente la actividad antitumoral, lo cual se corroboró al hacer experimentos de depleción de linfocitos T CD4 y CD8 en animales silvestres, e indica que la actividad antitumoral del P2Et es altamente dependiente de la respuesta inmunitaria adaptativa (Gómez-Cadena, *et al.*, 2016).

### Actividad de los extractos de anamú y dividivi en células tumorales humanas primarias

Los extractos de anamú y dividivi también presentaron actividad en células tumorales primarias humanas obtenidas de pacientes con cáncer de seno y leucemia. En las de pacientes con cáncer de seno cultivadas en 3D para enriquecerlas en células madres tumorales fueron sensibles al P2Et y al anamú y dicha sensibilidad al parecer aumentó en el cultivo adicionado con doxorubicina (publicación en preparación).

Por el contrario, las células obtenidas de pacientes con leucemia linfocítica aguda o leucemia mieloide aguda se han mostrado menos sensibles al P2Et y han presentado una mayor sensibilidad al extracto de anamú. Además, el tratamiento de los blastos con los dos extractos combinados y los fármacos de elección, aumentó la sensibilidad a la muerte incluso en células tumorales que en algunos casos no responden a las terapias convencionales (publicación en preparación). Estos datos, aunque preliminares, evidencian que, por lo menos *in vitro*, los extractos de anamú y dividivi son capaces de actuar en los tumores primarios humanos mejorando la respuesta a la quimioterapia. Queda por comprobarse cuál es su papel en la modulación del microambiente tumoral y evaluarlo en estudios clínicos para saber si la actividad observada *in vitro* se encuentra también *in vivo*, lo cual tendría un impacto importante en la respuesta al tratamiento y, sobre todo, en la supervivencia de los pacientes.

### Optimización del P2Et en condiciones de buenas prácticas de manufactura y avances en los análisis preclínicos

El trabajo realizado hasta el momento se ha orientado a validar el conocimiento científico sobre el uso medicinal de estas plantas y, además, a producir en forma estandarizada un extracto que pueda usarse como fitomedicamento y se ajuste a las normas de la *Federal Drug Administration* – FDA (Estados Unidos), el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos – Invima (Colombia) y de la *Agência Nacional de Vigilância Sanitária* -ANVISA (Brasil). Para la producción de los lotes industriales del extracto en prueba piloto, deben cumplirse las condiciones de buenas prácticas de manufactura (BPM), las cuales se definen como el conjunto de normas operativas destinadas a asegurar la calidad de los medicamentos. En Colombia, las BPM se rigen por la resolución 1160 de 2016 mediante la cual se adoptó oficialmente el manual de las BPM de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (serie de informes técnicos número 823 - Informe 32).

La forma farmacéutica sólida del fitomedicamento P2Et en cápsula se produce actualmente en los Laboratorios Labfarve, los cuales fueron nuevamente certificados hasta el año 2021 por el Invima en buenas prácticas de manufactura ajustadas para producción y control de calidad según el informe 32 de la OMS. Además, la producción del P2Et se ajusta a lo dispuesto en el decreto 2266 de 2004, el cual reglamenta la producción de los fitoterapéuticos en Colombia.

Las pruebas de calidad del ingrediente farmacéutico activo del P2Et se hicieron en el material vegetal y ya en dicho ingrediente terminado. Dado que en Colombia la norma (Decreto 2266 de 2004) no establece las pruebas específicas que deben hacerse en los extractos, en el desarrollo del P2Et nuestro grupo se ha guiado por las normas de los organismos regulatorios internacionales con plena homologación en Colombia según el decreto 0162 de 2004: el *Formulário de Fitoterápicos Farmacopeia Brasileira* de la ANVISA, aquellas para artículos de origen botánico del *The United States Pharmacopeia and National Formulary* (USP38–NF33), la guía de la FDA *Botanical Drug Development Guidance for Industry* y la de *Quality control methods for herbal materials* de la OMS.

Las pruebas de calidad que se deben realizar sobre el ingrediente farmacéutico activo para obtener el certificado de análisis para el material vegetal son el i) certificado de la muestra registrada en el Herbario Nacional Colombiano, ii) identificación de la especie, iii) pruebas de control de calidad (aflatoxinas, metales pesados, pesticidas) y otros contaminantes, iv) reseña botánica de la especie (aspectos de ecología, cultivo, aprovechamiento y sostenibilidad), v) certificación de cultivo y recolección de dividivi en condiciones de buenas prácticas de agricultura en la provincia del Alto Ricaurte, Boyacá, Colombia.

Asimismo, es necesario aportar el i) certificado de análisis, ii) el origen botánico de la fracción P2Et, iii) las

propiedades organolépticas (apariciencia, color, olor, sabor), iv) la identificación por HPLC o CCD, v) el análisis fisicoquímico (porcentaje de humedad, cenizas totales, cenizas insolubles, solventes residuales) y vi) los análisis microbiológicos.

### Normalización del ingrediente farmacéutico activo P2Et

Las agencias regulatorias requieren, además, que la metodología de identificación del ingrediente farmacéutico activo este normalizada, para lo cual se utilizó el documento de la International Conference on Harmonisation (ICH) *Validation of Analytical Procedures: Text and methodology Q2*. Esta normalización garantiza la consistencia entre los lotes, tal como se explicó anteriormente. Para esta validación se utilizaron siete lotes de P2Et. La técnica analítica de identificación empleada fue la cromatografía líquida de alto rendimiento, la cual está considerada como de categoría I por el Invima fue validada siguiendo los requerimientos establecidos.

### Estabilidad y fecha de expiración

La fecha de expiración del extracto se determinó con base en los resultados del estudio de estabilidad siguiendo los lineamientos del documento técnico del Ministerio de Salud y Protección Social, el cual establece que Colombia se encuentra en la zona IVb, es decir, una zona con acusados cambios climáticos, lo cual define los parámetros a evaluar. Actualmente se están llevando a cabo los estudios de estabilidad acelerada y natural según el documento técnico del Ministerio de Salud y Protección Social, requisito indispensable para registrar y ejecutar el estudio clínico.

### Ensayos preclínicos

Los ensayos preclínicos se requieren para avanzar a la fase clínica. Deben llevarse a cabo observando las buenas prácticas de laboratorio para preparar la documentación de acuerdo a las exigencias de las agencias internacionales. Para el P2Et, estas pruebas se están realizando en Medlab (Brasil), laboratorio que cuenta con instalaciones y procesos certificados y cuenta con autorización para ensayos en animales, los cuales se ejecutan bajo los lineamientos establecidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y el ICH basados en la guía de la FDA *Guidance for Industry S9 Nonclinical Evaluation for Anticancer Pharmaceuticals*. Las pruebas para garantizar la seguridad del producto antes de administrarlo en humanos son el test de AMES, y los análisis de micronúcleos, de toxicidad oral aguda, de toxicidad oral 'subcrónica' (28 días) y de toxicidad oral crónica (3 y 6 meses). En los análisis de toxicidad oral aguda y subcrónica, se ha demostrado que el extracto es seguro en dosis de 1.000 mg/Kg de peso administrándolo diariamente durante 28 días, lo que permitirá avanzar en el protocolo clínico de fase I, para así evaluar la seguridad del medicamento en pacientes con cáncer en el 2018.

### Agradecimientos

A la Pontificia Universidad Javeriana, en donde se ha podido realizar toda la investigación reportada, la cual ha sido financiada por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad, por Colciencias y el por Sistema General de Regalías del Distrito Capital.

### Contribución de los autores

Claudia Urueña ha llevado a cabo la gran mayoría de los experimentos presentados en esta revisión y ha supervisado la ejecución de técnica y el diseño experimental de los procedimientos que se llevan a cabo en el laboratorio en los últimos 10 años. Susana Fiorentino es la directora del grupo y de la línea de investigación en Quimiopreención y Fitomedicamentos antitumorales desde hace 14 años.

### Conflicto de intereses

Estos resultados hacen parte de una iniciativa empresarial de tipo *spin off*, denominada Phairilab, en la cual las autoras participan.

### Referencias

- Adesogan, E. K. (1974). Trithiolaniacin, a novel trithiolan from *Petiveria alliacea*. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. **21**: 906-907.
- Aguilar-Gálvez, A., Noratto, G., Chambi, F., Debaste, F., Campos, D. (2014). Potential of tara (*Caesalpinia spinosa*) gallotannins and hydrolysates as natural antibacterial compounds. *Food chemistry*. **156**: 301-304.
- Algieri, F., Rodríguez-Nogales, A., Rodríguez-Cabezas, M. E., Risco, S., Ocete, M., Gálvez, J. (2015). Botanical drugs as an emerging strategy in inflammatory bowel disease: A review. *Mediators of inflammation*, 2015.
- Almuhaideb, A., Papathanasiou, N., Bomanji, J. (2011). 18F-FDG PET/CT imaging in oncology. *Annals of Saudi medicine*. **31** (1): 3.
- Amon, R., Reuven, E. M., Leviatan Ben-Arye, S., Padler-Karavani, V. (2014). Glycans in immune recognition and response. *Carbohydr Res*. **389**: 115-122. doi:10.1016/j.carres.2014.02.004
- Ayedoun, M., Moudachirou, M., Sossou, P., Garneau, F., Gagnon, H., Jean, F.-I. (1998). Volatile constituents of the root oil of *Petiveria alliacea* L. from Benin. *Journal of Essential Oil Research*. **10** (6): 645-646.
- Cairns, R. A., Harris, I. S., Mak, T. W. (2011). Regulation of cancer cell metabolism. *Nat Rev Cancer*. **11** (2): 85-95. doi:10.1038/nrc2981
- Castañeda, D. M., Pombo, L. M., Urueña, C. P., Hernández, J. F., Fiorentino, S. (2012). A gallotannin-rich fraction from *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze displays cytotoxic activity and raises sensitivity to doxorubicin in a leukemia cell line. *BMC complementary and alternative medicine*. **12** (1): 38.
- Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., Campos, D. (2013). Antioxidant potential of hydrolyzed polyphenolic extracts from tara (*Caesalpinia spinosa*) pods. *Industrial Crops and Products*. **47**: 168-175.

- Cifuentes, C.** (2010). Proceso biodirigido para la obtención de fracciones con actividad antitumoral a partir de *Petiveria alliacea*. (Doctorado), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Cifuentes, M. C., Castañeda, D. M., Urueña, C. P., Fiorentino, S.** (2011). A fraction from *Petiveria alliacea* induces apoptosis via a mitochondria-dependent pathway and regulates HSP70 expression. *Universitas Scientiarum*. **14** (2): 125-134.
- Clifford, M. N., Stoupi, S., Kuhnert, N.** (2007). Profiling and characterization by LC-MS n of the galloylquinic acids of green tea, tara tannin, and tannic acid. *Journal of agricultural and food chemistry*. **55** (8): 2797-2807.
- Colegio, O. R., Chu, N.-Q., Szabo, A. L., Chu, T., Rhebergen, A. M., Jairam, V., ... Phillips, G. M.** (2014). Functional polarization of tumour-associated macrophages by tumour-derived lactic acid. *Nature*. **513** (7519): 559.
- Cort, A., & Ozben, T.** (2015). Natural Product Modulators to Overcome Multidrug Resistance In Cancer. *Nutr Cancer*. **67**: 1-13. doi:10.1080/01635581.2015.1002624
- Courtois-Cox, S., Jones, S., Cichowski, K.** (2008). Many roads lead to oncogene-induced senescence. *Oncogene*. **27** (20): 2801.
- Dave, B., Mittal, V., Tan, N. M., Chang, J. C.** (2012). Epithelial-mesenchymal transition, cancer stem cells and treatment resistance. *Breast Cancer Res*. **14** (1): 202. doi:10.1186/bcr2938
- De Sousa, J. R., Demuner, A. J., Pinheiro, J. A., Breitmaier, E., Cassels, B. K.** (1990). Dibenzyl trisulphide and trans-N-methyl-4-methoxyproline from *Petiveria alliacea*. *Phytochemistry*. **29** (11): 3653-3655.
- Diwanay, S., Chitre, D., Patwardhan, B.** (2004). Immunoprotection by botanical drugs in cancer chemotherapy. *Journal of Ethnopharmacology*. **90** (1): 49-55.
- Efferth, T., & Koch, E.** (2011). Complex interactions between phytochemicals. The multi-target therapeutic concept of phytotherapy. *Current drug targets*. **12** (1): 122-132.
- El-Nashar, H., Eldahshan, O., Singab, A.** (2015). The tribe Caesalpinieae (Fabaceae): An updated review on pharmacological aspects. *Med Aromat Plants*, **4** (215): 2167-0412.1000215
- Ferreira, S. S., Passos, C. P., Madureira, P., Vilanova, M., Coimbra, M. A.** (2015). Structure-function relationships of immunostimulatory polysaccharides: A review. *Carbohydr Polym*. **132**: 378-396. doi:10.1016/j.carbpol.2015.05.079
- Fischer, K., Hoffmann, P., Voelkl, S., Meidenbauer, N., Ammer, J., Edinger, M., ... Hoves, S.** (2007). Inhibitory effect of tumor cell-derived lactic acid on human T cells. *Blood*. **109** (9): 3812-3819.
- Francescone, R., Hou, V., Grivennikov, S. I.** (2014). Microbiome, inflammation and cancer. *Cancer journal (Sudbury, Mass.)*. **20** (3): 181.
- García-Barriga, H.** (1974). Flora medicinal de Colombia: botánica médica. Fecha de consulta: dd-mm-año. Disponible en: poner el URL
- García-González, M., Coto Morales, T., Ocampo, R., Pazos, L.** (2006). Subchronic and acute preclinic toxicity and some pharmacological effects of the water extract from leaves of *Petiveria alliacea* (Phytolaccaceae). *Revista de biología tropical*. **54** (4): 1323-1326.
- Gertsch, J.** (2011). Botanical drugs, synergy, and network pharmacology: Forth and back to intelligent mixtures. *Planta medica*. **77** (11): 1086-1098.
- Goetze, K., Walenta, S., Ksiazkiewicz, M., Kunz-Schughart, L. A., Mueller-Klieser, W.** (2011). Lactate enhances motility of tumor cells and inhibits monocyte migration and cytokine release. *International journal of oncology*. **39** (2): 453-463.
- Gómez-Cadena, A., Urueña, C., Prieto, K., Martínez-Usatorre, A., Donda, A., Barreto, A., ... Fiorentino, S.** (2016). Immune-system-dependent anti-tumor activity of a plant-derived polyphenol rich fraction in a melanoma mouse model. *Cell death & disease*. **7** (6): e2243.
- Hernández, J. F., Urueña, C. P., Cifuentes, M. C., Sandoval, T. A., Pombo, L. M., Castañeda, D., ... Fiorentino, S.** (2014). A *Petiveria alliacea* standardized fraction induces breast adenocarcinoma cell death by modulating glycolytic metabolism. *J Ethnopharmacol*. **153** (3): 641-649. doi:10.1016/j.jep.2014.03.013
- Hernández, J. F., Urueña, C. P., Sandoval, T. A., Cifuentes, M. C., Formentini, L., Cuezva, J. M., Fiorentino, S.** (2017). A cytotoxic *Petiveria alliacea* dry extract induces ATP depletion and decreases  $\beta$ -F1-ATPase expression in breast cancer cells and promotes survival in tumor-bearing mice. *Revista Brasileira de Farmacognosia*. **27** (3): 306-314
- Husain, Z., Huang, Y., Seth, P., Sukhatme, V. P.** (2013). Tumor-derived lactate modifies antitumor immune response: Effect on myeloid-derived suppressor cells and NK cells. *The Journal of Immunology*. **191** (3): 1486-1495.
- Illnait Ferrer, J.** (2007). Principales referencias etnomédicas sobre el anamú (*Petiveria alliacea* Linn) y principios activos encontrados en la planta. un acercamiento al tema. *Revista CENIC. Ciencias biológicas*, **38** (1): 27-30.
- Kaplon, J., Zheng, L., Meissl, K., Chaneton, B., Selivanov, V. A., Mackay, G., ... Shlomi, T.** (2013). A key role for mitochondrial gatekeeper pyruvate dehydrogenase in oncogene-induced senescence. *Nature*. **498** (7452): 109.
- Koppenol, W. H., Bounds, P. L., Dang, C. V.** (2011). Otto Warburg's contributions to current concepts of cancer metabolism. *Nature Reviews Cancer*, **11** (5): 325-337.
- Krysko, D. V., Garg, A. D., Kaczmarek, A., Krysko, O., Agostinis, P., Vandenabeele, P.** (2012). Immunogenic cell death and DAMPs in cancer therapy. *Nature Reviews Cancer*. **12** (12): 860-875.
- Lei, X., Chen, J., Liu, C.-X., Lin, J., Lou, J., Shang, H.-c.** (2014). Status and thoughts of Chinese patent medicines seeking approval in the US market. *Chinese journal of integrative medicine*. **20** (6): 403-408.
- Lieberman, B. P., Ploessl, K., Wang, L., Qu, W., Zha, Z., Wise, D. R., ... Kung, H. F.** (2011). PET imaging of glutaminolysis in tumors by 18F-(2S, 4R) 4-fluoroglutamine. *Journal of nuclear medicine*. **52** (12): 1947-1955.
- Lopes-Martins, R., Pegoraro, D., Woisky, R., Penna, S., Sertié, J.** (2002). The anti-inflammatory and analgesic effects of a crude extract of *Petiveria alliacea* L.(Phytolaccaceae). *Phytomedicine*. **9** (3): 245-248.
- Luz, D. A., Pinheiro, A. M., Silva, M. L., Monteiro, M. C., Prediger, R. D., Maia, C. S. F., Fontes-Júnior, E. A.** (2016). Ethnobotany, phytochemistry and neuropharmacological effects of *Petiveria alliacea* L.(Phytolaccaceae): A review. *Journal of ethnopharmacology*. **185**: 182-201.

- Margaryan, N. V., Seftor, E. A., Seftor, R. E., Hendrix, M. J.** (2017). Targeting the Stem Cell Properties of Adult Breast Cancer Cells: Using Combinatorial Strategies to Overcome Drug Resistance. *Current Molecular Biology Reports*. (3): 159-164.
- Martins, I., Wang, Y., Michaud, M., Ma, Y., Sukkurwala, A., Shen, S., ... Perfettini, J.** (2014). Molecular mechanisms of ATP secretion during immunogenic cell death. *Cell death and differentiation*. **21** (1): 79.
- Mondal, S., Bandyopadhyay, S., Ghosh, M. K., Mukhopadhyay, S., Roy, S., Mandal, C.** (2012). Natural products: promising resources for cancer drug discovery. *Anticancer Agents Med Chem*. **12** (1): 49-75.
- Murugananthan, G., Mohan, S., Pabbithi, S. C., Debanjan, D.** (2013). Immunomodulatory constituents from plant origins: a review of isolated biomolecules. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. **4** (7): 2459.
- Newman, D. J., & Cragg, G. M.** (2016). Natural products as sources of new drugs from 1981 to 2014. *Journal of natural products*. **79** (3): 629-661.
- Pavlova, N. N., & Thompson, C. B.** (2016). The emerging hallmarks of cancer metabolism. *Cell metabolism*. **23** (1): 27-47.
- Plaks, V., Kong, N., Werb, Z.** (2015). The cancer stem cell niche: How essential is the niche in regulating stemness of tumor cells? *Cell Stem Cell*. **16** (3): 225-238. doi:10.1016/j.stem.2015.02.015
- Pombo, L.** (2008). Valoración de la actividad antitumoral de extractos y fracciones obtenidas de *Caesalpinia spinosa* Molina Kuntze sobre diferentes líneas celulares tumorales. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Maestría en Ciencias Biológicas.
- Pombo, M.** (2008). Las fracciones obtenidas de *Caesalpinia spinosa* Molina Kuntze, ejercen diferentes efectos biológicos sobre células K562. Maestría en Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Queiroz, M. S., Quadros, M. R., Santos, L. M.** (2000). Cytokine profile and natural killer cell activity in *Listeria monocytogenes* infected mice treated orally with *Petiveria alliacea* extract. *Immunopharmacology and immunotoxicology*. **22** (3): 501-518.
- Rösner, H., Williams, L., Jung, A., Kraus, W.** (2001). Disassembly of microtubules and inhibition of neurite outgrowth, neuroblastoma cell proliferation, and MAP kinase tyrosine dephosphorylation by dibenzyl trisulphide. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*. **1540** (2): 166-177.
- Sandoval, T. A., Urueña, C. P., Llano, M., Gómez-Cadena, A., Hernández, J. F., Sequeda, L. G., . . . Fiorentino, S.** (2016). Standardized Extract from *Caesalpinia spinosa* is Cytotoxic Over Cancer Stem Cells and Enhance Anticancer Activity of Doxorubicin. *The American Journal of Chinese Medicine*. (08): 1693-1717.
- Santander, S., & Urueña, C.** (2009). Influencia del tratamiento de *Petiveria alliacea* en la expresión diferencial de genes en células tumorales. *Univ. Med. Bogotá*. **50** (3): 284-296.
- Santander, S. P., Hernández, J. F., Cifuentes B, C., Aoki, M., Moins-Teisserenc, H., & Fiorentino, S.** (2012). Immunomodulatory effects of aqueous and organic fractions from *Petiveria alliacea* on human dendritic cells. *The American journal of Chinese medicine*. **40** (04): 833-844.
- Schmidt, B. M., Ribnicky, D. M., Lipsky, P. E., Raskin, I.** (2007). Revisiting the ancient concept of botanical therapeutics. *Nature chemical biology*. **3** (7): 360-366.
- Skowyra, M., Falguera, V., Gallego, G., Peiró, S., Almajano, M. P.** (2014). Antioxidant properties of aqueous and ethanolic extracts of tara (*Caesalpinia spinosa*) pods in vitro and in model food emulsions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. **94** (5): 911-918.
- Suarez, L. E. C., & Delle Monache, F.** (1992). 6-C-formyl and 6-C-hydroxymethyl flavanones from *Petiveria alliacea*. *Phytochemistry*. **31** (7): 2481-2482.
- Sullivan, L. B., & Chandel, N. S.** (2014). Mitochondrial reactive oxygen species and cancer. *Cancer & metabolism*. **2** (1): 17.
- Tilton, R., Paiva, A. A., Guan, J.-Q., Marathe, R., Jiang, Z., van Eyndhoven, W., ... Liu, S.-H.** (2010). A comprehensive platform for quality control of botanical drugs (PhytomicsQC): A case study of Huangqin Tang (HQT) and PHY906. *Chinese medicine*. **5** (1): 30.
- Urueña, C., Cifuentes, C., Castañeda, D., Arango, A., Kaur, P., Asea, A., Fiorentino, S.** (2008). *Petiveria alliacea* extracts uses multiple mechanisms to inhibit growth of human and mouse tumoral cells. *BMC complementary and alternative medicine*. **8** (1): 60.
- Urueña, C., Mancipe, J., Hernandez, J., Castañeda, D., Pombo, L., Gomez, A., ... Fiorentino, S.** (2013). Gallotannin-rich *Caesalpinia spinosa* fraction decreases the primary tumor and factors associated with poor prognosis in a murine breast cancer model. *BMC complementary and alternative medicine*. **13** (1): 74.
- Venneti, S., Dunphy, M. P., Zhang, H., Pitter, K. L., Zanzonico, P., Campos, C., ... Ploessl, K.** (2015). Glutamine-based PET imaging facilitates enhanced metabolic evaluation of gliomas in vivo. *Science translational medicine*, **7** (274): 274ra217-274ra217.
- Wang, X., Xu, X., Li, Y., Li, X., Tao, W., Li, B., ... Yang, L.** (2013). Systems pharmacology uncovers Janus functions of botanical drugs: Activation of host defense system and inhibition of influenza virus replication. *Integrative Biology*. **5** (2): 351-371.
- Warburg, O.** (1956). On respiratory impairment in cancer cells. *Science (New York, NY)*. **124** (3215): 269-270.
- Williams, L. A., The, T., Gardner, M., Fletcher, C., Naravane, A., Gibbs, N., & Fleishacker, R.** (1997). Immunomodulatory activities of *Petiveria alliacea* L. *Phytotherapy Research*. **11** (3): 251-253.
- Xu, X., Chai, S., Wang, P., Zhang, C., Yang, Y., Yang, Y., Wang, K.** (2015). Aldehyde dehydrogenases and cancer stem cells. *Cancer letters*. **369** (1): 50-57.
- Zhu, J., Fan, X., Cheng, Y., Agarwal, R., Moore, C. M., Chen, S. T., Tong, W.** (2014). Chemometric analysis for identification of botanical raw materials for pharmaceutical use: A case study using *Panax notoginseng*. *PLoS One*. **9** (1): e87462.

# Sonidos del comer: propuestas para el estudio intermodal entre el sabor y la música

Eugenia Razumiejczyk<sup>1,2</sup>, Guillermo Macbeth<sup>1,2</sup>, Gisela Hurtado<sup>2</sup>,  
Carolina Pereyra Girardi<sup>3</sup>, Fernando Marmolejo-Ramos<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Argentina

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Transferencia de Entre Ríos (CITER) Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones Cardiológicas (ININCA) Argentina

<sup>4</sup> School of Psychology, The University of Adelaide, Australia

## Resumen

El objetivo de este artículo es proponer una síntesis original del proceso de correspondencias del gusto con otras modalidades sensoriales. Para ello, los autores presentan el concepto de integración multisensorial entendido como proceso de correspondencias y de suposición de la unidad, ambos facilitados por la congruencia semántica. Asimismo, se muestran diversos estudios que han investigado la percepción del gusto/sabor y sus correspondencias. Los principales resultados hallaron que parámetros específicos de sonidos pueden modificar la experiencia del gusto añadiendo significativamente placer a la experiencia de comer y beber del consumidor. Sin embargo, es importante destacar la relevancia de la validez ecológica en los estudios intermodales. Los autores presentan varias líneas de fructíferas de investigación. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Gusto; Sonido; Correspondencias; Integración; Intermodalidad; Percepción.

**Sounds of eating: proposals for the crossmodal study between flavour and music**

## Abstract

The aim of this article is to propose an original synthesis of the correspondences between taste and other sensory modalities. For this, the authors present the concept of multisensory integration, understood as a process of correspondences and unity assumption, both facilitated by semantic congruence. Several studies that have investigated the taste/flavour perception and its correspondences are described. The main results found that specific sound parameters can modify the taste experience by adding significant pleasure to the consumer's eating and drinking experience. However, it is important to highlight the relevance of ecological validity in intermodal studies. The authors present several lines for future research. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Taste; Sound; Correspondences; Integration; Crossmodality; Perception.

## Introducción

Todas las modalidades sensoriales en el ser humano se encuentran integradas en el acto de comer y beber de forma tal que hacen que esa actividad aumente su intensidad hedónica. El individuo no sólo come para alimentarse o en situaciones sociales, sino también porque esta actividad le produce placer. Existen, en la actualidad, diversas ciencias y tecnologías que se han desarrollado para brindar más satisfacción en el acto de comer y beber.

Los sonidos se asocian al acto de comer de diversas maneras. Por un lado, se relacionan a la preparación de la comida, por ejemplo, al crujido de la sartén mientras fríe unas papas. Esto genera expectativas sobre el sabor que va a tener esta comida. Por otro lado, nuestra experiencia física mientras mordemos, masticamos o tragamos genera potencialmente información contextual sobre las claves del alimento e incluso información adicional somatosensorial

proveniente de la sensación bucal. Por ejemplo, nos brinda información sobre cuán carbonatada es una bebida, cuán crocante es una galleta, cuán cremoso es un chocolate (Spence, 2016). De esta manera, un ambiente ruidoso o una música agradable de fondo mientras se está comiendo pueden influenciar positiva o negativamente al acto de comer (Spence, 2015); es decir, los sonidos pueden influir en la percepción del sabor.

En este sentido, Areni y Kim (1993) y Spence (2016) mostraron que los consumidores que escucharon música clásica en una tienda de vinos gastaron más que cuando escuchaban otro tipo de música. También se ha exhibido

### \*Correspondencia:

Fernando Marmolejo-Ramos, [fernando.marmolejoramos@adelaide.edu.au](mailto:fernando.marmolejoramos@adelaide.edu.au)

Recibido: 1 de marzo de 2018

Aceptado: 7 de junio de 2018

Editor: Rubén Ardila

en estudios de mercado (**North, et al., 1999**), que aquellos individuos que escuchaban música francesa en comparación con música alemana compraban más vinos franceses que alemanes, y viceversa. En términos de música clásica y su relación con el comportamiento de las personas frente a la comida, **North, et al., (2003)** mostraron que los sujetos gastaban 10 % más mientras escuchaban música clásica ya que un ritmo rápido disminuye el tiempo de consumo (**Milliman, 1986**).

Estudios recientes han mostrado que parámetros específicos de sonidos pueden modificar la experiencia del gusto al agregar en forma significativa más placer a la experiencia de comer y beber del consumidor. Cuanto más gusta un sonido, más placer va a sentir la persona frente a un olor posteriormente presentado (**Seo y Hummel, 2011**). De esta manera, se produce una transferencia de un mecanismo activo, es decir, los sentimientos positivos que están asociados con la música son transferidos al placer asociado con la comida y bebida (**Reinoso Carvalho, et al., 2016a; Reinoso Carvalho, et al., 2016b**). No obstante, estos estudios se enfocaron en la selección de comidas y bebidas y no en su evaluación sensorial.

El objetivo de este artículo es proponer una síntesis original del proceso de correspondencia del sabor y otras modalidades sensoriales. Tales correspondencias pueden ser entendidas como transferencias de atributos desde una modalidad hacia otra modalidad. Por ejemplo, una música dulce refiere al gusto de un sonido, es decir que el atributo dulce se traslada desde la modalidad gustativa hacia la auditiva.

### La integración multisensorial

La integración multisensorial ocurre cuando estímulos en diferentes modalidades se presentan al mismo tiempo (**Spence, 2015**). La coincidencia espacial también facilita la integración multisensorial bajo ciertas condiciones (**Spence, 2013**). Así, los observadores tendrán la tendencia a inferir que los elementos nuevos tienen un origen espaciotemporal común y construirán una única representación de un objeto o evento multisensorial (**Bedford, 2001**). Por ejemplo, en la situación del cine (**Chen y Spence, 2017**) escuchamos voces que parecen salir de los labios que se mueven de un actor y de quien inferimos habla a través de una pantalla.

Cuando dos estímulos sensoriales de diferentes modalidades ingresan al sistema cognitivo, nuestro sistema perceptual debe computar si éstos provienen de una causa común o si son emergentes de causas diferentes. De esta manera, los estímulos serán integrados o procesados por separado, respectivamente. La suposición de la unidad es la creencia del observador que dos o más claves unisensoriales provienen del mismo objeto (**Chen y Vroomen, 2013**). Tal creencia, por parte del observador, sirve como un modulador cognitivo de la integración multisensorial y es, a su vez, el mecanismo por el cual el cerebro humano resuelve los problemas intermodales. Así, las señales de diferentes sentidos son codificadas como una única representación de un objeto o evento (**Spence, 2011**).

La integración multisensorial se ve facilitada por la congruencia semántica. Ésta se refiere a aquellas situaciones en las que pares de estímulos auditivos y visuales son presentados y varían, esto es, coinciden o no coinciden en términos de su identidad y significado. Por ejemplo, en un experimento se presentan una palabra escrita y un sonido de una palabra que no coincide con la palabra escrita (**van Atteveldt, et al., 2004**). En general, se presume que estímulos visuales y auditivos son integrados cuando son semánticamente congruentes, así, se observarán algunas formas de mejora en el comportamiento de los participantes o en la actividad cerebral, esto es, menor tiempo de reacción en las respuestas o mayor tasa de aciertos en identificación (**Chen y Spence, 2010**). Estudios recientes han investigado la congruencia semántica en otras modalidades sensoriales (**Velasco, et al., 2016**). Se ha estudiado la congruencia semántica entre las percepciones del sabor y palabras presentadas visualmente (**Razumiejczyk, et al., 2013; Razumiejczyk, et al., 2015**). Los resultados mostraron mayor facilitación intermodal en condición de congruencia, tanto en palabra completa, como incompleta y en anagramas.

La mayoría de los estudios en sus intentos de evaluar el impacto de la congruencia semántica en la percepción multisensorial han utilizado estímulos que, referidos a la misma categoría o concepto, no eran objetos o eventos que se podían hallar en la vida cotidiana de los participantes, es decir, los experimentos no poseían validez ecológica (**Chen y Spence, 2017**). Con la intención de incrementar la validez ecológica en tales experimentos, **Razumiejczyk, et al., (2017)** evaluaron la integración intermodal entre estímulos auditivos y del sabor en un experimento en el que se incorporó la participación de un experimentador que pronunciaba los estímulos auditivos en vez de un aparato auditivo. El experimentador se mantuvo constante entre los participantes y fue entrenado en el procedimiento para mantener constante también su desempeño en el procedimiento. Los resultados mostraron un menor tiempo de reacción y una mayor identificación en estímulos congruentes que en condiciones incongruentes y controles, en consistencia con estudios previos (**Razumiejczyk, et al., 2015**).

### Correspondencias intermodales

Las correspondencias intermodales reflejan la tendencia a asociar rasgos o dimensiones de estímulos aparentemente arbitrarios a través de los sentidos (**Spence y Deroy, 2013**). En tal caso, se asocian atributos o características que permanecen juntos, aunque no se tenga la creencia de que ellos ocurren juntos en el mismo objeto (**Chen y Spence, 2017**), a diferencia de la suposición de la unidad. Lo distintivo de las correspondencias intermodales es que operan independientemente de la suposición de la unidad y están sujetas a objetos que siguen siendo percibidos como distintos (**Deroy y Spence, 2016**). Las correspondencias son un tipo de interacción entre los sentidos, esto es, no requieren que los sentidos involucren el objeto o propiedad y puede ocurrir

incluso cuando dos objetos son percibidos como separados en el espacio y en el tiempo (Deroy y Spence, 2016). Esta capacidad puede explicar por qué las correspondencias se vuelven tan importantes en la adquisición del lenguaje en el sentido de que colaboran con el recuerdo y el establecimiento de la relación entre objetos, es decir, palabra oral y referencia visual (Matusz, et al., 2017).

El origen de las correspondencias es diverso. Se pueden distinguir que algunas correspondencias surgen de las regularidades del ambiente, por ejemplo, la correspondencia entre el sonido y el tamaño, o el sonido y la elevación. Otras se originan en percepciones estructurales similares, como por ejemplo, brillo y volumen. Otras correspondencias se originan en similitudes semánticas o hedónicas (Deroy y Spence, 2016).

Estos fenómenos se han venido estudiando desde hace más de 80 años. Sapir (1929) observó una correspondencia entre los sonidos vocales “i” y “a” y el tamaño de los objetos. La palabra sin sentido en inglés *mal* era asociada a objetos grandes, mientras que *mil* era asociada a objetos pequeños. Asimismo, la palabra *maluma*, era asociada a formas redondeadas y la palabra *takete*, a formas puntiagudas (Köhler, 1929). Se han estudiado las correspondencias entre las dimensiones sensoriales tales como timbres musicales y olores, formas y colores entre otros (Spence y Deroy, 2013). Se ha hallado que las correspondencias permanecen constantes entre los dominios sensoriales, esto es, la correspondencia entre formas y nombres permanece constante con formas y nombres de olores, gustos y sabores (Spence y Ngo, 2012). En estos casos, olores frutales y sabores dulces coincidieron con la palabra *maluma* y con formas redondeadas.

En la Figura 1 se esquematiza el procesamiento de los estímulos en la integración intermodal.

### Influencias de las correspondencias en la percepción del gusto/sabor

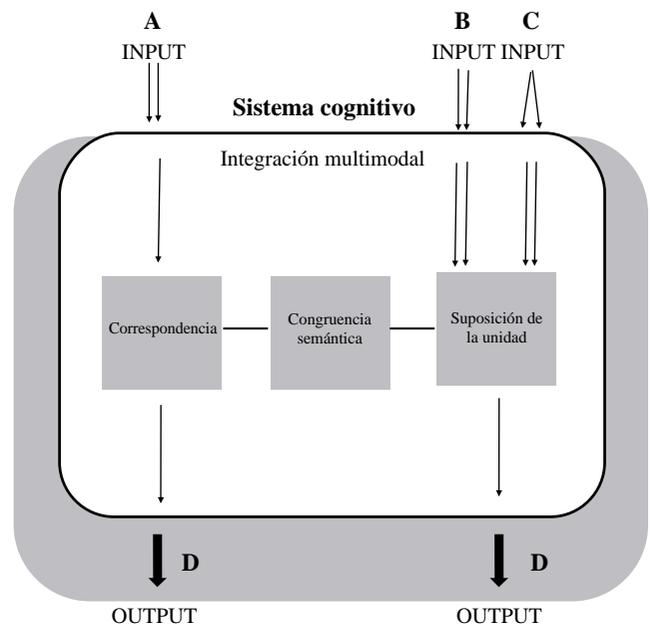
Diversos estudios han investigado la percepción del gusto/sabor y sus correspondencias. Tales estudios han hallado que el gusto dulce se corresponde con formas redondeadas y que los gustos salados, amargos y ácidos, con formas puntiagudas (Velasco, et al., 2016). En este sentido, se ha estudiado que el envoltorio de los productos alimenticios puede influir en las expectativas de los gustos del contenido; esto es, las personas buscan paquetes redondeados para gustos dulces, así como diseños angulares para gustos más ácidos (Lunardo y Livat, 2016). Asimismo, el sonido puede añadir un valor significativo, y placentero, a la experiencia del consumidor (Reinoso Carvalho, et al., 2016).

Estudios recientes han identificado asociaciones entre percepciones del sabor y auditivas. Crisinel y Spence (2009) hallaron una asociación entre el tono de los sonidos y los gustos amargos y ácidos. Los resultados mostraron una correspondencia entre tonos graves y gustos amargos y entre tonos agudos y gustos ácidos, aunque en sus experimentos

sólo nombraban los gustos y no los degustaban. Los autores explicaron el origen de estas asociaciones como señales de peligro. El gusto amargo se encuentra, en general, en los venenos y el gusto ácido refleja bajos niveles de pH en las sustancias. Los tonos agudos se asocian a alarmas y los tonos graves a objetos grandes (Parise y Spence, 2009). Los tonos graves pueden ser señal de peligro, por ejemplo, cuando se acerca un predador.

Mesz, et al., (2011) investigaron si los gustos básicos dulce, salado, amargo y ácido son asociados con parámetros en la producción musical inducidos por estos. Para ello, solicitaron a músicos expertos que improvisaran piezas musicales basadas en estas palabras y en un segundo experimento estudiaron si esas improvisaciones eran consistentes con las palabras de los gustos estudiados en la población general sin entrenamiento específico en música. Los resultados generales mostraron que las improvisaciones duraron 43,3 segundos en promedio. Asimismo, el gusto más placentero, dulce (Moskowitz, et al., 1974), se relacionó con altos valores de placeres psicoacústicos, que corresponden con la intensidad sonora suave y de baja rugosidad. La palabra ácido se relacionó con improvisaciones agudas, fuertes y disonantes que se corresponden con altos valores de agudeza sensorial.

Posteriormente, Crisinel Cosser, et al., (2012) estudiaron la influencia de la música en la evaluación de cuán dulce o amargo era un caramelo agritudle. Con la ayuda de una banda sonora produjeron piezas musicales dulces y



**Figura 1.** Integración intermodal: correspondencia, congruencia semántica y suposición de la unidad. **A.** Los estímulos provienen de un mismo tiempo, pero de objetos diferentes. **B.** Los estímulos provienen de un tiempo común, aunque de un objeto diferente. **C.** Los estímulos provienen simultáneamente de un mismo objeto. **D.** Las señales provenientes de diferentes sentidos son codificadas como una única representación de un objeto o de un evento.

amargas. Las piezas musicales amargas contenían predominantemente tonos bajos mientras que las dulces estaban compuestas por tonos altos (Crisinel y Spence, 2009; Mesz, *et al.*, 2011). Los resultados mostraron que los participantes que evaluaron el caramelo mientras escucharon la pieza de música dulce respondieron entre 5% y 10% más dulce que aquellos que escucharon música amarga. Estos hallazgos muestran que es posible utilizar la música para crear un percepto gustativo que no se encuentra presente en el acto de comer.

Los estudios previos se enfocan exclusivamente en el gusto. Sin embargo, en la construcción de la percepción del sabor se produce una integración intermodal entre la sensación del gusto y la sensación del olfato (Spence, 2013). Por esta razón, Reinoso Carvalho, *et al.*, (2016) quisieron estudiar si el sonido podía influenciar los atributos del sabor también, tales como la cremosidad y aspereza del chocolate. Los resultados mostraron que las piezas musicales cremosas elevaron los puntajes de cremosidad del chocolate en comparación con las piezas musicales ásperas que potencialmente disminuían la cremosidad percibida en éstos. Los resultados concluyeron que los sonidos tienen un efecto perceptual en la comida sin alterar su experiencia hedónica independientemente del hecho de que algunas personas prefieran algunos sonidos sobre otros (Wang y Spence, 2015). Del mismo modo, Reinoso Carvalho, *et al.*, (2016) estudiaron la influencia de la música y de la etiqueta de una cerveza con relación al gusto de una cerveza. Un primer grupo bebió la cerveza sin la etiqueta, el segundo grupo lo hizo con la etiqueta y el tercer grupo, con la etiqueta y con música (un fragmento de la canción *Oceans of light*). Los resultados mostraron que a las personas les tiende a agradar más la cerveza cuando la experiencia de interacción entre la música y el gusto es positivo y claro. En este sentido, los resultados fueron coherentes con los de Kantono, *et al.*, (2016) quienes reportaron que escuchar música puede influenciar a la percepción hedónica de la comida y la bebida.

## Conclusiones

El ser humano no sólo se alimenta para vivir, sino que además ha creado tecnologías para aumentar su intensidad hedónica (por ejemplo, intensificando el color de algunos alimentos y bebidas). También ha agregado más intensidad a otros sentidos complementarios, como es el caso de bebidas carbonatadas o alimentos crocantes cuyo crujido indica su cualidad, o incluso la música que acompaña los restaurantes y supermercados (Crisinel, *et al.*, 2012). Así, resulta posible utilizar la música para aumentar o disminuir la intensidad de un sabor. Del mismo modo, a nivel visual se ha estudiado que el envoltorio de los productos alimenticios puede influir en las expectativas de los gustos del contenido. Es decir, las personas buscan paquetes redondeados para gustos dulces y diseños angulares para gustos más ácidos. De este modo, puede afirmarse que el sabor es una integración de información que proviene de diversos canales sensoriales. Es posible utilizar recursos tecnológicos para operar sobre tal integración.

Es importante destacar la relevancia de la validez ecológica en los estudios intermodales. En tal sentido, hemos realizado aportes previos que pueden ser considerados complementarios con esta revisión (Razumiejczyk, *et al.*, 2017).

Del análisis del estado actual de este campo específico de estudios se pueden derivar varias líneas fructíferas de investigación. Algunas preguntas que podrían guiar futuros estudios son: ¿cuáles son los estímulos auditivos ecológicamente adecuados para formar parte de un experimento intermodal entre la audición y el sabor?, ¿es posible que una música dulce haga más dulce un sabor?, ¿es posible intensificar también el gusto amargo mediante la misma estrategia experimental?, ¿se puede reducir la intensidad de un gusto dulce mediante la exposición simultánea a una música amarga? Por su potencial aplicación es también relevante un conjunto de preguntas que relaciona los efectos intermodales de la música sobre la visión, por ejemplo, ¿puede una música dulce intensificar el sabor dulce a partir de la observación de la foto de un alimento dulce?, ¿se puede replicar este fenómeno intermodal con el gusto amargo a partir de música y fotos?

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en torno al desarrollo de la investigación.

## Contribución de los autores

Los autores declaran que contribuyeron en igual medida en este trabajo.

## Referencias

- Areni, C. S., Kim, D. (1993). The influence of background music on shopping behaviour: classical versus top-forty music in a wine store. *Advances in Consumer Research*. **20**: 336-340.
- Bedford, F. (2001). Towards a general law of numerical/object identity. *Current Psychology of Cognition*. **20**: 113-176.
- Chen, L., Vroomen, J. (2013). Intersensory binding across space and time: a tutorial review. *Attention, Perception and Psychophysics*. **75** (5): 790. Disponible en <http://dx.doi.org/10.3758/s13414-013-0475-4>
- Chen, Y. -C., Spence, C. (2010). When hearing the bark helps to identify the dog: Semantically-congruent sounds modulate the identification of masked pictures. *Cognition*. **114** (3): 389-404. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.012>
- Chen, Y. -C., Spence, C. (2017). Assessing the role of the 'unity assumption' on multisensory integration: A review. *Frontiers in Psychology*, **8**. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00445>
- Crisinel, A. S., Spence, C. (2009). Implicit association between basic tastes and pitch. *Neuroscience letters*. **464** (1): 39-42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2009.08.016>
- Crisinel, A. S., Cosser, S., King, S., Jones, R., Petrie, J., Spence, C. (2012). A bittersweet symphony: Systematically modulating the taste of food by changing the sonic properties of the soundtrack playing in the background. *Food Quality and Preference*. **24** (1): 201-204. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.08.009>

- Deroy, O., Spence, C.** (2016). Crossmodal correspondences: four challenges. *Multisensory research*. **29** (1-3): 29-48. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1163/22134808-00002488>
- Kantono, K., Hamid, N., Shepherd, D., Yoo, M. J., Grazioli, G., Carr, B. T.** (2016). Listening to music can influence hedonic and sensory perceptions of gelati. *Appetite*. **100**: 244-255. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2016.02.143>
- Köhler, W.** (1929). *Gestalt Psychology*. New York, Estados Unidos: Liveright.
- Lunardo, R., Livat, F.** (2016). Congruency between colour and shape of the front labels of wine: effects on fluency and aroma and quality perceptions. *International Journal of Entrepreneurship and Small Business*. **29** (4): 528-541. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1504/IJESB.2016.10000516>
- Matusz, P. J., Wallace, M. T., Murray, M. M.** (2017). A multi-sensory perspective on object memory. *Neuropsychologia*. **105**: 243. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.04.008>
- Mesz, B., Trevisan, M. A., Sigman, M.** (2011). The taste of music. *Perception*. **40** (2): 209-219. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1068/p6801>
- Milliman, R.E.** (1986). The influence of background music on the behavior of restaurant patrons. *Journal of Consumer Research*. **13** (2): 286-289. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1086/209068>
- Moskowitz, H. R., Kluter, R. A., Westerling, J., Jacobs, H. L.** (1974). Sugar sweetness and pleasantness: evidence for different psychological laws. *Science*. **184** (4136): 583-585. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1126/science.184.4136.583>
- North, A. C., Hargreaves D. J., McKeandrick, J.** (1999). The influence of in-store music on wine selections. *Journal of Applied Psychology*. **84** (2): 271-276. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1037/0021-9010.84.2.271>
- North, A. C., Shilcock, A., Hargreaves, D. J.** (2003). The effect of musical style on restaurant customers' spending. *Environment and behavior*. **35** (5): 712-718. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1177/0013916503254749>
- Parise, C.V., Spence, C.** (2009). When birds of a feather flock together: synesthetic correspondences modulate audiovisual integration in non-synesthetes. *PloS ONE*. **4**: e5664. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0005664>
- Razumiejczyk, E., Macbeth, G., Leibovich de Figueroa, N.** (2013). Interferencia entre el procesamiento de estímulos gustativos y estímulos visuales lingüísticos incompletos en la memoria operativa. *Revista Latinoamericana de Psicología*. **45**: 231-239
- Razumiejczyk, E., Macbeth, G., Marmolejo-Ramos, F., Noguchi, K.** (2015). Crossmodal integration between visual linguistic information and flavour perception. *Appetite*. **91**: 76-82. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2015.03.035>
- Razumiejczyk, E., Pereyra Girardi, C., Crivello, M. C., Fioramonti, M., Macbeth, G., Marmolejo Ramos, F.** (2017). Crossmodal interference between language and flavour. *Revista Latinoamericana de Psicología*. **49** (2): 91-101. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rlp.2016.01.002>
- Reinoso Carvalho, F. R., Velasco, C., van Ee, R., Leboeuf, Y., Spence, C.** (2016a). Music influences hedonic and taste ratings in beer. *Frontiers in psychology*, **7**. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00636>
- Reinoso Carvalho, F. R., Wang, Q. J., Van Ee, R., Spence, C.** (2016) b. The influence of soundscapes on the perception and evaluation of beers. *Food Quality and Preference*. **52**: 32-41. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.03.009>
- Sapir, E.** (1929). A study in phonetic symbolism. *Journal of Experimental Psychology*. **12** (3): 225. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1037/h0070931>
- Seo, H. S., Hummel, T.** (2011). Auditory-olfactory integration: Congruent or pleasant sounds amplify odour pleasantness. *Chemical Senses*. **36** (3): 301-309. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1093/chemse/bjq129>
- Spence, C.** (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*. **73** (4): 971-995. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3758/s13414-010-0073-7>
- Spence, C.** (2013). Just how important is spatial coincidence to multisensory integration? Evaluating the spatial rule. *Annals of the New York Academy of Sciences*. **1296** (1): 31-49. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/nyas.12121>
- Spence, C.** (2015). Multisensory flavor perception. *Cell*. **161** (1): 24-35. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2015.03.007>
- Spence, C.** (2016). Sound – the forgotten flavour sense, En B. Piqueras-Fiszman y C. Spence (Eds.), *Fundamental Neuroscience Through to the Marketplace* (pp. 81-105). Cambridge, Reino Unido: Elsevier.
- Spence, C., Deroy, O.** (2013). How automatic are crossmodal correspondences?. *Consciousness and cognition*. **22** (1): 245-260. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.concog.2012.12.006>
- Spence, C., Ngo, M. K.** (2012). Assessing the shape symbolism of the taste, flavour, and texture of foods and beverages. *Flavour*. **1** (1): 12. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1186/2044-7248-1-12>
- van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., Blomert, L.** (2004). Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron*. **43** (2): 271-282. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2004.06.025>
- Velasco, C., Salgado-Montejo, A., Elliot, A. J., Woods, A. T., Alvarado, J., Spence, C.** (2016). The shapes associated with approach/avoidance words. *Motivation and Emotion*. **40** (5): 689-702. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11031-016-9559-5>
- Velasco, C., Woods, A. T., Petit, O., Cheok, A. D., Spence, C.** (2016). Crossmodal correspondences between taste and shape, and their implications for product packaging: a review. *Food Quality and Preference*. **52**: 17-26. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.03.005>
- Wang, Q., Spence, C.** (2015). Assessing the effect of musical congruency on wine tasting in a live performance setting. *i-Perception*. **6** (3). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1177/2041669515593027>

# Propiedades ópticas y de transporte de sistemas electrónicos cuasi-unidimensionales

Ferney Javier Rodríguez Dueñas

Departamento de Física, Universidad de los Andes

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 9 de agosto de 2017

## Resumen

En el presente artículo se estudia la respuesta óptica y de transporte en sistemas de electrones interactuantes entre ellos y con potenciales externos. En la primera parte se analizará el caso de un electrón en interacción con un conjunto de potenciales localizados (potenciales  $\delta$ ), para calcular las propiedades electrónicas de sistemas cuasi-unidimensionales bajo diferentes tipos de desorden. En la segunda parte, se presenta un estudio de las propiedades ópticas de sistemas de muchos cuerpos altamente correlacionados y electrones interactuantes entre sí, con lo cual se demuestra la presencia de la singularidad de Fermi. En los dos casos se empleó y se demostró el método de las funciones de Green como técnica teórica efectiva para obtener resultados comparables con los experimentales. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Propiedades ópticas y de transporte; Sistemas de baja dimensionalidad; Sistemas de muchos cuerpos.

## Optical and transport properties of quasi-one dimensional electronic systems

### Abstract

In this paper we study the optical and transport properties of interactive electron systems both with external potentials and between them. In the first part, we analyze the electronic properties of quasi-unidimensional systems under different types of disorder for an electron interacting with a finite number of localized  $\delta$  potentials. In the second part, the results of the photoemission properties for a highly correlated many-body system, where electrons interact strongly with each other, show the presence of a Fermi-edge singularity. In both cases, we used and demonstrated the method of Green's functions as the effective theory to obtain results comparable to the experiments. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Optical and transport properties; Low dimensional systems; Many-body systems.

## Introducción

Los sistemas de materia condensada, como los sólidos, los líquidos y los gases, constituyen el laboratorio natural para estudiar las propiedades clásicas y cuánticas de la interacción entre la radiación y la materia. Específicamente en sistemas de estado sólido, los átomos están arreglados en estructuras muy ordenadas, o cristales. Estos cristales se pueden organizar de forma natural en estructuras tridimensionales que obedecen a ciertas formas básicas, las cuales ayudan a minimizar la energía de configuración. Se sabe que existen cinco formas básicas en estructuras bidimensionales y 18 en estructuras tridimensionales. Sin embargo, recientemente se han creado y fabricado estructuras unidimensionales que se han podido manipular en distintas dimensiones (desde 0 hasta tres dimensiones). En cualquier dimensión, estas estructuras tienen propiedades electrónicas ópticas y de transporte que no son explicables mediante teorías clásicas, y que han llamado la atención de los físicos experimentales y de los teóricos. Entre dichas propiedades

cabe mencionar las siguientes: 1) que los estados de energía están localizados en estructuras unidimensionales y no en dos o tres dimensiones (**P. W. Anderson**, 1958), y 2) que no existen transiciones de fase en sistemas unidimensionales a temperatura finita con interacciones de corto alcance (**L. D. Landau, E. M. Lifshitz**, 1980). Sin embargo, algunos resultados demuestran que puede controlarse la existencia de transiciones de fase en sistemas unidimensionales muy específicos bajo la presencia de campos externos unidimensionales (**Van Hove**, 1950; **D. Ruelle**, 1989, **J. A. Cuesta & A. Sánchez**, 2002).

Cuando se aumenta la dimensión, se presentan fenómenos como el paso de la luz a través de sistemas sólidos bidimensionales que contienen agujeros en sus estructuras. Este fenómeno es importante, pues se ha logrado demostrar

### Correspondencia:

Ferney Javier Rodríguez, [frodrigu@uniandes.edu.co](mailto:frodrigu@uniandes.edu.co)

**Recibido:** 13 de mayo de 2017

**Aceptado:** 29 de enero de 2018

**Editor:** Gabriel Tellez

experimentalmente que la luz incidente con una longitud de onda mayor que la del tamaño de los agujeros puede atravesar el sólido y no ser reflejada, como se esperaría que sucediera. La explicación teórica de este fenómeno se fundamenta en la distribución espacial de los agujeros en el sólido bidimensional (**Pendry**, 1993). Estos fenómenos tan raros y exóticos solo pueden explicarse mediante la teoría cuántica.

Por otra parte, se presentan fenómenos en los que muchas partículas, después de interactuar con pocos átomos, pueden llegar a organizarse de una forma colectiva y ser observables macroscópicamente, como sucede con la superconductividad y la condensación de Bose-Einstein, entre otros. Estas manifestaciones forman parte de un área muy interesante denominada “física de muchos cuerpos”. Son problemas de la ciencia de frontera que nos ofrece la naturaleza y cuyo estudio teórico y experimental es muy interesante.

El propósito de este artículo es estudiar algunos de dichos fenómenos de la física de muchos cuerpos que dan idea del alcance de la mecánica cuántica y de sus manifestaciones a nivel macroscópico, entre ellos, la forma en que el orden puede surgir del desorden. Una de las cuestiones más importantes es saber si cuanto más desordenado sea un sistema, más señales organizadas colectivamente y de largo alcance pueden aparecer, ya que no todo lo que se presenta de forma ordenada constituye la mejor posibilidad de obtener una propiedad colectiva. Para dar respuesta a estas preguntas se presentarán los resultados sobre transporte en sistemas de un solo cuerpo que interactúan con muchos potenciales y las propiedades ópticas en sistemas interactivos de muchos cuerpos modeladas por una interacción de contacto. Estos dos problemas se abordan mediante las técnicas de las funciones de Green (FG) para así establecer la conexión con los experimentos.

Primero, se presentan los estudios relacionados con la interacción de una partícula con muchos potenciales, los cuales pueden cambiar las propiedades de transporte. En particular, se calculan los coeficientes de transmisión y la densidad de estados en sistemas ordenados o desordenados. Dichos coeficientes son importantes para caracterizar estas propiedades en sistemas unidimensionales. En segundo lugar, se analiza una situación un poco diferente, en la que muchas partículas interactúan con un potencial cuasiuniforme, y se demuestra que, como fenómeno colectivo, las propiedades ópticas cambian mucho. Por último, se describe la teoría que conecta los fenómenos de transporte con los ópticos, se calcula el espectro de emisión de luz y se estudia la respuesta óptica de un hilo cuántico para un sistema cuasi-unidimensional que confina muchas partículas. En resumen, se exploran dos límites: sistemas de una partícula y de muchas. Algunos de estos resultados provienen de mi trabajo de tesis de pregrado y de doctorado en física, en la cual se resume una parte de mi actividad como científico en Colombia.

El artículo está organizado en diferentes secciones: inicialmente se presenta una muy breve motivación para estudiar los sistemas unidimensionales; se hace a continuación

una introducción al modelo teórico y se desarrolla la teoría que estudia los fenómenos de transporte desde el punto de vista de las matrices de transferencia para diferente número de potenciales de interacción. Después se introduce el concepto de funciones de Green y se demuestra su utilidad para calcular las propiedades ópticas y de transporte de un sistema de muchos cuerpos en interacción con un potencial producido por un hueco en la banda de valencia para, finalmente, presentar las principales conclusiones.

### Sistemas electrónicos unidimensionales

Con base en los avances tecnológicos de los últimos años, los sistemas unidimensionales en materia condensada se pueden construir de manera muy detallada, y permiten explorar vertientes muy interesantes de la física, por ejemplo, el bien conocido fenómeno de la inestabilidad de **Peierls** (1955). Peierls demostró que en sistemas unidimensionales metálicos, es decir, cuya banda de conducción esté parcialmente llena, los electrones pueden reducir colectivamente su energía cinética, de tal forma que por un rompimiento espontáneo de simetría, la banda de conducción se abre en bandas más pequeñas, totalmente llenas y completamente vacías, es decir que un sistema con estas propiedades puede pasar de metálico a semiconductor. Otros resultados demuestran que cuando la banda está a medio llenar, el estado fundamental es aislante, siempre y cuando la longitud de correlación de la interacción entre electrones se aumente (**Lieb & Wu**, 1968). También se ha demostrado que, a diferencia de los sistemas tridimensionales y bidimensionales, cuando el electrón interactúa con varios potenciales que varían su intensidad de forma aleatoria, o cuando los átomos con los cuales interactúa están dispuestos de forma aleatoria, los estados son localizados (**Anderson**, 1958). Pero la física en sistemas unidimensionales de carácter claramente metálico no necesariamente lleva a este tipo de transiciones. Se ha demostrado que en los sistemas magnéticos unidimensionales, los llamados compuestos A15, existen propiedades muy interesantes: cuando el nivel de Fermi se encuentra ubicado cerca del borde de una banda, se produce una transición de fase que se explica por el efecto Jahn-Teller, el cual permite entender el fenómeno de superconductividad a temperaturas altas críticas en algunos compuestos (**Jahn & Teller**, 1937; **Englman**, 1972).

Los resultados experimentales no son el único interés, pues los fenómenos que se predicen recurriendo a las nuevas teorías desarrolladas en el campo de los sistemas unidimensionales, en especial en los desordenados, han generado nuevas formulaciones que pueden aplicarse en diferentes áreas de la física. Por ejemplo, el desarrollo de técnicas computacionales para estudiar sistemas desordenados a gran escala, o perturbativas, en las cuales las funciones de Green (**Mahan**, 1990) constituyen una herramienta fundamental, al no tener que resolver directamente la ecuación de Schrödinger, e, incluso más, cuando se quiere estudiar la dinámica de un observable determinado. Las funciones de

Green permiten establecer un método directo para calcular observables que después pueden ser comparados con el experimento. En general, el problema de los sistemas desordenados y de muchos cuerpos ha sido un tema de gran interés teórico y experimental en la comunidad científica en las últimas décadas.

### Modelo teórico

En muchas situaciones de la física, se parte de un hamiltoniano que contenga la mayor cantidad de posibles interacciones y que se pueda resolver de la manera más exacta. Si se logra resolver, entonces es posible desarrollar nuevas técnicas teóricas para describir todas las interacciones mediante un modelo efectivo de una sola partícula no interactiva, pero cuya energía renormalizada tenga en cuenta las interacciones más importantes. El hamiltoniano siempre tendrá dos partes: una que corresponde al caso de una partícula libre, y otro término que corresponde a la interacción. Por ejemplo, si un electrón está dentro de un cristal tal que en cada posición haya un átomo que puede aceptar electrones o no, el electrón tendrá una parte de energía cinética que ocupará los niveles de energía permitidos por el cristal. De aquí surge el concepto de bandas de energía según el teorema de Bloch: los orbitales de una sola partícula se pueden asignar a un vector  $\vec{k}$  y a un índice de banda  $m$ . En un cristal perfecto, es decir, aquel en el que los átomos sean los mismos, o en el que estos se organicen en estructuras periódicas y, por lo tanto, exista una simetría de traslación, el hamiltoniano de una partícula no interactuante,  $H_0$ , se puede escribir como:

$$H_0 = \sum_{\vec{k}, j} E_j(\vec{k}) a_j^\dagger(\vec{k}) a_j(\vec{k}) \quad (1),$$

donde cualquier excitación se describe por medio de una banda  $j$  y un vector de onda  $\vec{k}$ , y pertenece a la primera zona de Brillouin, debido a la simetría de traslación. La energía  $E_j(\vec{k})$  se asocia con la  $(j, \vec{k})$  -ésima excitación, y  $a_j^\dagger(\vec{k})$  y  $a_j(\vec{k})$  son los operadores de creación y destrucción fermiónicos que satisfacen las relaciones de anticonmutación:

$$\{a_j(\vec{k}_1), a_m^\dagger(\vec{k}_2)\} = \delta_{j,m} \delta(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \quad (2).$$

Si se desea describir la física de un sistema complicado como si fuera el de una sola partícula, entonces la partícula se “viste” de todas las interacciones y adquiere una nueva energía, que puede ser compleja, y los operadores se convierten en unos nuevos que crean o destruyen las diferentes excitaciones. Esta imagen permite tratar el caso de electrones que interactúan con una red. La red se representa por una serie de sitios, y se describen, entonces, operadores que crean o destruyen excitaciones particulares en celdas unitarias del cristal, lo cual puede lograrse mediante una transformación a una base completa denominada funciones de Wannier (Wannier, 1962). Esta base tiene la característica que representa las funciones de Bloch sobre el espacio real de orbitales localizados y asigna como números cuánticos el vector de la red  $\vec{R}$  de la celda donde los orbitales están

localizados, junto con un índice de banda  $m$ . Usando esta transformación, el hamiltoniano se convierte en:

$$H_0 = \sum_{\alpha, l} E_\alpha(l) a_\alpha^\dagger(l) a_\alpha(l) \quad (3).$$

Si, además, se incluye la interacción entre partículas, esta se puede describir con el hamiltoniano  $H_1$

$$H_1 = \sum_{\alpha, \beta, l, m} V_{\alpha, \beta}(l, m) a_\alpha^\dagger(l) a_\alpha(m) \quad (4),$$

donde  $E_\alpha(l)$  corresponde a la energía de partícula libre y  $V_{\alpha, \beta}(l, m)$  representa el término de interacción, el cual depende de la celda unitaria  $l$  y de la posición relativa entre diferentes puntos de la red:  $\vec{R}(l) - \vec{R}(m)$ . Con el hamiltoniano total se pueden escribir las ecuaciones de Heisenberg en el tiempo para determinar las propiedades dinámicas o estacionarias de los operadores fermiónicos y deducir los estados de energía del sistema. Mediante la representación de Wannier se puede demostrar que los niveles de energía se describen a partir de una ecuación secular:

$$|(E - E_\alpha) \delta_{\alpha, \beta} - V_{\alpha, \beta}(\vec{k})| = 0 \quad (5);$$

en este caso, la transformación de Fourier en el espacio recíproco está dada por:

$$V_{\alpha, \beta}(\vec{k}) = \sum_j V_{\alpha, \beta}(j, m) e^{i\vec{k} \cdot [\vec{R}(j) - \vec{R}(m)]} \quad (6).$$

En general, y dependiendo del problema, se puede trabajar tanto en el espacio real como en el espacio recíproco. El primero es muy útil para problemas de transporte, en tanto que el segundo es fundamental para estudiar fenómenos ópticos.

### Transporte en sistemas unidimensionales

El estudio del comportamiento de un electrón en presencia de un potencial periódico uniforme se cuenta entre los problemas básicos en la física del estado sólido. Este problema se usa bastante para modelar una red perfecta de átomos dispuestos en un arreglo determinado como primera aproximación. Un arreglo periódico de potenciales lleva a lo que conocemos usualmente como modelos tipo Kronig-Penney (Kronig & Penney, 1931). En particular, cuando se quieren describir potenciales atómicos de corto alcance se usan como modelos los potenciales de tipo  $\delta$ . Asimismo, estos potenciales pueden emplearse para simular impurezas en cristales periódicos. Para un cristal con muchas impurezas, como sucede en los sistemas reales, la solución total y exacta del problema se vuelve complicada e inmanejable, por lo que, claramente, se requieren una serie de aproximaciones para comenzar a entender la física del problema.

Uno de los trabajos pioneros en sistemas desordenados unidimensionales fue el trabajo de Anderson, “Absence of diffusion in certain random lattices” (1958), en el cual se ocupó del problema del movimiento de un electrón en un potencial desordenado. Anderson demostró por primera vez el fenómeno denominado posteriormente como “localización de Anderson”. Las conclusiones principales se fundamentan

en que si la intensidad del desorden es débil, las funciones de onda se comportarán como las de una onda plana, pero sobre una escala de longitud corta. La longitud sobre la cual la fase de la función de onda difiere apreciablemente de la de una onda plana, se denomina ruta de camino libre medio. Sin embargo, cuando el desorden aumenta progresivamente, las fluctuaciones en la amplitud de probabilidad comienzan a ser grandes. Cuando estas fluctuaciones son del orden de la separación entre átomos, o mayor, las amplitudes de las funciones de onda asociadas a los estados propios del sistema comienzan a decaer exponencialmente, produciendo así estados localizados. Es de esperar que, físicamente, los estados localizados aparezcan cuando la longitud libre del camino medio se compara con la longitud de onda del electrón.

Para ilustrar este concepto más fácilmente, se puede pensar en escribir la función de onda en un potencial periódico perfecto como:

$$\Psi(\vec{r}) = A(\vec{r})e^{i\phi(\vec{r})},$$

donde la amplitud  $A(\vec{r})$  es una función periódica de  $\vec{r}$  y la fase  $\phi(\vec{r}) = \vec{k} \cdot \vec{r}$  presenta una coherencia perfecta. Sin embargo, si el desorden existe, tanto la amplitud como la fase se deberían ver afectadas. Si el desorden es débil, se asume que la amplitud no varía mucho, pero sí la fase. Se puede, entonces, hacer un promedio estadístico de las fluctuaciones de la fase, y así se demuestra el término:

$$\langle e^{i(\phi(\vec{r})-\phi(0))} \rangle \approx e^{-\frac{|\vec{r}|}{l}},$$

donde  $l = v_F \tau$  es la longitud de coherencia de la fase para una velocidad de Fermi  $v_F$  y un tiempo de recorrido libre medio  $\tau$ . A partir de esta fórmula se ve claramente que la coherencia de fase se pierde en un punto  $\vec{r}$  que esté a una distancia mayor o igual a la longitud de coherencia. La importancia de la demostración de Anderson es que permite ver cómo los estados evolucionan hacia estados extendidos cuando el desorden se incrementa. A partir de este trabajo aparecen conceptos como la localización de la función de onda, la fractalidad, los ejes de movilidad en los bordes de zona, etc., los cuales comenzaron a estudiarse ampliamente en la física teórica y experimental de sistemas desordenados. El desorden afecta tanto la densidad de estados como las funciones de onda.

Con el fin de ilustrar este fenómeno más detalladamente con un modelo sencillo, en este trabajo se soluciona el problema de una partícula en presencia de una o dos impurezas muy localizadas de dos maneras: mediante la función de onda y mediante la función de Green. La diferencia entre estas dos técnicas es que la segunda permite tener una imagen física más detallada y más comparable con los experimentos.

### Potencial $\delta$ en una dimensión

Para comenzar a entender el fenómeno de localización, se soluciona el problema de una partícula libre en interacción con un potencial localizado de tipo  $\delta$ , es decir  $V(x) = V_0 \delta(x)$ . Al solucionar la ecuación de Schrödinger para un potencial

repulsivo, la función de onda se deslocaliza, y cuando el electrón interactúa con dicho potencial, se produce un corrimiento de fase y el coeficiente de transmisión puede llegar a ser uno.

La ecuación de Schrödinger para un electrón se escribe como ( $\hbar = 1$ , masa del electrón  $m = 1$ ):

$$-\frac{d^2\psi(x)}{2dx^2} + V_0\delta(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad (7).$$

En el caso de energías en las que  $E > 0$ , las partículas libres se dispersan debido a la interacción con el potencial y las soluciones a las funciones de onda, con  $E = \frac{k^2}{2}$ , se pueden escribir como:

$$\psi^\pm(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ e^{\pm ikx} + \frac{V_0}{ik - V_0} e^{ik|x|} \right] \quad (8).$$

Con base en la teoría de la dispersión (*scattering*), se pueden identificar claramente los coeficientes de transmisión y reflexión,  $T(k) = \frac{k^2}{k^2 + V_0^2}$  y  $R(k) = \frac{V_0^2}{k^2 + V_0^2}$  y deducir que, como es de esperar, cuanto mayor sea la energía de la partícula, la probabilidad de transmisión aumenta y la de reflexión disminuye; además, estos coeficientes son independientes del signo del potencial. Sin embargo, el caso más interesante aparece cuando consideramos el caso de energías en las que  $E < 0$ . En este caso la solución a la ecuación de Schrödinger es:

$$\Psi(x) = |V_0|e^{-V_0|x|},$$

y para una energía  $E_0 = -\frac{V_0^2}{2}$ , se obtiene un estado ligado. Esta solución, tanto para la función de onda como para la energía, es muy parecida a la de un átomo de hidrógeno en tres dimensiones. Si, por el contrario, el potencial es atractivo, la función de onda se localiza cerca del potencial y se produce un estado ligado. Se presentan, así, características interesantes, como el concepto de estados ligados o localizados.

En resumen, se ha demostrado que un potencial genera un único estado ligado, sin importar la intensidad que pueda tener la constante  $V_0$  y que, entonces, no pueden existir estados excitados. Si se le proporciona esta energía a una partícula atrapada en un potencial de tipo  $\delta$ , lo único que puede suceder es que la partícula quede completamente libre y, por lo tanto, pase a ocupar estados excitados de un continuo de energías.

### Dos potenciales de tipo $\delta$

El problema cuya solución se busca corresponde al incremento del número de centros que pueden dispersar al electrón. En este caso, el sistema es más interesante, ya que podemos controlar separadamente dos potenciales: de manera repulsiva y atractiva. Se asume una distancia de separación entre ellos:

$$V(x) = V_1 \delta(x) + V_2 \delta(x - a).$$

Al solucionar la ecuación de Schrödinger con las apropiadas condiciones de frontera, se obtienen los resultados para los coeficientes de reflexión y transmisión:

$$r = 2i \frac{ka[V_1 e^{-ika} + V_2 e^{ika}] + V_1 V_2 \sin(ka)}{(2ik - V_1)(2ik - V_2)e^{-ika} - V_1 V_2 e^{ika}} \quad (9)$$

$$t = \frac{-(2k)^2 e^{-ika}}{(2ik - V_1)(2ik - V_2)e^{-ika} - V_1 V_2 e^{ika}} \quad y \quad (10)$$

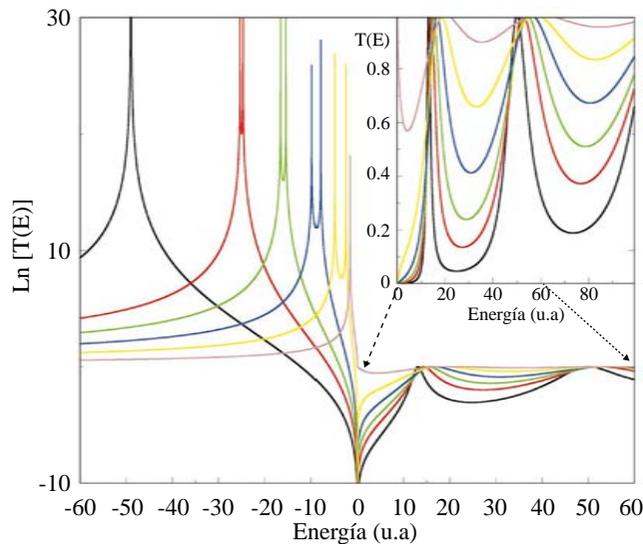
Cuando el denominador de los coeficientes de reflexión,  $r$ , o de transmisión,  $t$ , llegan a cero, se encuentran los polos o estados ligados. Si se hace un cambio de variables:  $V_i \rightarrow -V_i$  y  $k \rightarrow ik$ , se encuentra una solución que se puede escribir como:

$$(2k - V_1)(2k - V_2) = V_1 V_2 e^{-2ka} \quad (11)$$

En la figura 1, se muestran los resultados para los coeficientes de transmisión. Cuando la intensidad del potencial es muy pequeña o muy grande, solamente se observa un estado ligado, lo cual correspondería a tener el equivalente de un solo potencial. Sin embargo, existe un régimen intermedio de energías en el cual se pueden observar dos estados ligados. Es decir, las soluciones confirman que nuestro resultado analítico es correcto: como máximo pueden existir dos estados ligados. Para  $E \geq 0$ , el número de ceros se puede incrementar, pero el máximo valor del coeficiente de transmisión debe ser uno. Cada cero del denominador de  $r$  o  $t$  nos indica las energías de resonancia.

### Varios potenciales $\delta$

En las secciones anteriores se ha demostrado que se pueden crear estados ligados en sistemas de uno y dos potenciales  $\delta$ , o no. Ahora ampliamos el problema: se simula un cristal en el cual puede haber  $N$  potenciales  $\delta$ . Dicho sistema corresponde a un cristal perfecto en el cual se introducen impurezas. Se supone que un electrón de masa  $m$  incide sobre la red de potenciales, cuya intensidad puede variar de forma aleatoria, y como resultado de la interacción la onda



**Figura 1.** Logaritmo natural de los coeficientes de transmisión para intensidades de potencial  $V_1 = V_2 = -14$  (curva negra),  $-10$  (curva roja),  $-8$  (curva verde),  $-6$  (curva azul),  $-4$  (curva amarilla),  $-2$  (curva marrón). En el recuadro se muestran los resultados del coeficiente de transmisión para energías positivas.

asociada al electrón comienza a reflejarse y a transmitirse produciendo fenómenos de interferencia múltiple, descrita como una superposición lineal de funciones de onda que entran y salen después de interactuar con el  $i$ -ésimo potencial. Para resolver este problema se usó un modelo estudiado en la física matemática (**Morse & Feshbach**, 1953), y también en óptica cuántica (**Born & Wolf**, 1963), que se denomina el formalismo de matriz de transferencia.

El hamiltoniano de este sistema se puede escribir como:

$$\hat{H} = \hat{T} + \sum_{i=1}^N \hat{V}_i \delta(x - x_i),$$

donde  $\hat{T}$  representa el operador de energía cinética,  $\hat{V}_i$ , y el potencial de interacción, el  $i$ -ésimo potencial de tipo  $\delta$  (positivo o negativo) en la posición  $x_i$ . Para cada una de las  $n + 1$  zonas en las cuales existe un potencial  $\delta$  en la posición  $N$ , la función de onda se puede escribir como:

$$\psi_n(x) = A_n e^{ikx} + B_n e^{-ikx} \quad x_n \leq x \leq x_{n+1} \quad (12),$$

donde  $k$  es el vector de onda asociado a la energía de la partícula  $E = k^2$ , definido en esta parte del artículo como  $\frac{\hbar^2}{2m} = 1$ . Teniendo en cuenta que para el caso de potenciales de tipo  $\delta$ , la función de onda debe ser continua y la derivada discontinua, se puede llegar a demostrar que los coeficientes, antes y después de interactuar con el  $n$ -ésimo potencial  $\delta$ , están relacionados como:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{11} e^{-ika} & m_{12} e^{ika} \\ m_{21} e^{-ika} & m_{22} e^{ika} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-ika} & 0 \\ 0 & e^{ika} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

En general este sistema se puede escribir como:

$$\hat{C}_n = \hat{M} \hat{D} \hat{C}_{n+1} = \hat{Q} \hat{C}_{n+1} \quad (14)$$

donde

$$\begin{aligned} m_{11} &= \left(1 + \frac{iV_n}{k}\right), & m_{12} &= \frac{iV_n}{k}, \\ m_{21} &= m_{12}^*, & m_{22} &= q_{11}^*, \\ d_{11} &= e^{-ika}, & d_{12} &= 0, \\ d_{21} &= 0, & d_{22} &= e^{ika}. \end{aligned}$$

En la ecuación 14, la matriz de coeficientes  $\hat{C}_n$  puede escribirse en términos de una matriz  $Q$ , que a su vez se descompone en dos matrices,  $M$  y  $D$ , las cuales dan cuenta de la interacción y de la periodicidad espacial de la red. Por lo tanto, si se quieren evaluar los coeficientes de transmisión para una red de  $N$  potenciales, es necesario calcular la matriz  $Q^N$ . Suponiendo por el momento que todas las intensidades de los potenciales son iguales:  $V_n = V_0$ , y combinando esto con los resultados de la óptica cuántica, esta matriz se puede escribir como (**Born & Wolf**, 1963):

$$\hat{Q}^N = \begin{bmatrix} m_{11} U_{N-1}(y) - U_{N-2}(y) & m_{12} U_{N-1}(y) \\ m_{21} U_{N-1}(y) & m_{22} U_{N-1}(y) - U_{N-2}(y) \end{bmatrix},$$

donde  $U_N(y)$  representan los polinomios de Tchebychev de segunda clase y es una variable que tiene en cuenta la estructura de bandas de un sistema unidimensional perfecto, descrita por:

$$y = \text{Re}[m_{11} e^{-ika}] = \cos(ka) + \frac{V_0}{k} \sin(kd) \quad (15)$$

En el modelo se han usado condiciones de periodicidad de cadena cerrada, lo que quiere decir que las funciones de onda se vuelven continuas y su derivada discontinua cuando se une el sitio 1 de la cadena con el N. Esta aproximación se justifica plenamente cuando el número de sitios de la cadena es grande. Bajo esta condición, la variable  $\theta$  está relacionada con los valores de energía para los cuales el polinomio de Tchebychev puede calcularse. Este polinomio se puede expresar como  $U_N(x) = \frac{\sin(N+1)\theta}{\sin(\theta)}$  con  $x = \cos(\theta)$ . Claramente,  $\theta$  tendría sentido en el rango de  $[-1,1]$ . Si el argumento de esta función está afuera de este rango, los polinomios no están definidos. Físicamente significa que los estados de energía no son permitidos y, por lo tanto, se presenta una estructura de bandas y brechas de energía. En la figura 2 se ha graficado el coeficiente de transmisión que claramente muestra zonas cuyo valor es 1 (transmisión perfecta) para un sistema finito de  $N=10$  potenciales, y otras zonas que valen cero. Estas zonas representan estados de energía prohibidos. En el lado derecho se representa la variable  $y$  (ecuación 15), la cual da cuenta de los valores para los cuales se puede encontrar entre  $[1,-1]$ .

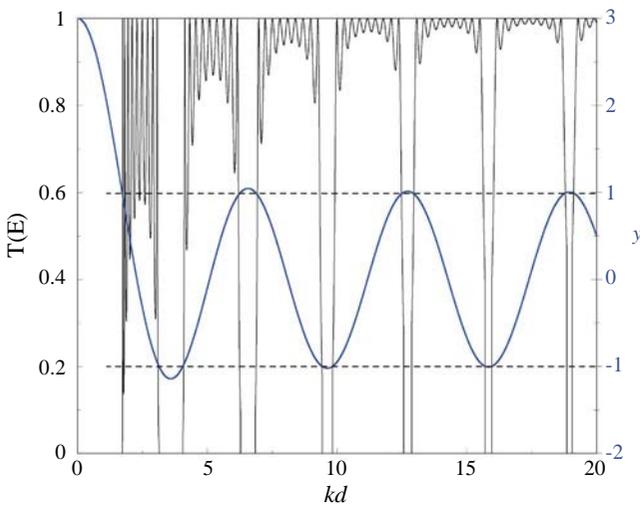
Con estas propiedades es posible calcular analíticamente las amplitudes de los coeficientes de transmisión y reflexión para un sistema de N potenciales

$$t_N = \frac{e^{-ikNd}}{U_N(y) - m_{11}U_{N-1}(y)e^{-ikd}} \quad (16)$$

$$r_N = -\frac{m_{12}^*U_{N-1}e^{ikNa}}{U_N(y) - m_{11}U_{N-1}(y)e^{-ikd}} \quad (17)$$

y el coeficiente de transmisión para cualquier  $\delta_N$  potencial es:

$$|T_N(y)|^2 = \frac{1}{1 + |m_{12}|^2 U_{N-1}^2(y)}$$



**Figura 2.** El lado izquierdo del eje representa los coeficientes de transmisión, el lado derecho, el argumento del polinomio de Tchebychev (Ec. (15)). Cuando este valor es mayor que 1 o menor que -1, se encuentra una brecha, de lo contrario, los estados son permitidos. Las líneas punteadas sirven como referencia para observar cuándo sale del rango.

Este sistema ya se puede perturbar con una o varias impurezas. Sin embargo, hacer un cálculo en términos de matriz de transferencia se puede convertir en algo mucho más complicado matemática y numéricamente. Por lo tanto, se usó una técnica muy bien estudiada, las funciones de Green, las cuales permiten estudiar de manera mucho más clara sistemas perfectamente ordenados, así como sistemas desordenados.

## Funciones de Green

Hasta este punto se han estudiado algunos sistemas que presentan un orden (sistemas infinitos) y algunos sistemas finitos de pocos potenciales  $\delta$ , que ilustran el fenómeno de localización y deslocalización de la función de onda. Aunque este es un modelo muy simple, sin duda da una idea de lo que puede suceder en sistemas más complejos con muchos potenciales de tipo  $\delta$ , organizados ya sea de forma regular o aleatoria. Estos modelos idealizados han suscitado mucho interés, pues, aunque son sencillos, son importantes para entender la física del problema. Una primera solución analítica del problema de transporte en sistemas desordenados fue la propuesta por **Dyson** (1953), quien, teniendo en cuenta una cadena unidimensional desordenada, pudo encontrar una expresión para la densidad de estados usando el método de las funciones de Green (FG). Este modelo general se aplicó a un sistema clásico de masas diferentes y unidas por resortes. Aunque el modelo no puede explicar efectos cuánticos, el formalismo teórico sí puede emplearse. Con esta metodología se desarrolló el uso de las matrices de transferencia (**Schmidt**, 1957), y se pudieron obtener resultados muy parecidos a los ya publicados por **Dyson**. La esencia de estos dos métodos es la posibilidad de calcular las matrices de transferencia que tienen una analogía muy cercana con la matriz de transmisión. Cuando estas técnicas se usan en sistemas de muchos potenciales, se puede demostrar que el espectro presenta brechas de energía (**Hori**, 1968). Además, es posible calcular la densidad de estados, la que, por razones conceptuales, es muy importante para describir la posible ocupación de estados de energía, pero no es muy accesible desde el punto de vista experimental. Sin embargo, se describe el método requerido, ya que son muchos los observables que pueden obtenerse de las funciones de Green.

En este trabajo se presenta la teoría de las funciones de Green independientes del tiempo, con el fin de estudiar fenómenos que se encuentren en el régimen estacionario. En general, la función de Green puede escribirse como:

$$(z - L(r)) G(r,r',z) = \delta(r - r'),$$

donde esta función depende de dos puntos espaciales,  $r,r',z = \lambda + is$ , y  $L(r)$  es un operador diferencial hermítico tal que

$$L(r) \phi_n(r) = \lambda_n \phi_n(r),$$

y el conjunto completo de funciones propias del operador,  $L(r)$  y  $\phi_n(r)$ , satisfacen las condiciones de frontera de la  $G(r,r')$  y son ortonormales. Si todos los valores propios de

$z - L$  son diferentes de cero, entonces puede escribirse la FG en términos de los valores propios de energía, tanto los discretos como los continuos, de la siguiente manera:

$$G(z) = \sum_m \frac{|\phi_m\rangle\langle\phi_m|}{z - L} = \sum_n \frac{|\phi_n\rangle\langle\phi_n|}{z - \lambda_n} + \int dec \frac{|\phi_{ec}\rangle\langle\phi_{ec}|}{z - \lambda_{ec}},$$

donde las sumas y las integrales corren sobre estados discretos y estados continuos de energía, respectivamente.

Primero se aplica este formalismo al caso de un potencial  $\delta$  considerando un hamiltoniano  $H$ , que puede ser el de una partícula libre o el de una partícula en un medio perfecto de potenciales de tipo  $\delta$ . La ecuación para la FG es:

$$(E - H)G(x,y;E) = \delta(x - y).$$

Si los estados propios de  $H$  son  $E_n$  y las funciones propias se denotan por  $\psi_n(x)$ , entonces,

$$G(x, y; z) = \sum_n \frac{\psi_n(x)\psi_n(y)^*}{E - E_n} \quad (18)$$

Para el caso de un potencial  $\delta$ , el hamiltoniano se escribe como  $H = H_0 + \lambda(x)\delta(x)$ .  $H_0$  puede ser el hamiltoniano de partícula libre o de un cristal perfecto, es decir, un  $H$  que se puede resolver exactamente. Suponiendo que la función de Green asociada al hamiltoniano  $H_0$  es  $G_0(x,y;E)$ , entonces  $G_0(E) = \frac{1}{E - H_0}$ . La FG asociada a  $H$  puede escribirse como:

$$\begin{aligned} G(E) &= \frac{1}{E - H} = \frac{1}{E - H_0 - \lambda\delta(x)} = \frac{1}{G_0^{-1} - \lambda\delta(x)} \\ &= G_0(E)[1 - G_0(E)\lambda\delta(x)]^{-1} \\ &= G_0(E) + G_0(E)\lambda\delta(x)[G_0(E) + G_0(E)\lambda\delta(x)G_0(E) \dots] \\ G(E) &= G_0(E) + G_0(E)\lambda\delta(x)G(E). \end{aligned}$$

Esta ecuación es similar a la ecuación de **Dyson** y puede representarse en el espacio real mediante la relación de completitud como:

$$\begin{aligned} \langle x|G(e)|y \rangle &= G(x, y; E) = \langle x|G_0(E)|y \rangle + \\ &\int dz dz' \langle x|G_0(E)|z \rangle \langle z|\lambda\delta(x)|z' \rangle \langle z'|G(E)|y \rangle \\ G(x, y; E) &= G_0(x, y; E) + \\ &\lambda \int dz G_0(x, z; E)\delta(z)G_0(z, y; E) \end{aligned}$$

Si se supone que  $x = 0$ , y se usan las propiedades de la función  $\delta$ , se puede escribir de forma más simplificada como:

$$\begin{aligned} G(0, y, E) &= \frac{G_0(0, y; E)}{1 - \lambda G_0(0, y; E)} \\ G(x, y; E) &= G_0(x, y; E) - \frac{G_0(x, 0; E)G_0(0, y; E)}{G_0(0, 0; E) - \frac{1}{\lambda}}. \end{aligned}$$

Las ecuaciones descritas representan, en general, la función de Green en dos sitios (**Rodríguez**, 1988), lo cual depende mucho de la FG calculada para un medio conocido,  $G_0(0,0)$ . Es evidente que si se considera una partícula libre, es posible observar la presencia de un polo en la FG, es decir, cuando  $G_0(0,0;E) = \frac{1}{\lambda}$ . En este caso,  $H_0 = \frac{k^2}{2m}$  y las funciones propias de este hamiltoniano son ondas planas, por lo tanto,

$$G_0(x, y; E) = \int \frac{dk e^{ik(x-y)}}{2\pi E - k^2} \quad (20)$$

Es especialmente importante calcular los polos, los cuales se definen usando la función de Green  $G(0,0;E)$ . Esta integral es muy sencilla de resolver, y se encuentra que,

$$G(0,0; E) + \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2k} + \frac{1}{\lambda} = 0, \quad (21)$$

$$E_B = -\frac{\lambda^2}{2}, \quad (22)$$

donde se ha asumido que para estados ligados  $k = \sqrt{-2E}$ . Por lo tanto, el potencial debe ser atractivo para que existan estados ligados, lo que confirma los resultados teóricos ya presentados. Se puede calcular exactamente la FG de una partícula libre resolviendo la ecuación 20, y se obtiene:

$$G_0(x, y; E) = -\frac{ie^{ik|x-y|}}{2\sqrt{E}} \quad (23).$$

Esta función vale tanto para un sistema continuo como para uno discreto (con  $x = na$ ), siendo  $n$  un entero y  $a$  la separación de los puntos de red. El procedimiento se puede extender al caso de dos potenciales de tipo  $\delta$ , pero, en este caso, tomando como hamiltoniano el siguiente:

$$H = H_0 + \lambda\delta(x) + \lambda\delta(x - a) = H_0^1 + \lambda\delta(x - a) \quad (24)$$

La ventaja de separar este hamiltoniano con el término  $H_0^1$  es que ya conocemos la FG para él. Después del álgebra necesaria, esta se puede calcular como:

$$G(x, y; E) = G_0^1(x, y) - \frac{G_0^1(x, a)G_0^1(a, y)}{G_0^1(a, a) - \frac{1}{\lambda}} \quad (25)$$

donde  $G_0^1(x, y)$  es la FG ya calculada para el caso de una partícula libre. Con la expresión arriba descrita, se pueden calcular los polos de la FG como ( $G(0,0)=G(x,x)$ ):

$$G_0^1(a, a) - \frac{1}{\lambda} = G_0(a, a) + \frac{G_0(a, 0)G_0(0, a)}{\frac{1}{\lambda} - G_0(0, 0)} - \frac{1}{\lambda}, \quad (26)$$

$$\left[ \frac{1}{\lambda} - G_0(0, 0) \right]^2 - G_0(a, 0)G_0(0, a) = 0$$

Mediante las definiciones de  $G(x,y,E)$ , y teniendo que  $G_0(0,0) = -\frac{1}{2k}$ , se puede demostrar que para obtener los polos se debe resolver una ecuación de tercer orden dada por

$$k^3 + \lambda k^2 + \frac{\lambda^2}{4}k - \frac{\lambda^2}{8} = 0.$$

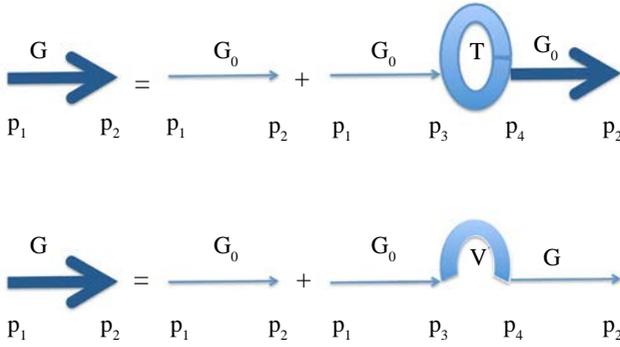
Es evidente que el método de las funciones de Green puede dar una idea más clara de los estados ligados y, también, de la densidad de estados. Si se conoce la FG de un medio, en principio se podría calcular la FG para un sistema perturbado, como lo describe la ecuación 19, la cual admite una representación gráfica más intuitiva, representada por el diagrama de Feynman (figura 3).

Dicha ecuación también puede escribirse en términos de operadores como:

$$G = G_o + G_o TG_o \quad (27),$$

$$G = G_o + G_o VG \quad (28),$$

donde  $T$  representa la matriz de transferencia y  $V$  está asociado al potencial. Usando esta formulación podemos calcular la FG de un modelo unidimensional periódico no perturbado.



**Figura 3.** Propagador de Feynman que tiene en cuenta la matriz de transferencia o la interacción particular

### Función de Green de un medio periódico no perturbado

Se calcula a continuación la FG de un medio que obedece una periodicidad espacial en una dimensión. Se considera un sistema de  $N$  átomos en un arreglo unidimensional de longitud  $L$  y de constante de red tal que cada sitio de la red esté descrito por un potencial  $\delta$ :

$$V = \sum_n V_{0n} \delta(x - na).$$

Con la ecuación 23, pero escribiéndola en la base discreta y realizando su transformada de Fourier, se tiene que:

$$\begin{aligned} G_L(k) &= \sum_{n'} G_L(n, n') e^{ika|n-n'|} \\ &= \sum_{n'} \frac{-ie^{i\sqrt{E}a|n-n'|}}{2\sqrt{E}} e^{ik|n-n'|} \end{aligned} \quad (29)$$

$$G_L(k) = \frac{1}{2\sqrt{E}} \frac{\sin(\sqrt{E}a)}{\cos(\sqrt{E}a) - \cos(ka)} \quad (30)$$

Con esta FG de partícula libre,  $G_L$ , en el espacio real y en  $k$ , se puede calcular la FG del medio periódico perfecto,  $G_0$ , usando las fórmulas de la ecuación 28:

$$G_0(k) = \frac{G_L(k)}{1 - V(k)G_L(k)} = \frac{1}{2\sqrt{E}} \frac{\sin(\sqrt{E}a)}{P} \quad (31)$$

$$P = \cos(\sqrt{E}a) - \cos(ka) + \frac{V_0}{2\sqrt{E}} \sin(\sqrt{E}a) \quad (32)$$

Los ceros de la función  $P$ , determinarán los polos de la FG y, por lo tanto, las bandas y las brechas de energía. Al transformar de forma inversa, se puede calcular la FG local, así:

$$G_0(n, n) = G_0(0) = -\frac{1}{2\sqrt{E}} \frac{\sin(\sqrt{E}a)}{\sqrt{R}} \quad (33)$$

$$R = \left[ \cos(\sqrt{E}a) + \frac{V_0}{2\sqrt{E}} \sin(\sqrt{E}a) \right]^2 - 1 \quad (34)$$

### Función de Green de un medio periódico con perturbaciones: desorden

Como ya se mencionó, el desorden es una situación común en cualquier sistema realista de estado sólido. Uno de los sistemas experimentales de mayor interés consiste en aleaciones binarias donde los “átomos” son colocados aleatoriamente sobre los sitios regulares de la red. Estos sistemas han llamado mucho la atención y se han estudiado ampliamente con base en diferentes teorías (Faulkner, 1970, Buttler, 1976).

El interés se ha centrado especialmente en el cálculo de la densidad local de estados del sistema, la cual está directamente relacionada con la parte imaginaria de la FG, como:

$$\rho(E) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \int G(x, x; E) dx.$$

Según se ha demostrado, la FG se puede calcular exactamente para un modelo unidimensional periódico de potenciales de tipo  $\delta$ . Sin embargo, cuando existe desorden, por ejemplo en aleaciones, la FG debe calcularse como el promedio estadístico de diferentes tipos de configuraciones de todo el sistema. Para calcular dicho promedio, se usan varios métodos que se pueden agrupar en dos familias: perturbativos y autoconsistentes. Cualquiera de ellos resulta bastante complicado computacionalmente, por lo que se prefieren algunos métodos más rápidos y efectivos, especialmente los que recurren a aproximaciones: la aproximación de cristal virtual (VCA), la aproximación promedio de la matriz de transferencia (ATA) y la aproximación de potencial coherente (CPA), las cuales se describen brevemente a continuación.

1. VCA: en esta aproximación se separan las correlaciones que puedan existir entre el potencial y la FG, es decir, se asume que en la ecuación 28:

$$\begin{aligned} \langle G \rangle &= G_p + G_p \langle V G \rangle \approx G_p + G_p \langle V \rangle \langle G \rangle \\ \langle G \rangle &= \frac{G_p}{1 - \langle V \rangle G_p}, \end{aligned}$$

donde  $G_p$  es la FG promedio del medio que se conoce y el promedio  $\langle V \rangle = \sum_{i=1,2} c_i \langle V_i \rangle$ ,  $c_i$  es la concentración de potenciales de tipo  $i$  tal que  $\sum_{i=1}^2 c_i = 1$ . Físicamente, esto significa que todo el sistema tiene en promedio un potencial  $\langle V \rangle$ , lo cual se da sencillamente sumando un potencial promedio al potencial del medio perfecto o periódico. Por lo tanto, bajo esta aproximación, los estados que producen las impurezas se mezclan con los estados del continuo, y no debería observarse un gran cambio en la densidad de estados.

2. ATA: esta aproximación va un poco más allá de la VCA. Se usa la primera fórmula del propagador en la ecuación 28 y se promedia la matriz de transferencia para cada átomo  $i$  de la aleación binaria  $a, b$ , así,

$$\begin{aligned} \langle G \rangle &= G_p + G_p \langle T G_p^i \rangle \approx G_p + G_p^i \langle T^i \rangle \langle G_p^i \rangle, \\ \langle T \rangle &= c_a t_a + c_b t_b ; t_i = \frac{\langle V_m^i \rangle}{1 - \langle V_m^i \rangle G_p(m, m)}, \end{aligned}$$

donde se ha tomado como  $\langle V_m^i \rangle = \langle V \rangle - \langle V_m^i \rangle$  y la FG  $G_p(m, m)$  está asociada a un centro de dispersión, lo cual ya fue calculado en la sección [transporte]. Este método es

muy interesante porque permite definir un medio efectivo de potencial,  $\Sigma$ , que está directamente relacionado con la matriz promedio de transferencia,

$$\Sigma = \frac{\langle T \rangle}{1 + \langle T \rangle G_{VCA}(m, m)} = \frac{c_a c_b (\langle V_a \rangle - \langle V_b \rangle)^2 G_{VCA}(m, m)}{1 + (\langle V_a \rangle - \langle V_b \rangle)(c_a - c_b) G_{VCA}(m, m)} \quad (35)$$

es decir, las FG calculadas mediante las aproximaciones ATA y VCA están correlacionadas, solamente que se toma un corrimiento en la energía dada por  $\Sigma$ :  $G_{ATA}(E) = G_{VCA}(E - \Sigma)$ . Debe señalarse, asimismo, que cuando las concentraciones  $c_i$  son muy bajas, el medio no tiene mucho efecto y los resultados de la aplicación de las dos aproximaciones deberían ser los mismos.

3. CPA: esta aproximación es perturbativa y, además, autoconsistente. En esta aproximación la FG promedio se calcula usando un hamiltoniano efectivo, el cual se caracteriza por la creación de un potencial efectivo periódico que depende de la energía y usualmente puede ser complejo. Por lo general, este modelo toma el medio totalmente desordenado y lo reemplaza por un medio que tenga la misma matriz efectiva de transferencia  $\langle T \rangle$  en todos los sitios. Como resultado, se puede demostrar que cada sitio de la red está descrito por un potencial promedio (complejo), y que en el origen de la cadena puede estar presente una impureza real  $a$  o  $b$ ; es decir que la CPA es realmente una aproximación por sitio.

Aquí se muestran los resultados más importantes de la aproximación CPA. Para una explicación más detallada del problema, se asume que el sistema unidimensional se subdivide en pequeñas celdas tales que  $n_a = L/N$ , donde  $n$  es un número entero arbitrario. La concentración de los sitios será  $1/n$  y estos están aleatoriamente ocupados.

En la figura 4 se presentan los resultados de la densidad de estados para diferentes concentraciones de desorden  $x$ . La curva negra representa el modelo unidimensional totalmente ordenado ( $x = 1$ ) y corresponde a la parte imaginaria de la FG (ecuación 34), y en ella aparecen claramente la brecha y las singularidades de Van Hove en los bordes de banda. Cuando aumenta el desorden ( $x = 0,7$ ), se produce un corrimiento de banda y muchos de los estados que estaban en ella aparecen como ‘minibandas’ en las regiones en donde antes había brechas. En el caso del modelo altamente desordenado ( $x = 0,02$ ), el carácter unidimensional permanece muy cerca del borde de banda, pero la densidad de estados de energía se convierte en una sola banda.

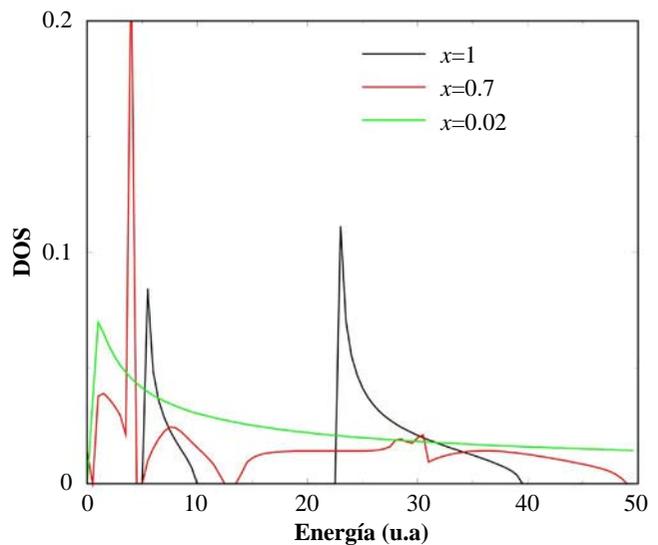
Para finalizar esta parte del artículo, la pregunta es: ¿para qué sirve calcular una densidad de estados y unos coeficientes de transmisión, ya que estos no se miden experimentalmente? La respuesta es que ello obedece a que así se pueden obtener las propiedades de transporte tales como la conductancia electrónica de una forma muy directa a partir de las cantidades ya calculadas.

Por ejemplo, la conductancia en sistemas unidimensionales según Landauer (1970), se puede escribir como:

$$g \approx \frac{e^2}{h} \int dE \left( -\frac{dn_f}{dE} \sum_E |T(E)|^2 \right) \quad (36)$$

donde  $g$  es la conductancia y  $n_f$  es la distribución de Fermi-Dirac. Estas fórmulas generalmente pueden escribirse desde un punto de vista cuántico en el cual un sistema cualquiera responde a un estímulo externo como un campo eléctrico. Es posible, bajo el mismo formalismo de la FG, estudiar las funciones de correlación de campos y deducir tanto propiedades ópticas como de transporte (Mahan, 1990; Kubo, Hasegawa, Hashitsume, 1959)

Con las ideas básicas sobre la FG ya discutidas, se presentan ahora los resultados de las propiedades ópticas en sistemas unidimensionales. Se considera un sistema de muchos electrones interactivos, los cuales comienzan a interactuar con un potencial muy fuerte producido por un hueco en la banda de valencia. En este caso, tenemos un problema similar a los anteriores, en el cual las impurezas simulan el potencial creado por una perturbación externa. Este problema fue inicialmente formulado por Mahan (1967) en sistemas aislantes tridimensionales. Se predecía que se podía crear un estado ligado entre un electrón y un hueco bajo el umbral de absorción óptico. Con el fin de resolver este problema, se consideró la presencia de un excitón en semiconductores de brecha directa, en donde la banda de conducción pueda considerarse como un sistema de Fermi degenerado. La pregunta que debería resolverse era: ¿cómo un excitón normal podría interactuar con un mar de Fermi de muchas partículas? A diferencia de lo comentado



**Figura 4.** Densidad de estados como función de la energía para un sistema unidimensional del tipo de Kronig-Penney en el cual las impurezas se colocan de forma desordenada. El potencial de contacto es  $V_0 = 8$  para diferentes tipos de concentración de impurezas. Curva negra: (ordenado); curva roja: (parcialmente desordenado); curva verde: (muy desordenado)

en las secciones anteriores, este problema no corresponde a uno de una partícula individual, sino a uno de muchos electrones que interactúan bajo la presencia de un potencial externo. Es decir, es un problema de muchos cuerpos, y es la base para estudiar las propiedades ópticas de sistemas unidimensionales realistas tales como los de hilos cuánticos.

### Propiedades ópticas de muchas partículas

La conductividad eléctrica puede calcularse usando la fórmula de Kubo (Mahan, 1990; Kubo, Hasegawa, Hashitume, 1959), la cual tiene en cuenta la correlación entre dos operadores de corriente  $\hat{j}$  y está escrita como la FG retardada  $\pi(\omega)$ :

$$\pi(i\omega_n) = -\frac{1}{3V} \iint_0^\beta d\tau e^{i\omega_n \tau} \langle \hat{j}(\tau) \hat{j}(0) \rangle \quad (37),$$

donde  $i\omega_n \rightarrow \omega + i\sigma$  y  $\beta$  es el inverso de la temperatura. La conductividad se puede calcular como  $\sigma = \lim_{\omega \rightarrow 0} [\text{Im} \frac{\pi(\omega)}{\omega}]$ . La parte real de la función de correlación está relacionada directamente con el proceso de absorción óptica y puede calcularse como:

$$\text{Re} \sigma(\omega) = -\frac{\text{Im} \pi(\omega)}{\omega} \quad (38)$$

El hamiltoniano del sistema que tiene en cuenta las interacciones entre muchas partículas, se puede escribir como:

$$H = \sum_k \frac{k^2}{2m_e} a_k^\dagger a_k - \sum_k \left[ E_g + \frac{k^2}{2m_h} \right] b_k^\dagger b_k + \sum_{k,k'} V(k-k') a_k^\dagger a_k b_{k-k'} b_{k'}^\dagger \quad (39)$$

donde  $E_g$  es la brecha de energía, y  $a_k^\dagger$  y  $b_k^\dagger$  representan los operadores de creación de electrones de conducción y valencia, respectivamente. La interacción entre los electrones de conducción puede tenerse en cuenta usando un formalismo de renormalización de la energía, que para nuestro caso no tendrá muchos efectos, pues la densidad electrónica es muy alta. Con el hamiltoniano ya escrito se puede calcular la función de correlación de Kubo para  $\pi(i\omega)$ , cuando la interacción es nula:

$$\begin{aligned} \pi(i\omega) &= -\frac{1}{V} \sum_k p_k^2 \int_0^\beta d\tau e^{i\omega \tau} \langle T_\tau a_k(\tau) b_{-k}(\tau) b_{-k}^\dagger(0) a_k^\dagger(0) \rangle \\ &= -\frac{1}{V} \sum_k p_k^2 \frac{1}{\beta} \sum_{ik_1} G_e(k, ik_1) G_h(-k, i\omega - ik_1) \\ &= -\frac{1}{V} \sum_k p_k^2 \frac{1 - n_f(E_e(k)) - n_f(E_h(k))}{i\omega - E_e(k) - E_h(k)} \end{aligned} \quad (40)$$

donde  $p_k = \langle e, k | \vec{\epsilon} \cdot \vec{p} | h, k \rangle$  representa el elemento dipolar óptico que tiene en cuenta la interacción de la luz con la materia.  $G_{e,h}(k) = \frac{1}{ik - E_{e,h}(k)}$  representa las mismas funciones de Green calculadas anteriormente para electrones y huecos, respectivamente.  $n_f(E_e(k))$  y  $n_f(E_h(k))$  representan las funciones de Fermi, tanto para electrones como para huecos. Es muy fácil calcular la absorción óptica como:

$$\begin{aligned} A^0(\omega) &= -2\text{Im}[\pi^0(\omega)] = \int dk \mu_k^2 \delta\left(\omega - E_g - \frac{k^2}{2\mu}\right) \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{\theta(\omega - E_g)}{\sqrt{\omega - E_g}} \end{aligned} \quad (41),$$

donde  $\mu$  es la masa reducida del electrón y el hueco. Aquí se hace evidente que el espectro de absorción óptica es proporcional a la densidad de estados del sistema.

En la figura 5 se detalla el proceso de absorción por el cual el sistema es excitado con muchas frecuencias que van desde la brecha de energía  $E_g$  hasta el borde superior de estados de energía  $E_g + E_F$ .

Sin embargo, el problema empieza a complicarse cuando se considera que la banda de conducción es ocupada por un mar de Fermi de electrones. Entonces la interacción entre electrón y hueco es apantallada por las interacciones entre electrón y electrón del mar de Fermi. En este caso es necesario calcular una serie de diagramas de Feynman que van más allá del primer diagrama mostrado, en el cual se calcula la absorción sin interacción (figura 6).

Matemáticamente, estos diagramas se pueden escribir usando la función de Green (Rodríguez, 1994) en la ecuación 28, pero ahora representada en el espacio de momentum  $k$ , como:

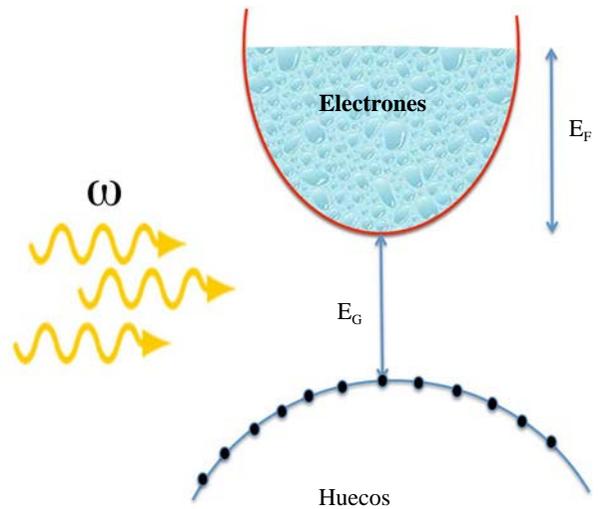
$$G_{n_v, n_c'}^{n_c, n_c'}(k, k', \omega) = G_{n_v, n_c}^0(k, -k, \omega) \delta_{n_v, n_v'} \delta_{n_c, n_c'} \delta_{k+k'} +$$

$$\frac{1}{L} \sum_{n_v'', n_c'', k''} G_{n_v, n_c}^0(k, -k, \omega) V_{n_v, n_v''}^{n_c, n_c''}(k - k') G_{n_v'', n_c''}^{n_c'', n_c'}(k'', k', \omega).$$

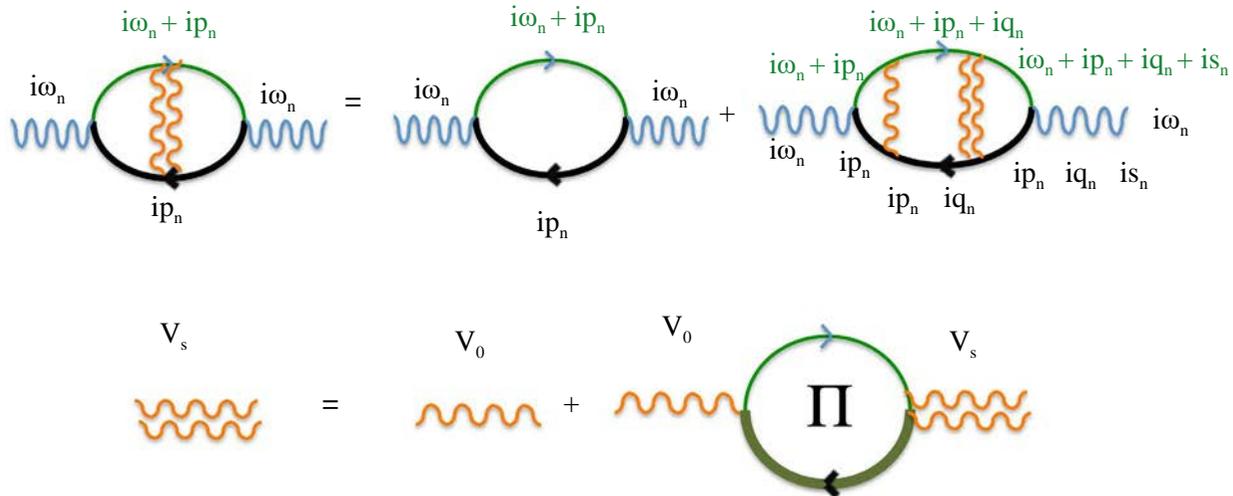
Esta ecuación también se conoce como la ecuación de Bethe-Salpeter. La interacción está descrita como:

$$\begin{aligned} V_{n_1, n_2}^{n_3, n_4}(k - k') &= \sum_{n_5, n_6} \frac{V^0(k) \epsilon_{n_2, n_5}^{n_1, n_6} \epsilon_{n_2, n_4}^{n_3, n_6}(k, 0)}{\epsilon_{n_2, n_4}^{n_5, n_6}(k, 0)} \\ \epsilon(k, \omega)_{n_1, n_2}^{n_3, n_4} &= \delta_{n_1, n_3} \delta_{n_2, n_4} - \chi_{n_1, n_2}(k, \omega) V^0(k)_{n_1, n_2}^{n_3, n_4} \end{aligned} \quad (42),$$

donde la primera ecuación describe que la interacción directa  $V^0$  entre el electrón y el hueco está apantallada por



**Figura 5.** Interacción de la luz de frecuencia  $\omega$  con un semiconductor dopado tipo  $n$ . Los electrones de la banda de conducción pueden someterse a excitación con una frecuencia  $E_g + E_F$ , y el mar de Fermi puede absorber luz de la energía de Fermi o emitir luz desde el borde inferior de la banda de conducción o desde el nivel de Fermi.



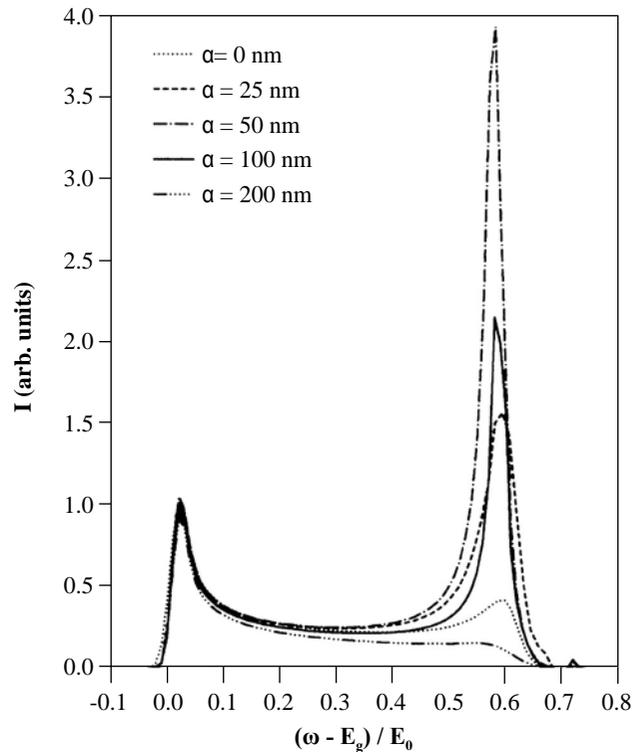
**Figura 6.** Diagramas de Feynman que se deben calcular para tener en cuenta las interacciones del hueco de la banda de valencia con los electrones del mar de Fermi

la constante dieléctrica del mar de Fermi de electrones  $\epsilon$ . Es decir, tanto el electrón como el hueco ven un medio efectivo de electrones que puede tener excitaciones de todas las clases, como, por ejemplo, plasmones de frecuencia  $\omega$ . Para resolver de forma más sencilla esta ecuación, se supondrá que, al igual que en el caso del transporte de electrones, la interacción efectiva es un potencial  $\delta$  en el espacio  $k$ , es decir:  $V_{n_c, n_v}^{n_c, n_v}(k - k') = U_{0, n_v}^{0, n_c} \delta(k, k') \delta(n_v'', n_c'')$ . De esta forma, se llega a un modelo muy simple que ilustra la presencia de un estado ligado descrito por la siguiente ecuación:

$$G_{0,0}^{0,0}(\omega) = \frac{G_{0,0}^{0,0}(\omega)}{1 - U_{0,0}^{0,0} G_{0,0}^{0,0}(\omega)} \quad (44).$$

El hueco podría considerarse, entonces, como un centro de dispersión de electrones, y el espectro óptico podría describirse fácilmente por los desplazamientos de fase de los electrones del fondo de la banda de conducción y de los que están ceca al nivel de Fermi. En la figura 7 se muestra el espectro de fotoemisión para un sistema con una energía de Fermi  $E_f \approx 4\text{meV}$  y a una temperatura  $T = 2^\circ \text{K}$  (Rodríguez, 1994, Rodríguez & Tejedor, 1993).

Se detectan dos picos: el de más baja energía representa la emisión de luz por la recombinación de pares de electrón y hueco que están en la brecha de energía. La forma demuestra claramente la singularidad de Van Hove típica de sistemas unidimensionales, la cual viene determinada por la densidad unidimensional de estados. El segundo pico demuestra el comportamiento colectivo de muchos cuerpos al nivel de la energía de Fermi. Este efecto se detectó experimentalmente (Calleja, Goñi, Pinczuk, Dennis, Weiner, Pfeiffer, West, 1995) en sistemas unidimensionales y nuestra teoría explica muy bien dichos resultados: se produce una rápida creación de pares de electrón y hueco en la banda de conducción que, acoplados con el hueco de la banda de valencia, les permiten un mecanismo eficiente de recombinación llevando al comportamiento singular del espectro de emisión conocido como singularidad de Fermi.



**Figura 7.** Singularidad de la energía de Fermi para diferentes anchos de un hilo unidimensional. Cuanto más ancho sea el hilo, más disminuye la interacción, y, por lo tanto, la singularidad se hace menos evidente.

**Conclusiones**

En este trabajo se ha demostrado la utilidad de las funciones de Green en sistemas unidimensionales para describir tanto las propiedades de transporte como las ópticas en sistemas de materia condensada. El formalismo permite realizar cálculos teóricos que pueden compararse directamente con

los resultados experimentales. Aunque los coeficientes de transmisión son difíciles de obtener experimentalmente, estos están directamente relacionados con la conductancia electrónica, que sí es fácil de medir experimentalmente. Con esta técnica es posible calcular las propiedades de transporte más complicadas, incluido el desorden. Se demostró que cuando estos efectos se incluyen, se producen estados en las brechas de energía que dan cuenta del fenómeno de localización. Se calcularon los espectros de emisión de luz en estos sistemas y se demostró que se obtienen dos singularidades que compiten en intensidad: una asociada al carácter puramente unidimensional de partículas que no interactúan y otra que se asocia al fenómeno colectivo de interacción de muchas partículas. Se usó el mismo formalismo para el estudio de las propiedades de transporte como de las ópticas con funciones de Green representadas en el espacio real y recíproco, respectivamente. Se demostró la presencia de estados ligados tanto en sistemas de pocas partículas como en los de muchas.

### Agradecimientos

En este artículo se resumen de forma muy breve y parcial los trabajos que he venido realizando conjuntamente con tres profesores, colegas y amigos que han contribuido a mi formación como científico: Luis Quiroga, amigo, excelente profesor y un gran colega, quien ha marcado mi ruta como físico desde mi pregrado hasta la fecha; Carlos Tejedor, quien colaboró en mi proceso de formación en el doctorado y con quien seguimos colaborando, y Neil Johnson, con quien hemos podido colaborar para expandir nuestro conocimiento y aplicarlo en otras áreas de la física. Por último, a la Universidad de los Andes, institución que con su apoyo ha posibilitado que estas investigaciones se lleven a cabo con estudiantes y colaboradores nacionales e internacionales.

### Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo original.

### Referencias

- Anderson, P. W.** (1958). Absence of Diffusion in Certain Random Lattices. *Phys. Rev.* **109**: 1492.
- Born, M & Wolf, E.** (1963). Principles of optics. The Mac Millan Company, New York.
- Buttler, W. H.** (1976). One-dimensional model for transition metals and their alloys. *Phys. Rev. B.* **14**: 468.
- Calleja, J. M., Goñi, A. R. , Pinczuk, A., Dennis, B. S., Weiner, J. S., Pfeiffer, L. N., West, K. W.** (1995). Optical Fermi-edge singularities in a one-dimensional electron system with tunable effective mass. *Phys Rev B.* **7**: 4285.

- Cuesta, J. A. & Sánchez A.** (2002). A theorem on the absence of phase transitions in one-dimensional growth models with on-site periodic potentials. *J. Phys. A: Math. Gen.* **35**: 2373.
- Dyson, F. J.** (1953). The Dynamics of a Disordered Linear Chain. *Phys. Rev.* **92**: 1331.
- Englman, R.** (1972). The Jahn-Teller Effect in Molecules and Crystals. Wiley Interscience, New York.
- Faulkner, J. S.** (1970). Electronic States of a Liquid Metal from the Coherent-Potential Approximation. *Phys. Rev. B.* **1**: 934.
- Hori, J.** (1968). Spectral Properties of Disordered Chains and Lattices. Pergamon, London.
- Jahn, H. A. & Teller, E.** (1937). Stability of Polyatomic Molecules in Degenerate Electronic States. I. Orbital Degeneracy. *Proc. R. Soc. A.* **161**: 220.
- Kronig, R. & Penney W.G.** (1931). Quantum Mechanics of Electrons in Crystal Lattices. *Proc. Roy. Soc. A* **130**: 499.
- Kubo, R., Hasegawa, H., Hashitsume, N.** (1959). Quantum Theory of Galvanomagnetic Effect. I. Basic Considerations. *J. Phys. Soc. Jpn.* **14**: 56.
- Landau, L. D. & Lifshitz, E. M.** (1980) Statistical Physics I. Pergamon Press, New York.
- Landauer, R.** (1970). Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices. *Phil. Mag.* **21**: 863.
- Lieb, E. H. and Wu F. Y.** (1968). Absence of Mott Transition in an Exact Solution of the Short-Range, One-Band Model in One Dimension. *Phys. Rev. Lett.* **20**: 1445.
- Mahan, G. D.** (1990). Many particle physics. 2 ed. Plenum Press.
- Mahan, G. D.** (1967). Excitons in Degenerate Semiconductors. *Phys. Rev.* **153**: 882.
- Morse, P. M. & Feshbach, H.** (1953). Methods of theoretical physics. New York, McGraw-Hill.
- Pendry, J. B.** (1993). Photonic Band Structures. *J. Mod. Optics.* **41**: 209.
- Peierls, R. E.** (1955). Quantum theory of solids. Clarendon, Oxford.
- Rodríguez, F. J.** (1994). Propiedades ópticas de sistemas unidimensionales. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Madrid.
- Rodríguez, F. J.** (1998). Propiedades de sistemas electrónicos unidimensionales. Tesis de Pregrado. Uniandes.
- Rodríguez, F. J. & Tejedor, C.** (1993). Fermi-edge singularities in the optical absorption and emission of doped indirect quantum wires. *Phys. Rev. B.* **47**: 13015.
- Schmidt, H.** (1957). Disordered One-Dimensional Crystals. *Phys. Rev.* **105**: 425.
- Wannier, G. H.** (1962). Dynamics of Band Electrons in Electric and Magnetic Fields. *Rev. Mod. Phys.* **34**: 645.
- van Hove, L.** (1950). Sur l'intégrale de Configuration Pour Les Systèmes De Particules À Une Dimension. *Physica.* **16**: 137 (reprinted in Lieb and Mattis, 1966, 28). Ruelle, D. (1989). Statistical Mechanics: Rigorous Results (Reading: Addison-Wesley).

# Evolution of the structural ordering of the $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$ perovskite as a function of temperature

Yury Parada<sup>1,\*</sup>, Carlos Parra<sup>1</sup>, Fania Caicedo<sup>1</sup>, David A. Landínez Téllez<sup>2</sup>, Jairo Roa-Rojas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Física de Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

## Abstract

The polycrystalline ceramic of  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  was synthesized by the conventional solid-state reaction. The used synthesis route differed from others reported in the literature, as we used SrO instead of  $\text{SrCO}_3$  as the Sr precursor. Studies of the X-ray diffraction (XRD) pattern obtained by means of the Rietveld refinement using the code of the Generalized Structure Analysis System (GSAS) software were performed. The analyses revealed that the crystal structure was tetragonal in space group P4/mnc at temperatures from 100 to 600° C, and changed to a cubic structure with space group Fm-3m at temperatures between 800 and 1,000° C. The temperature dependence of the lattice parameter was also discussed. The study of this material is important given its multiferroic properties. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** X-Ray diffraction; Structural and phase changes.

## Evolución del ordenamiento estructural de la perovskita $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$ en función de la temperatura

### Resumen

El material cerámico policristalino  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  se sintetizó mediante el método convencional de reacción en estado sólido. La ruta de síntesis usada difirió de otras reportadas en la literatura en que se usó SrO en lugar de  $\text{SrCO}_3$  como precursor del Sr. Los patrones de difracción de rayos X obtenidos a temperaturas entre 25 y 1.400 °C se estudiaron mediante el método de refinamiento de Rietveld con el programa *Generalized Structure Analysis System* (GSAS). Los resultados revelaron que la estructura era tetragonal con el grupo espacial P4/mnc a temperaturas entre los 100 y los 600 °C, y cambió a una estructura cúbica con el grupo espacial Fm-3m a temperaturas entre los 800 y los 1.000 °C. Se discute, asimismo, la dependencia del parámetro de red en función de la temperatura. El estudio de este material es importante dadas sus propiedades multiferróicas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Difracción de rayos X; Cambios estructurales y de fase.

## Introduction

The perovskite  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  (SSMO), which belongs to the double perovskite family (Ortiz-Díaz, 2007) was synthesized and characterized by Ivanov (2009) (Cheah, *et al.*, 2006), who reported it as a ferroelectric material in the tetragonal phase space group (s. g.) I4/m. Majhi, *et al.* (2007) studied the structure of the polycrystalline ceramic SSM synthesized at room temperature. They found that this material crystallizes in a pure phase belonging to the I4mm space group. The material undergoes a structural phase transition from I4mm to Pm3m space group at about 725 K (Fesenko, 1972), and a second phase transition from ferroelectric in I4mm space group to paraelectric behaviour in the I4/mmm space group at 431 K (Foster, *et al.*, 1997; Politova, *et al.*, 1990).

Cheah, *et al.* (2006) showed that this perovskite had a tetragonal structure with I4/m space group and changed to a cubic symmetry above 550 °C (space group Fm-3m).

Furthermore, it has been reported that the crystal structure is tetragonal within the temperature range of 2 to 750 K (s. g. I4/m) and cubic above 750 K (s. g. Fm-3m) (Baral & Varma, 2009; Ivanov, *et al.*, 2009).

In the present work we report the synthesis and structural characterization of the  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  material using SrO instead of the commonly used  $\text{SrCO}_3$ . With this sintering process we established that the suitable precursor for perovskite production was strontium oxide, as no impure phases were identified in the carbonate diffractograms. The X-ray diffraction (XRD) pattern showed that the experimental diffractograms fitted with three reported space groups. Therefore, there is need for a careful analysis of the structural arrangement of material at different temperatures, as

\*Corresponding autor:

Yury Parada, [yury.parada@uptc.edu.co](mailto:yury.parada@uptc.edu.co)

Received: 4 de December 4, 2017

Accepted: March 15, 2018

Editor: Pedro Fernández de Córdoba

well as refining each group, to clarify the real crystallization structure using the GSAS code for the Rietveld refinement. The analysis showed that for these three possible structural groups R [F<sup>2</sup>] and  $\chi^2$  values were very similar, but the best fit of the primitive tetragonal structure was for P4/mnc space group (Figure 1).

The aim of this work is to report results of XRD studies of the SSMO complex perovskite at different temperatures, with careful refinements of experimental patterns, which were carried out by using the GSAS code, using a variety of models for space groups with the same extinction conditions.

### Materials and methods

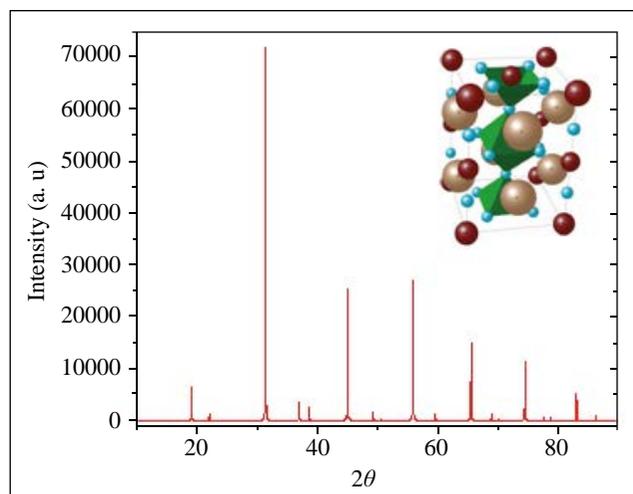
Polycrystalline samples of Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> ceramic powder were prepared through the conventional solid-state reaction route. Stoichiometric amounts of SrO (99.9%), Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.999%) and Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.999%) were mixed and grinding in an agate mortar for 2 hours. Then, the mixture powder was pressed under 2.5 ton/cm<sup>2</sup> to form pellets of 1 cm diameter. The pellets were then calcined at room temperature until reaching 1200 °C for 10 hours. This temperature was maintained for 100 hours, and then reduced to 20 °C within 12 hours. The evolution of the structural ordering of Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> was monitored with X-ray powder diffraction (XRD) using a X'Pert PRO PANalytical diffractometer with CuK $\alpha$  radiation. Data were collected over the range of 15° < 2 $\theta$  < 80°. The patterns of the thermal evolution were registered on a Phillips PW1710 diffractometer in the range between 25 and 1400 °C. The XRD patterns were analyzed by means of the Rietveld refinement using the GSAS & EXPGUI software.

### Results and discussion

We produced samples by three calcination processes at 1200 °C for 100 hours, 1300 °C for 60 hours and 1400 °C for 60 hours. The structural characterization of each of the samples calcined by the Rietveld refinement method showed that the best temperature to produce the sample was at 1200 °C. The diffraction pattern showed a better fit with space group P4/mnc. The structural parameters obtained in the Rietveld refinements for the three possible space groups are shown in Table 1.

The analysis of the Rietveld refinement allowed us to conclude that the ideal production method for the ceramic SSMO was the calcination at 1200 °C resulting in a tetragonal crystal structure in the P4/mnc space group (# 128).

The Rietveld refinement for the X-ray diffraction pattern, recorded at room temperature with a tetragonal structure P4/mnc, showed that the SSMO samples formed a single phase (Figure 2). Due to the various conflicting reports regarding the space group symmetry, we refined XRD data using a variety of models for space groups with the same extinction conditions, and we found that the diffraction pattern observed may be described in the P4/mnc model. Assuming that the assignment symmetry and structure determination were



**Figure 1.** Crystal structure of the tetragonal P4/mnc structure of perovskite material Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub>.

**Table 1.** Comparison of the results obtained by the Rietveld refinement for three possible space groups to describe the Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> structure at room temperature using X-ray diffraction data

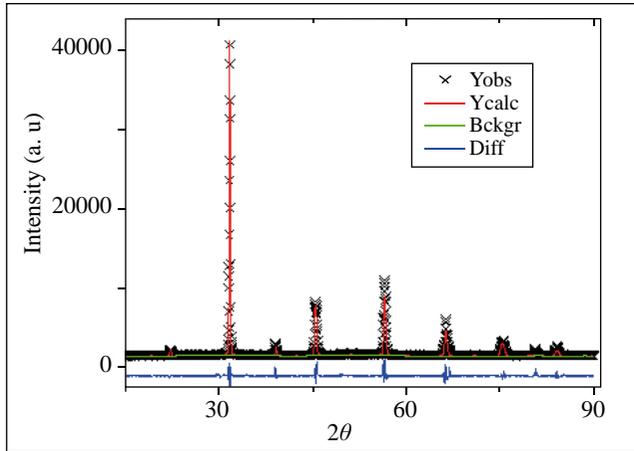
	Space group		
	I4/m	Fm-3m	P4/mnc
Rp (%)	0.2513	0.2552	0.2123
Rwp (%)	0.3358	0.3313	0.2648
R(F <sup>2</sup> ) (%)	0.3019	0.2618	0.2210
$\chi^2$	2.586	2.513	1.607

correct, we performed a structural analysis of the sample for a thermal variation in the temperature range between 25 and 1400 °C.

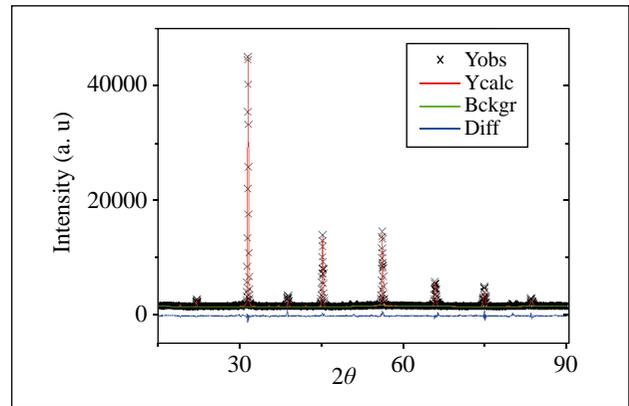
Figure 3 shows the X-ray patterns of the Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> sample as a function of temperature, in a range from 100 to 1000 °C. The figure shows that as temperature increased, several Bragg peaks began to overlap; the systematic absence of these reflection peaks is indicative of a cubic space group Fm-3m. All patterns obtained between 800 and 1000 °C were refined in the cubic space group.

The Rietveld refinement of the XRD data from 100 to 600 °C with space group P4/mnc gave the best fit. The best quality of fit for the tetragonal structure P4/mnc was obtained at a temperature of 600 °C (Figure 4). At this temperature we observed that the P4/mnc structure was maintained.

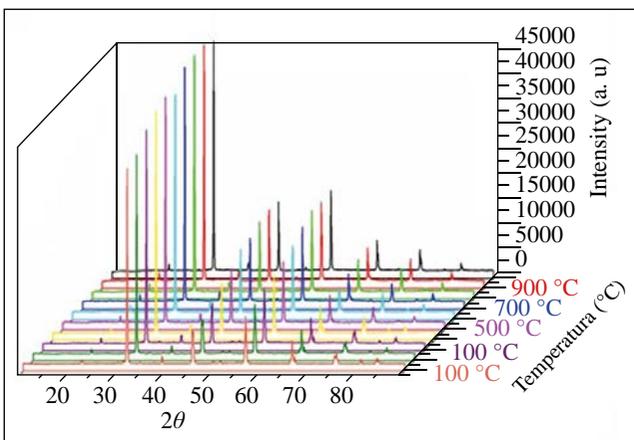
In Figures 2, 3 and 4 it is possible to observe how from 700 °C on the structure lost its monophasic character due to the structural transition of the Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> system. Before reaching 700 °C, the system obtained using Rietveld refinement appeared clearly tetragonal (Figures 3 and 4). However, these do not coincide with those reported by other authors (Fesenko, 1972; Politova, *et al.*, 1990; Cheah, *et al.*, 2006; Preethi, *et al.*, 2012).



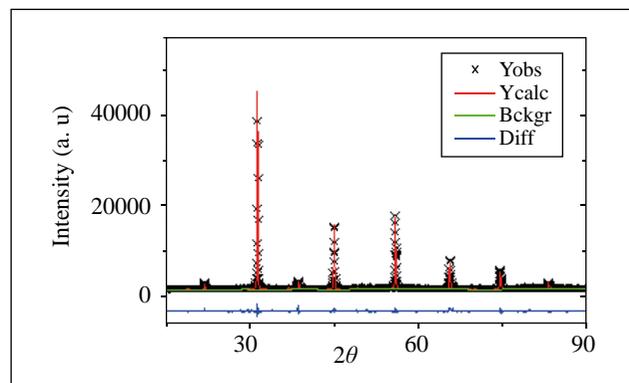
**Figure 2.** X-ray diffraction pattern for  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  ceramics after Rietveld refinement of the crystal structure at room temperature.



**Figure 4.** Observed, calculated and difference plots of the X-ray diffraction pattern for  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  after Rietveld refinement at 600 °C.



**Figure 3.** Temperature evolution of the X ray diffraction pattern of  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$ .



**Figure 5.** Rietveld refinement of the X ray diffraction pattern for  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  ceramics at 800 °C.

Figure 5 shows the cubic character of the  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  system wherein the diffraction peaks become simple peaks. The results at 900 and 1000 °C exhibit the same behavior. The data corresponding to 700 °C are not ideal, as the structure began the transition phase at this temperature.

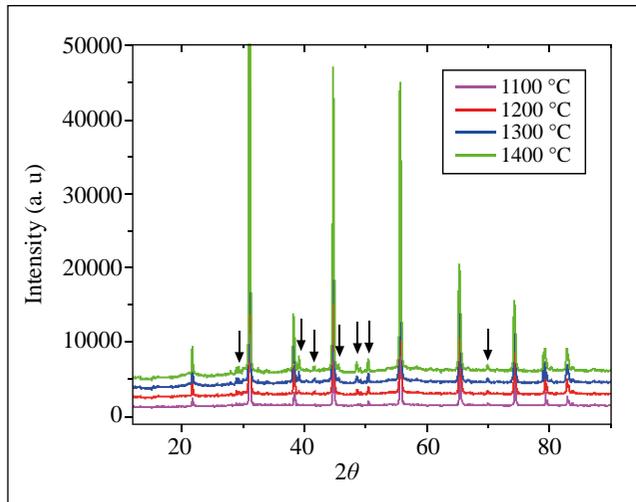
Table 2 shows the structural parameters obtained with the Rietveld refinements at 600 °C (tetragonal structure) and 800 °C (cubic structure).

For temperatures above 1000 °C the system exhibited diffraction peaks showing how it gradually lost the monophasic cubic structure (Figure 6). In this temperature range the system lost the unique phase, and other phases were observed (arrows).

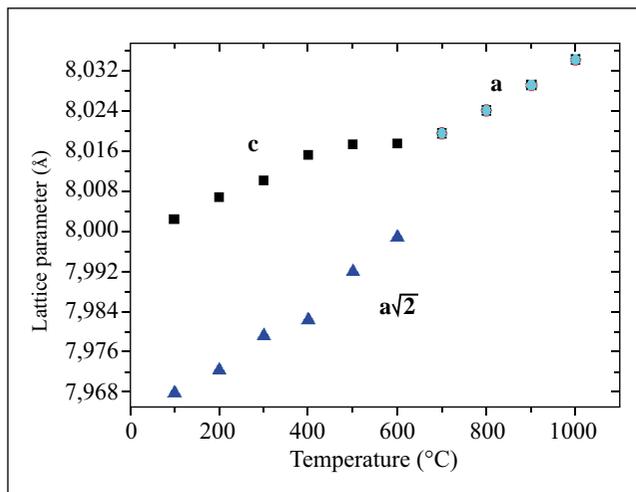
Figure 7 shows that as temperature increased a progressive reduction of the tetragonal structure has place, and above 700 °C the material turned cubic. The values of lattice parameters were amplified for  $2^{0.5}$  in order to simplify the comparison. A rapid change in the lattice parameter was evident with increasing temperature.

**Table 2.** Lattice parameters, atomic positions and bond distances of  $\text{Sr}_2\text{SbMnO}_6$  obtained by the Rietveld refinement of X ray diffraction at different temperatures. In P4/mnc SG, Sr occupied 4d(0 ½ ¼), Sb occupied 2a(0 0 0) and Mn occupied 2b(0 0 ½). In Fm – 3m SG, Sr occupied 8c(¼¼¼), Sb occupied 4a, and Mn occupied 4b. Agreement parameters are also included.

Temperature (°C)	600	800
<b>Space group</b>	P4/mnc	Fm – 3m
a (Å)	5.6560	a = 8.0239
c (Å)	8.0202	c = 8.0239
<b>O<sub>1</sub></b>		
x	0	0.7021
y	0	0
z	0.7335	0
<b>O<sub>2</sub></b>		
x	0.7057	
y	0.7727	
z	0	



**Figure 6.** Diffractograms obtained for the temperature range from 1100 to 1400 °C. The arrows show the presence of other structural phases.



**Figure 7.** Temperature dependence of the lattice parameters show the continuous transition to the cubic structure above 700 °C.

## Conclusions

Our results showed a space group at room temperature and a transition temperature different from those reported in other studies. Diffraction patterns for the thermal evolution of the sample showed a tetragonal structure with space group P4/mnc above 600 °C, and a cubic structure from 800 to 1000 °C with space group Fm-3m. Rietveld refinement results for these two temperatures evidenced that at 600 °C,  $\chi^2 = 1.455$  with  $R [F^2] = 0.0854$ , and at 800 °C,  $\chi^2 = 1.437$  and  $R [F^2] = 0.091$ . The results of the structural analysis of the diffractograms of the samples differ from the crystal structure and the transition temperature of the Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> system proposed by other authors (Yamagata, *et al.*, 2017; Yamagata, Inoue, & Koyama, 2017).

## Author's contributions

Yury Parada y Fania Caicedo efectuaron la síntesis de las muestras bajo la supervisión de Carlos Parra. David Landínez y Jairo Roa efectuaron los experimentos de Difracción de Rayos X y efectuaron supervisión del análisis y del refinamiento de los datos experimentales. Yury Parada llevó a cabo la revisión de estilo y el proceso de revisión ante el Comité Editorial de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

## Conflicts of interest

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses de ninguna índole que afecte la publicación de los resultados de este trabajo de investigación.

## References

- Baral, A. & Varma, K. B. R. (2009). Low temperature molten-salt synthesis of nanocrystalline cubic Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub>. *Journal of Solid State Chemistry*. **182** (12): 3282-3288.
- Cheah, M., Saines, P. J., Kennedy, B. J. (2006). The Jahn–Teller distortion and cation ordering in the perovskite Sr<sub>2</sub>MnSbO<sub>6</sub>. *Journal of Solid State Chemistry*. **179** (6): 1775-1781.
- Baral, A., Preethi, K.R.S. & Varma, M.B.R. (2011). Dielectric relaxation behaviour of Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> ceramics fabricated from nanocrystalline powders prepared by molten salt synthesis. *Bulletin of Materials Science*. **34** (1): 53-60.
- Foster, M. C., Nielson, R. M., Abrahams, S. C. (1997). Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub>: A new semiconductor ferroelectric. *Journal of Applied Physics*. **82** (6): 3076-3080.
- Ivanov, S. A., Nordblad, P., Tellgren, R., Hewat, A. (2009). Temperature evolution of structure and magnetic properties in the perovskite Sr<sub>2</sub>MnSbO<sub>6</sub>. *Materials Research Bulletin*. **44** (4): 822-830.
- Mahato, D. K., Dutta, A., & Sinha, T. P. (2010). Impedance spectroscopy analysis of double perovskite Ho<sub>2</sub>NiTiO<sub>6</sub>. *Journal of Materials Science*. **45** (24): 6757-6762.
- Majhi, K., Prakash, B. S., Varma, K. B. R. (2007). Extreme values of relative permittivity and dielectric relaxation in Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub> ceramics. *Journal of Physics D: Applied Physics*. **40** (22): 7128.
- Ortiz-Díaz, O., Rodríguez, M. J. A., Fajardo, F., Téllez, D. L., Roa-Rojas, J. (2007). Electronic and structural properties of Sr<sub>2</sub>YSbO<sub>6</sub>. *Physica B: Condensed Matter*. **398** (2): 248-251.
- Politova, E. D., Kaleva, G. M., Danilenko, I. N., Chuprakov, V. F., Ivanov, S. A., Venevtsev, Y. N. (1990). Phase transformations in PbTiO<sub>3</sub>-Sr(Sb<sub>1/2</sub>Mn<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> system. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Neorganicheskie Materialy*. **26** (11): 2352-2356.
- Preethi-Meher, K. R. S., Janolin, P. E., Guiblin, N., Paramesh, G., Varma, K. B. R. (2012). High temperature phase transition studies and dielectric properties of Sr<sub>2</sub>SbMnO<sub>6</sub>. *AIP Conference Proceedings*. **1447** (1): 137-138.
- Yamagata, M., Endo, T., Inoue, Y., Koyama, Y. (2017). Features of highly correlated electronic states in the simple perovskite manganite Sr<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> with 0.15 ≤ x ≤ 0.50. *Journal of the Physical Society of Japan*. **86** (5): 054705.
- Yamagata, M., Inoue, Y., Koyama, Y. (2017). Crystallographic features of electronic states in the highly-correlated electronic system Sr<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> around x=0.50. *Materials Science Forum*. **879**: 2158-2163. Trans Tech Publications.

# Un problema de osciladores acoplados analizado mediante la notación bra-ket empleada en mecánica cuántica

Mauricio Rozo Clavijo

Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, D.C., Colombia

## Resumen

Se analiza en detalle un sistema constituido por cuatro osciladores acoplados, con masas y constantes de acoplamiento diferentes. A partir de dicho análisis se obtiene la dinámica que rige el comportamiento del sistema desde la perspectiva de un contexto clásico, así como usando conceptos del álgebra lineal y la notación bra-ket empleada en mecánica cuántica. En este marco, se obtiene la solución del sistema de osciladores en una base estándar generada a partir de la posición inicial de cada oscilador, la cual permite establecer un estado bien definido interpretado como el desplazamiento del oscilador con respecto a su posición de equilibrio. En este orden de ideas, las ecuaciones de movimiento se desacoplan a través de una transformación de similitud construida a partir de un conjunto de vectores propios para así obtener la solución. Esta estrategia permite, además, evidenciar la evolución temporal del sistema de osciladores mediante un operador que se identifica con el propagador del estado del sistema. Este análisis adquiere especial importancia por su novedad y porque genera una forma alternativa, didáctica y sólida de abordar el tema, conectándolo con un tópico conocido de la mecánica clásica. Además, permite familiarizar a los estudiantes con la notación bra-ket y los procedimientos empleados para resolver problemas en mecánica cuántica, tales como el de valores propios. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras claves:** Enseñanza; Oscilador; Energía; Operador; Vectores propios; Propagador.

**Analysis of a problem of coupled oscillators making use of the bra-ket notation used in quantum mechanics**

## Abstract

A detailed analysis is performed on a system consisting of four oscillators coupled with different mass and coupling constant. The dynamics is obtained from the analysis governing the behavior of the system from the perspective of a classical context, and also using concepts of linear algebra and the bra-ket notation used in quantum mechanics. In this context, the solution for the oscillators system is obtained by making use of a standard base generated from of the initial position for each oscillator, which allows to establish a well-defined state that is interpreted as the displacement of the oscillator with respect to its position of equilibrium. In this order of ideas, the equations of motion are decoupled through a similarity transformation constructed from a set of eigenvectors to obtain the solution. This strategy offers the possibility of evidencing the temporal evolution of the system of oscillators by means of an operator identified with the propagator of the state of the system. Such analysis is important as it is novel and it generates an alternative, didactic and robust way of approaching this issue by connecting it with a known topic of classical mechanics. In addition, it allows students to familiarize themselves with the bra-ket notation and the procedures used to solve problems in quantum mechanics, such as the problem of eigenvalues. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Teaching; Oscillators; Energy; Operator; Eigenvector; Propagator.

## Introducción

Tradicionalmente, la mecánica clásica se considera como la puerta de entrada a la física y a su enseñanza, lo cual se sustenta por su relación con campos disciplinarios tales como la termodinámica, el electromagnetismo, y otros. Esta relación se debe a que en dichos campos se utilizan modelos explicativos sustentados en las elaboraciones que están en la base de los sistemas mecánicos, por lo cual se considera que un fenómeno es comprensible si es posible explicarlo en términos mecánicos (Schmid, 1983).

Por otra parte, Dirac evidencia en su tratado (1968) la necesidad de abandonar las ideas clásicas, ya que, aunque el esquema clásico es elegante y logra explicar un gran número de sistemas a escala macroscópica, sus predicciones teóricas a nivel atómico no concuerdan con los datos experimentales, por lo que sugiere construir un nuevo esquema para la

### Correspondencia:

Mauricio Rozo Clavijo; [mclavijo@pedagogica.edu.co](mailto:mclavijo@pedagogica.edu.co)

**Recibido:** 17 de agosto de 2017

**Aceptado:** 23 de abril de 2018

**Editor:** María Helena Gómez

descripción de los fenómenos a escala atómica. Este nuevo esquema establece un límite en torno a lo que se considera pequeño y grande y, por consiguiente, la necesidad de darle al tamaño un carácter absoluto (**Dirac**, 1968).

La idea de grande y pequeño pasa a ser fundamental en física, ya que todo sistema considerado como grande está sujeto al principio de causalidad y su comportamiento queda descrito por ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo. Por otra parte, si el sistema se considera pequeño con respecto a la perturbación producida, ello implica establecer una relación causal entre las condiciones de una situación inicial en un instante dado y las condiciones en otro instante posterior mediante una ecuación diferencial. En otras palabras, cuando se conoce el vector de estado del sistema en un instante inicial, éste evoluciona en el tiempo de manera determinista mientras no se perturbe el sistema. En el caso de un proceso de medida, ésta representa una perturbación que altera la evolución temporal del vector de estado.

La diferencia entre pequeño y grande, aunque no provee elementos que permitan hacer una teorización de la naturaleza a nivel atómico, sí constituye una nueva forma de mirarla, caracterizada por el hecho de que la observación que se hace sobre el sistema conlleva un grado de perturbación de su estado.

La física del siglo XX ha modificado nuestra imagen clásica del mundo gracias a la cosmovisión que nos ofrecen la mecánica cuántica y la relatividad general. La nueva comprensión del mundo se fundamenta en estas dos teorías. Ambas exigen una modificación radical de nuestra manera de conocer y de las ideas convencionales acerca del mundo, poniendo de manifiesto un revolucionario alcance conceptual.

La mecánica cuántica entraña una visión del mundo en la que, como ya se dijo, la observación que se haga de un sistema lo perturba de maneras que no pueden controlarse, es decir, el observador afecta y define la realidad que estudia. Esta visión rompe con el paradigma clásico que ha imperado e influido nuestro pensamiento y nuestra manera de ver el mundo desde el siglo XVII, y es una de las razones por la que es importante enseñarla y enfrentar las dificultades de los estudiantes a la hora de apropiarse de los conceptos en los que se fundamenta.

Una de las mayores dificultades para la enseñanza de la mecánica cuántica radica en que los fenómenos cuánticos no son directamente perceptibles y, por lo tanto, son contrarios a la intuición nacida de la observación de los estudiantes, más aún cuando se abordan desde una perspectiva teórica formalista que no resalta las implicaciones de la visión cuántica del mundo.

En este contexto, se presenta un análisis detallado de un sistema de osciladores acoplados, tema de gran importancia, ya que a partir de él se describen, por un lado, fenómenos mecánicos, electromagnéticos, y otros, y, además, se abre la puerta al estudio de sistemas con un gran número de grados de libertad y a la transición a una descripción en términos de grados de libertad continuos, y, por otro, se proporciona

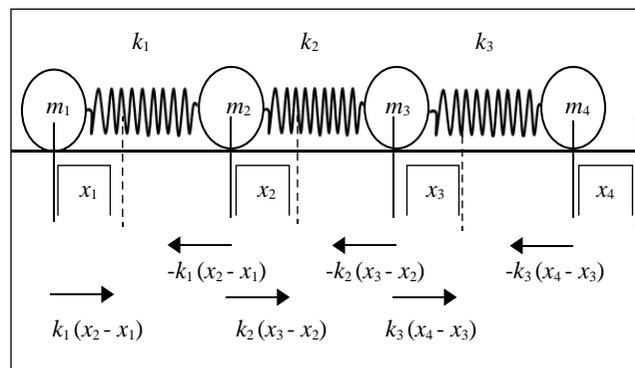
una estrategia metodológica para introducir conceptos del álgebra lineal y obtener una solución usando la notación *bracket*, en la que el número de coordenadas generalizadas para resolver el problema se relaciona con el conjunto de vectores propios que sirven para determinar de manera unívoca la configuración del sistema de osciladores.

Esta estrategia brinda la oportunidad de realizar una presentación alternativa de la solución del problema, con una discusión complementaria que tiene que ver más con la física involucrada que con el método a seguir, como lo establece **Rozo** (2016) al exponer una forma alternativa, didáctica y sólida para el tratamiento de la dinámica de una partícula en rotación, lo cual se conecta con un tópico conocido de la mecánica clásica.

La motivación es la de familiarizar al estudiante con los conceptos y los procedimientos para resolver problemas de mecánica cuántica tales como el de valores propios, aspecto que constituye una dificultad para la mayoría de los estudiantes. En este sentido, se describe en detalle la dinámica del comportamiento de cuatro osciladores acoplados utilizando el espacio vectorial generado por una base estándar. Este planteamiento permite obtener la dinámica del sistema de osciladores y, a la vez, ilustra el uso del método algebraico como un primer paso para mejorar el aprendizaje de las nociones, fundamentos y formalismos de la mecánica cuántica.

### Esquema clásico

Se estudia en detalle la transmisión de energía en el sistema de osciladores acoplados sugerido por **Herrmann & Schmalzle** en su artículo (1981). El sistema de osciladores se considera como una cadena lineal de esferas con movimiento unidimensional, la cual sirve como medio de propagación de una deformación. El sistema se encuentra constituido por un conjunto de cuatro osciladores acoplados, con diferente masa ( $m$ ) y diferente coeficiente de acoplamiento ( $k$ ). Los resortes interactúan elásticamente con los osciladores y su estado de movimiento se representa en la figura 1.



**Figura 1.** Estado de movimiento de un sistema de cuatro osciladores acoplados

El sistema de osciladores obedece las siguientes ecuaciones de movimiento, (Marion, 1992), (Berkeley, 1994):

$$\begin{aligned} m_1x_1 &= k_1(x_2 - x_1), \\ m_2x_2 &= -k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_3 - x_2), \\ m_3x_3 &= -k_2(x_3 - x_2) + k_3(x_4 - x_3), \\ m_4x_4 &= -k_3(x_4 - x_3) \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , son los desplazamientos de las masas con respecto a su posición de equilibrio. La dinámica del sistema de osciladores se describe mediante la solución de las ecuaciones de movimiento (1) dada por Symon (1968) y Sposito (1976):

$$x(t) = \sum_n D_{pn} \exp(i\omega_n t) \quad (2)$$

donde  $D_{pn} = A_{pn}C_n$  es el producto de dos coeficientes:  $A_{pn}$ , que representa los modos normales de oscilación, y las constantes  $C_n$  que se obtienen a partir de las condiciones iniciales:

$$t_0 = 0; x_1(t_0) = v_0; x_2(t_0) = 0; x_3(t_0) = 0; x_4(t_0) = 0 \quad (3)$$

Las frecuencias normales de oscilación del sistema están dadas por:

$$\omega_1 = 0; \omega_2 = \sqrt{\frac{2}{5}} \omega_0; \omega_3 = 2\sqrt{\frac{2}{5}} \omega_0; \omega_4 = 3\sqrt{\frac{2}{5}} \omega_0 \quad (4)$$

donde  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , obtenidas a partir de los valores dados para las masas y constantes de acoplamiento sugeridos por Herrmann (1981):

$$m_1 = \frac{5}{3}m, m_2 = m, m_3 = m, m_4 = \frac{5}{3}m \quad (5)$$

$$k_1 = k, k_2 = \frac{6}{5}k, k_3 = k$$

Por último, la dinámica del sistema se rige por las siguientes ecuaciones de movimiento:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{v_0}{16} \left[ 3\cos\omega_1 t + \frac{1}{2}\cos\omega_2 t + 5\cos\omega_3 t + \frac{15}{2}\cos\omega_4 t \right] \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{v_0}{16} \left[ 3\cos\omega_1 t + \frac{3}{2}\cos\omega_2 t - 3\cos\omega_3 t - \frac{1}{2}\cos\omega_4 t \right] \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{v_0}{16} \left[ 3\cos\omega_1 t - \frac{3}{2}\cos\omega_2 t - 3\cos\omega_3 t + \frac{3}{2}\cos\omega_4 t \right] \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{v_0}{16} \left[ 3\cos\omega_1 t - \frac{1}{2}\cos\omega_2 t + 5\cos\omega_3 t - \frac{15}{2}\cos\omega_4 t \right] \end{aligned} \quad (6)$$

La figura 2 muestra el comportamiento del sistema de osciladores a partir de las soluciones dadas en (6). Cuando el primer oscilador se saca de su posición de equilibrio y se deja libre (excitación inicial externa), se propaga una oscilación con una velocidad que va disminuyendo a través del sistema de osciladores como lo muestra la curva roja punteada. A través del movimiento de oscilación del segundo y del tercer oscilador alrededor de su posición de equilibrio, se propaga un pulso que se desplaza por el sistema y que se muestra en las curvas en negro (asterisco negro) y en azul

(punto azul) hasta el último oscilador del lado opuesto, en el cual la velocidad de oscilación aumenta hasta alcanzar la misma con la que se excitó inicialmente el sistema, lo cual se evidencia con la curva verde (símbolo de x verde), sin que los osciladores se hayan trasladado.

Por lo tanto, al considerar el medio como el conjunto de osciladores acoplados, la excitación inicial externa se propaga a través de la oscilación del sistema de osciladores alrededor de su posición de equilibrio hasta el último oscilador del lado opuesto. El comportamiento de la deformación se debe a las fuerzas elásticas que actúan sobre los osciladores y provocan que éstas se propaguen con cierta velocidad. La deformación representa un transporte de energía, ya que el trabajo que realiza la fuerza externa durante el momento de la excitación inicial se reparte por el sistema en forma de energía elástica (cinética y potencial) a medida que la deformación avanza por él y trabaja en su contorno para producirla (Berkeley, 1994), (French, 1974).

Por último, a través del sistema se propaga un pulso que pasa de un oscilador a otro transmitiendo la energía para que se efectúen las deformaciones hasta el último oscilador del lado opuesto, como se muestra en la figura 3.

Por otro lado, el sistema de osciladores acoplados se puede analizar también mediante conceptos del álgebra lineal y procedimientos empleados para resolver problemas de valores propios, pero en este caso, se resalta la manera en que se procede desde el punto de vista de la mecánica cuántica.

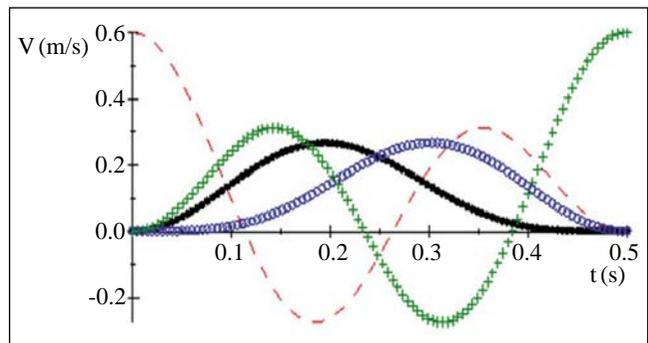


Figura 2. Comportamiento del sistema de osciladores cuando el primer oscilador se saca de su posición de equilibrio

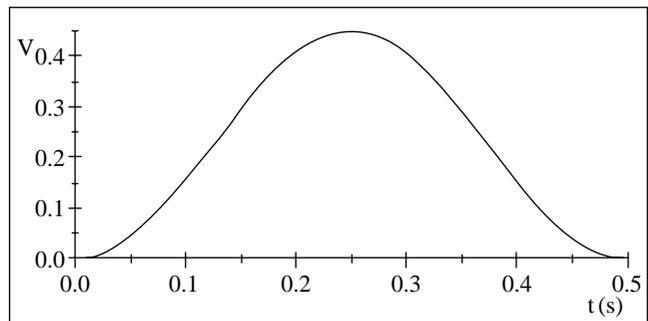


Figura 3. Propagación de un pulso entre el sistema de osciladores

### Esquema del álgebra lineal

La solución del problema anterior puede obtenerse usando conceptos del álgebra lineal, con el fin de familiarizar a los estudiantes con los procedimientos que se utilizan en la solución de problemas de valores propios, y, además, recurriendo a la notación utilizada en el esquema de la mecánica cuántica. Este planteamiento permite tender un puente entre los conceptos ya adquiridos por los estudiantes y los utilizados en mecánica cuántica.

Como en el caso anterior, el problema se reduce a hallar los valores de  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ ,  $x_4(t)$  conociendo las condiciones iniciales. El espacio vectorial se genera a través de la base estándar definida de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 |1\rangle &=: \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \left[ \begin{array}{l} \text{La masa } m_1 \text{ se desplaza una unidad.} \\ \text{Las masas } m_2, m_3 \text{ y } m_4 \text{ no se desplazan.} \end{array} \right] \\
 |2\rangle &=: \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \left[ \begin{array}{l} \text{La masa } m_2 \text{ se desplaza una unidad.} \\ \text{Las masas } m_1, m_3 \text{ y } m_4 \text{ no se desplazan.} \end{array} \right] \\
 |3\rangle &=: \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \left[ \begin{array}{l} \text{La masa } m_3 \text{ se desplaza una unidad.} \\ \text{Las masas } m_1, m_2 \text{ y } m_4 \text{ no se desplazan.} \end{array} \right] \\
 |4\rangle &=: \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \left[ \begin{array}{l} \text{La masa } m_4 \text{ se desplaza una unidad.} \\ \text{Las masas } m_1, m_2 \text{ y } m_3 \text{ no se desplazan.} \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{7}$$

Los vectores  $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |4\rangle$  se toman como el conjunto de estados de base bien definidos para el análisis del comportamiento del sistema de osciladores. Además, el concepto de estado tiene un papel importante en el análisis, ya que permite hacer una descripción de la evolución temporal del sistema (Gillespie, 1991).

En este sentido, al analizar la definición de la palabra estado de la **Real Academia Española** (2017): “Situación en que se encuentra alguien o algo, y en especial cada uno de sus sucesivos modos de ser o estar”, se rescatan dos elementos importantes. Primero, ese alguien o algo aludirían al sistema y, segundo, los modos de ser o estar serían los diferentes estados en los que éste se puede encontrar en el transcurso del tiempo. Por lo tanto, el estado del sistema se puede definir como las diferentes maneras de estar, caracterizadas por las variables dinámicas de posición y momentum, las cuales tienen el papel de observables del sistema.

Por último, el estado de un sistema se caracteriza con relación a una cualidad, la cual permite referirse a una propiedad específica del sistema. En otras palabras, el estado del sistema queda dado en relación con una cualidad específica que puede ser de movimiento, térmica, eléctrica, etc., sin que el sistema pierda su identidad. Por lo tanto, el concepto de estado es la estrategia que el sujeto elabora para referirse a las diferentes formas de estar del sistema con relación a una cualidad determinada.

La formalización del estado del sistema se hace usando un vector normalizado, es decir que a todo posible estado físico del sistema se le hace corresponder un ket normalizado, existiendo una relación biunívoca entre vectores normalizados y estados físicos (Gillespie, 1991). Por lo tanto, el estado del sistema en cualquier instante de tiempo puede expresarse como una combinación lineal de los estados de base:

$$|x(t)\rangle = x_1 |1\rangle + x_2 |2\rangle + x_3 |3\rangle + x_4 |4\rangle \tag{8}$$

donde cada uno de los coeficientes varía en el tiempo, y los estados que componen la superposición no pierden su identidad, lo cual significa que la superposición se da con relación al resto de elementos superpuestos. En otras palabras, el estado del sistema puede considerarse como el resultado de estar simultáneamente en cada uno de los estados de base que se hayan seleccionado  $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |4\rangle$  (Feynman, 1964). La superposición es, entonces, una relación entre los estados constitutivos con respecto a una cualidad dada, en este caso de movimiento, de forma que el estado resultante queda determinado por los pesos relativos de los estados que se superponen.

Por otro lado, las ecuaciones de movimiento (1) se pueden reescribir en una representación matricial como:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\omega_{11}^2 & \omega_{11}^2 & 0 & 0 \\ \omega_{12}^2 & -(\omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) & \omega_{22}^2 & 0 \\ 0 & \omega_{23}^2 & -(\omega_{23}^2 + \omega_{33}^2) & \omega_{33}^2 \\ 0 & 0 & \omega_{34}^2 & -\omega_{34}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \tag{9}$$

y los elementos  $\omega_{ij}^2$  de la matriz anterior se obtienen explícitamente a partir de los valores dados en (3), obteniéndose la matriz  $\Omega_{ij}$

$$\Omega_{ij} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{5}\omega_0^2 & \frac{3}{5}\omega_0^2 & 0 & 0 \\ \omega_0^2 & -\frac{11}{5}\omega_0^2 & \frac{6}{5}\omega_0^2 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5}\omega_0^2 & -\frac{11}{5}\omega_0^2 & \omega_0^2 \\ 0 & 0 & \frac{3}{5}\omega_0^2 & -\frac{3}{5}\omega_0^2 \end{pmatrix} \tag{10}$$

donde  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  es la frecuencia natural de oscilación del sistema. Haciendo uso de la representación matricial, las ecuaciones de movimiento pueden escribirse como:

$$|\ddot{x}_i(t)\rangle = \overline{\Omega} |x_j(t)\rangle \tag{11}$$

siendo la matriz  $\Omega_{ij}$  la representación matricial del operador denominado  $\overline{\Omega}$ , y los coeficientes  $x_j(t)$  los elementos que caracterizan el vector de estado  $|x(t)\rangle$ .

La base estándar  $(|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |4\rangle)$  así definida es conveniente para interpretar los coeficientes  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ ,  $x_4(t)$  como los desplazamientos de cada uno de los osciladores alrededor de su posición de equilibrio, sin embargo, esta definición no permite obtener la solución directa de las ecuaciones de movimiento (9), ya que este es un sistema acoplado, como lo muestran los elementos que se encuentran fuera de la diagonal de la matriz  $\Omega_{ij}$ . Por lo tanto, para desacoplar el sistema de ecuaciones es necesario encontrar un conjunto de vectores propios de la matriz  $\Omega_{ij}$ .

El problema, entonces, se reduce a hallar los vectores propios (**Bronson, 1991**) del operador  $\widehat{Q}$  con el fin de construir una matriz que permita diagonalizar la matriz  $\Omega_{ij}$  y, así, desacoplar las ecuaciones de movimiento.

En este orden de ideas, los vectores propios del operador  $\widehat{Q}$  son:

$$|I\rangle = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; |II\rangle = \frac{1}{\sqrt{20}} \begin{pmatrix} -3 \\ -1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}; |III\rangle = \frac{1}{\sqrt{68}} \begin{pmatrix} 3 \\ -5 \\ -5 \\ 3 \end{pmatrix}; |IV\rangle = \frac{1}{\sqrt{52}} \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ -5 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12),$$

los cuales cumplen con la condición de ortonormalización:  $\langle i|j\rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i=j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$ , y forman un conjunto de estados de base que es conveniente para describir los estados del sistema de osciladores. A partir de los vectores de base  $|I\rangle$ ,  $|II\rangle$ ,  $|III\rangle$ ,  $|IV\rangle$  se construye la matriz

$$M = \frac{\sqrt{1105}}{17680} \begin{pmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 \\ 1 & -1 & -5 & 5 \\ 1 & 1 & -5 & -5 \\ 1 & 3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (13),$$

que diagonaliza la matriz  $\Omega_{ij}$  (**Bronson, 1991**), (**Grossman, 2012**):

$$A = M^{-1}QM = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{5}\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{8}{5}\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{18}{5}\omega_0^2 \end{pmatrix} \quad (14),$$

Los vectores propios de la matriz ( $A$ ) son los vectores de la base estándar definidos anteriormente ( $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$ ,  $|4\rangle$ ). Usando la matriz similar ( $A$ ), las ecuaciones de movimiento se desacoplan fácilmente para obtener:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_I \\ \ddot{x}_{II} \\ \ddot{x}_{III} \\ \ddot{x}_{IV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{5}\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{8}{5}\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{18}{5}\omega_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_I \\ x_{II} \\ x_{III} \\ x_{IV} \end{pmatrix} \quad (15),$$

o:

$$|\ddot{x}_i\rangle + \omega_i^2|x_i\rangle = 0, \text{ con } i = I, II, III, IV, \omega_i^2 \text{ los valores propios} \quad (16),$$

Los valores propios de la matriz ( $A$ ) que se encuentran en la diagonal se identifican con las frecuencias normales de oscilación del sistema, es decir, existe una relación biunívoca entre el valor propio y la frecuencia normal de oscilación del sistema. La obtención del conjunto de vectores propios  $|I\rangle$ ,  $|II\rangle$ ,  $|III\rangle$ ,  $|IV\rangle$ , permite desacoplar de manera sencilla las ecuaciones de movimiento, así como identificar cada vector propio con el modo normal de oscilación correspondiente a cada frecuencia normal de oscilación del sistema. Por último, la solución del sistema (16) tiene una simple dependencia temporal en forma de exponencial como la dada en (2).

Aun cuando la evolución temporal del vector de estado del sistema queda especificada por la ecuación (16), se puede establecer un operador que también permite obtener la evolución temporal del sistema, así:

$$|x(t)\rangle = \widehat{U}(t)|x_i(0)\rangle \text{ donde } i = I, II, III, IV \quad (17),$$

lo cual significa que el operador  $\widehat{U}(t)$  actúa sobre el vector de estado inicial  $|x_i(0)\rangle$  para producir un nuevo vector de estado  $|x(t)\rangle$  cuando transcurre un tiempo ( $t$ ), es decir, el estado final  $|x(t)\rangle$  es lo que resulta cuando el operador  $\widehat{U}(t)$  actúa sobre el estado inicial  $|x_i(0)\rangle$  (**Feynman, 1964**; **Gillespie, 1991**). El operador  $\widehat{U}(t)$  es independiente del estado inicial del sistema y debe satisfacer la condición  $\widehat{U}(t) = 1$ . Su representación se obtiene sustituyendo (17) en (16):

$$\widehat{U}(t) = \sum_{n=I}^{IV} |n\rangle \langle n| \exp(i\omega_n t) \quad (18),$$

El operador  $\widehat{U} = \widehat{U}(t)$  se denomina operador de evolución temporal o propagador del estado del sistema (**Townsend, 2000**; **Gillespie, 1991**), ya que al conocer el estado inicial se puede determinar el estado futuro del sistema. Por lo tanto, si se halla la evolución temporal del sistema, se determina la solución completa del problema.

Este análisis permite que los problemas abordados usualmente desde el contexto de la mecánica clásica también lo pueden ser haciendo uso del algebra lineal, lo que conduce a introducir conceptos como vector de estado, principio de superposición, operador, vectores propios, valores propios, transformación de similitud y otros, que son la base para el estudio de la mecánica cuántica. Además, con el procedimiento utilizado se muestra que la notación empleada bra y ket no es exclusiva de la mecánica cuántica, lo cual permite un acercamiento más rápido y una mayor familiarización de los estudiantes con la manera de proceder cuando se abordan problemas desde el contexto de la mecánica cuántica. Asimismo, se elaboró un cuadro comparativo del análisis usual mediante el esquema clásico y el que se propone haciendo uso del algebra lineal (Tabla 1).

### Conclusión

La representación matricial de las ecuaciones de movimiento y la definición de la base estándar tiene las siguientes ventajas: permite hacer uso de conceptos del algebra lineal para hallar la solución del sistema de ecuaciones y, por lo

**Tabla 1.** Comparativa entre el esquema clásico y el esquema del algebra lineal

Esquema clásico	Esquema del algebra lineal
Ecuaciones de movimiento: $m_1x_1 = k_1(x_2 - x_1)$ , $m_2x_2 = -k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_3 - x_2)$ $m_3x_3 = -k_2(x_3 - x_2) + k_3(x_4 - x_3)$ $m_4x_4 = -k_3(x_4 - x_3)$ .	Ecuaciones de movimiento: $ \ddot{x}_i\rangle + \omega_i^2 x_i\rangle = 0$ , con $i = I, II, III, IV$ . $\omega_i^2$ los valores propios.
Solución: $x(t) = \sum_n D_{pn} \exp(i\omega_n t)$ .	Solución: $ x(t)\rangle = \widehat{U}(t) x_i(0)\rangle$ donde $i = I, II, III, IV$ . Operador de evolución: $\widehat{U}(t) = \sum_{n=I}^{IV}  n\rangle \langle n  \exp(i\omega_n t)$ .

tanto, conocer la evolución temporal del sistema; asimismo, la estrategia metodológica plantea una forma diferente, novedosa y didáctica para deducir las ecuaciones de movimiento del sistema de osciladores acoplados, lo cual permite, además, familiarizar a los estudiantes con el álgebra lineal y con la notación bra-ket ampliamente utilizada en mecánica cuántica.

En el esquema clásico el intercambio de energía entre los osciladores se considera continuo y depende del acoplamiento entre ellos. En el contexto cuántico existe un nivel de energía bien definido y no continuo correspondiente a cada uno de los estados bien definidos del sistema, el cual es un efecto estrictamente cuántico.

Esta estrategia de enseñanza adquiere especial importancia, pues permite tender un puente entre conceptos ya adquiridos por los estudiantes y los conceptos utilizados en mecánica cuántica, y, además, mostrar los procedimientos empleados para resolver problemas de valores propios.

Brinda, asimismo, un enfoque diferente para abordar problemas de la mecánica clásica, lo que constituye una forma novedosa de obtener los mismos resultados y de familiarizar más rápidamente a los estudiantes con el formalismo de la mecánica cuántica. Se sugiere incentivar a los docentes a replantear la enseñanza de la física, en particular la de la mecánica clásica, bajo un enfoque diferente al usual, que permita evidenciar formas alternativas de resolver problemas y, a la vez, introduzca una formalización que considere el contexto y permita a los estudiantes de formación inicial acceder a un conocimiento moderno y al pensamiento crítico. Esta perspectiva permite la formación de los estudiantes como investigadores y contribuye a la de los docentes de física, promoviendo un cambio de paradigma de las prácticas de enseñanza.

### Agradecimientos

La elaboración de este manuscrito contó con el apoyo de la Universidad Pedagógica Nacional mediante el proyecto DFI-445-17 del centro de investigaciones de la Universidad Pedagógica (CIUP).

### Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

### Referencias

- Bronson, R. Costa, G.** (1991). *Matrix Methods*, Academic Press, INC, San Diego, 175-194.
- Crawford, F. S.** (1994). *Berkeley Physics Course Ondas*, Reverté S.A. España, 2-31.
- Dirac, P. A. M.** (1968). *Principio de Mecánica Cuántica*, Ediciones Ariel, España, 15-17.
- Feynman, R.** (1964). *The Feynman lectures on Physics, Vol III*. Addison- Wesley Publishing Company, Massachusetts, E.U.A, 5-17.
- French, A. P.** (1974). *Vibraciones y Ondas*, Editorial Reverté S. A, España, 227-257.
- Gillespie, D.** (1991). *Introducción a la mecánica cuántica*, Editorial Reverté S. A, España, 60-80.
- Grossman, S. Flores, J. J.** (2012). *Algebra lineal*, McGraw-Hill, México, 564-572.
- Herrmann, F. Schmälzle, P.** (1981). Simple explanation of a well-known collision experiment, *Am. J. Phys.* **49**: 761-764.
- Marion J. B.** (1992). *Dinámica Clásica de las Partículas y Sistemas*, Reverté S.A. España, 103-120.
- Real Academia Española.** (2017). Fecha de consulta: 8 de mayo de 2018. Disponible en: [http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=estado](http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=estado)
- Rozo M.** (2016). Sobre la dinámica de una partícula en rotación usando el concepto de invariancia gauge. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* **40** (157): 585-589.
- Schmid, G. B.** (1983). An up to date approach to physics, *Am. J. Phys.* **52**, (9): 794-799.
- Sposito, G.** (1976). *Introduction to Classical Dynamics*, John Wiley and Sons, U.S.A, 37-46.
- Symon, K.** (1968). *Mecánica*. Addison-Wesley, España, 194-204.
- Townsend, J.** (2000). *A modern Approach to Quantum Mechanics*, University Science Books, California, 93-111.

## **XV Encuentro Nacional de Óptica – VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones**

Promovido por la actual Sociedad Red Colombiana de Óptica, el Encuentro Nacional de Óptica (ENO) ha sido una actividad periódica desde su primera versión realizada en el año 1987 en la ciudad de Medellín. En el año 2006, la Red Colombiana de Óptica amplió la cobertura de promoción, fomento y fortalecimiento de la óptica y sus aplicaciones al invitar grupos de investigación de la región Andina (Chile, Perú, Bolivia y Venezuela) y del Caribe (Panamá, Cuba, Costa Rica, Honduras, El Salvador, Guatemala, Jamaica y República Dominicana) realizando, en el marco del X ENO, la Primera Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones (CANCOA).

Desde esa época, y cada dos años, la comunidad de científicos de Colombia y Latinoamérica, cuyas investigaciones se enfocan en cualquier campo de la óptica y sus aplicaciones, se reúnen en el Encuentro Nacional de Óptica y Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones (ENO-CANCOA) para compartir experiencias, crear nuevas oportunidades de investigación conjunta y fortalecer viejas relaciones personales y científicas.

Para el año 2017, la Universidad Industrial de Santander asumió la noble y delicada tarea de realizar el XV ENO - VI CANCOA. En el marco de las actividades de conmemoración de los 50 años de funcionamiento de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, se realizó del 20 al 24 de noviembre de 2017 el XV ENO – VI CANCOA en las instalaciones del Hotel Bucarica: sede empresarial, cultural y administrativa de la Universidad Industrial de Santander. El comité organizador definió dos objetivos centrales para el evento. Por un lado, el evento desarrolló estrategias y actividades para promover, fortalecer y fomentar la investigación en óptica y sus aplicaciones buscando un encuentro cómodo, amplio en tiempo y agradable de sus actores: investigadores consolidados, investigadores en formación y empresarios. Por otro lado, basados en el lema: “Identificando actores y compartiendo experiencias construimos futuro”, los directores de grupos de investigación colombianos en óptica y sus aplicaciones realizaron ponencias plenarias mostrando las temáticas de investigación más fuertes con resultados destacados a nivel nacional e internacional, cumpliéndose con el objetivo de obtener un mapa actualizado de quien hace qué y dónde en óptica.

Resultado de las actividades realizadas, se recibieron numerosos artículos en extenso de alta calidad científica, que fueron evaluados y clasificados por el comité científico, conformado por destacados investigadores internacionales y nacionales. Como resultado de este delicado proceso de selección, y después de surtir el proceso de evaluación por pares, se presenta en el número 163 de la prestigiosa revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales los artículos seleccionados por el comité científico del evento. El comité organizador del XV ENO – VI CANCOA agradece enormemente la colaboración de la doctora Elizabeth Castañeda, editora de la revista y del doctor Román Castañeda, editor asociado de los artículos enviados, por la grandiosa labor de publicar los artículos seleccionados y facilitar la labor de organizar un evento científico.

**Jaime Enrique Meneses Fonseca**  
Presidente XV ENO – VI CANCOA

# Análisis multiespectral y digital de los nevos melanocíticos adquiridos

Ariana C. Di Lorenzo V.<sup>1,\*</sup>, Reimer A. Romero H.<sup>1</sup>, Aarón Muñoz T.<sup>1</sup>, Sandra C. Vivas<sup>1,2</sup>, Irene Paredes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física y Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC), Valencia, Carabobo, Venezuela  
<sup>2</sup>Postgrado de Dermatología, Centro Hospitalario Enrique Tejera, Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC), Valencia, Carabobo, Venezuela

## Resumen

El objetivo del presente trabajo fue encontrar las diferencias entre los distintos tipos de nevos melanocíticos adquiridos con base en la información extraída de las imágenes multiespectrales. La dimensión fractal y la entropía se escogieron como medidas para distinguir entre los nevos (146 lesiones). El análisis de varianza (ANOVA unifactorial) considerando la dimensión fractal mostró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los grupos, con mayor significación en la longitud de onda azul ( $p = 7,87e-08$ ), y menor en la roja. La medida de la entropía se comparada entre los pares de grupos mediante la prueba T de *Student*, y se encontraron diferencias entre los lunares benignos (U,C,I) y los displásicos (D), específicamente en los canales cian ( $p_{UD} = 0,002$ ,  $p_{CD} = 0,023$ ,  $p_{ID} = 0,012$ ) y rojos ( $p_{UD} = 0,0001$ ,  $p_{CD} = 2,55E-5$ ,  $p_{ID} = 0,005$ ). El uso de imágenes multiespectrales, conjuntamente con las medidas de ordenamiento (dimensión fractal y entropía), permite caracterizar y diferenciar los grupos de nevos melanocíticos adquiridos, lo cual contribuiría al desarrollo de un tipo de evaluación dermatológica no invasiva y concluyente del ordenamiento de los nidos de melanina.

**Palabras clave:** Dimensión fractal; Multiespectral; Entropía; Nevos; Dermatoscopia.

## Multiespectral and digital analysis of acquired melanocytic nevi

### Abstract

The main objective of the present work was to find differences between different types of acquired melanocytic nevi on 146 lesions. Fractal dimension and entropy were obtained from multispectral images. We found significant differences in fractal dimension measures using an analysis of variance (one-way ANOVA) ( $p < 0.05$ ), with  $p = 7.87e-08$  at the blue wavelength. The entropy mean of all NMA pairs was compared using a T-Student test; we registered a high significance in the cyan channels ( $p_{UD} = 0.002$ ,  $p_{CD} = 0.023$ ,  $p_{ID} = 0.012$ ) and in the red ones ( $p_{UD} = 0.0001$ ,  $p_{CD} = 2.55E-5$ ,  $p_{ID} = 0.005$ ). Multispectral images together with order measures (fractal dimension and entropy) is a tool to characterize and distinguish NMA groups and a way towards developing a non-invasive dermatologic test based on melanin distribution in NMAs.

**Key words:** Fractal dimension; Multiespectral; Entropy; Nevi; Dermastocopy.

## Introducción

En dermatología el color de la piel y el de las lesiones cutáneas contienen información vital para el diagnóstico. La evaluación del estado de la piel en tiempo real todavía es una utopía de la medicina de especial importancia para la solución de los problemas de salud de la piel en el menor tiempo posible.

El análisis de la interacción de la luz con la piel humana es una alternativa no invasiva para el diagnóstico de tejidos anómalos y lesiones cutáneas, tales como el melanoma en sus diferentes estados (Paredes, *et al.*, 2016).

Aunque el melanoma cutáneo afecta principalmente a los caucásicos, su incidencia varía según las regiones geográficas. Son pocos los datos clínicos e histopatológicos disponibles de pacientes con melanoma en Latinoamérica.

Los datos reales de incidencia del melanoma son escasos y, en general, provienen de estudios pequeños realizados en una sola institución (Schmerling, *et al.*, 2011).

La incidencia anual estimada de melanoma en Latinoamérica no supera los cinco casos anuales por cada 100.000 habitantes, siendo Uruguay el país que ocupa el primer lugar, con una incidencia de 4,1, seguido de Colombia, Argentina y Brasil, con una incidencia de 3,3, 2,9 y 2,8, respectivamente. En Venezuela la incidencia es de 1,1 y es uno de los países con menor incidencia en Latinoamérica. Estas incidencias siguen siendo bajas comparadas con las de otros

### \*Correspondencia:

Ariana Caridad Di Lorenzo Valdes, [Aridilorenzo@gmail.com](mailto:Aridilorenzo@gmail.com)

Recibido: 22 de enero de 2018

Aceptado: 27 de abril de 2018

Editor: Juana Ángel

países como Australia y Nueva Zelanda, con 34,9 y 35,8, respectivamente, según los datos del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (2008) y del Atlas del cáncer (2008) (**Schmerling**, 2011).

El melanoma aparece inicialmente como una mancha pigmentada muy parecida a los nevos melanocíticos adquiridos, comúnmente conocidos como lunares.

Los nevos melanocíticos adquiridos (NMA) son la neoplasia más común en el ser humano; existen reportes en los que su prevalencia en la población oscila entre el 90 y el 95 % y varía según la edad, la etnia, y los factores ambientales y genéticos. El número total de lunares aumenta con la edad pero presenta un crecimiento rápido en la pubertad, con un pico máximo en la tercera década de la vida en ambos sexos. Asimismo, se ha observado un mayor número de lunares en familiares de pacientes con antecedentes de cáncer de piel y en quienes se han expuesto excesivamente a radiaciones ultravioleta, por lo que es lógico pensar que cada vez son más frecuentes las consultas relacionadas con su potencial de malignidad y con la necesidad de tratamiento (**Wolff, et al.**, 2010; **Moreno & Saucedo**, 2012; **Sortino-Rachou, et al.**, 2011).

Los NMA son pequeñas manchas pigmentadas que se originan por la proliferación anormal pero benigna de células llamadas melanocitos, los cuales tienden a agruparse en nidos de melanocitos y afectan las diferentes estructuras de la piel (**Rex & Ferrándiz**, 2007).

Los NMA se clasifican en nevos de unión, nevos compuestos, nevos intradérmicos y nevos displásicos, y cada tipo tiene características visuales e histológicas diferentes. Un nevus displásico puede convertirse en una lesión maligna y cuantos más tenga una persona, mayor es el riesgo de desarrollarla. El criterio clínico de diagnóstico de estas lesiones es netamente visual y sigue la conocida regla basada en la observación de la asimetría, el borde, el color y el diámetro de la lesión (ABCD) (**Ruela, et al.**, 2015).

Sin embargo, frente a una lesión sospechosa de ser maligna debe hacerse un estudio histológico, el cual es costoso e invasivo, por lo que varios autores han considerado la digitalización de la regla ABCD (**Isasi, et al.**, 2011; **Chang, et al.**, 2013), la cual consiste en segmentar la lesión, establecer sus características y clasificar las imágenes en rojo, verde y azul (RGB) que se obtienen con dispositivos de carga acoplada (*Charge Coupled Device*, CCD) o con el semiconductor complementario de óxido metálico (*complementary metal-oxide-semiconductor*, CMOS) (**Kapsokalyvas, et al.**, 2013; **Kim, et al.**, 2016).

Muchos de estos trabajos se han desarrollado como respuesta a la alta incidencia de melanomas y gracias al uso de máquinas de aprendizaje para distinguir los melanomas de otro tipo de lesiones benignas (**Amelard, et al.**, 2014)

Algunos autores recurren a análisis estadísticos como el ANOVA, la prueba T de *Student*, y el test de diferencia significativa mínima (*least significant difference*, LSD) de Fisher para determinar las diferencias entre los tipos

de lesión. En este sentido, se han utilizado los espectros infrarrojos (**McIntosh, et al.**, 2001) para determinar diferencias significativas entre los distintos tipos de lesiones, entre ellas, los nevos displásicos. Asimismo, mediante la observación de las imágenes de los nevos melanocíticos pueden establecerse características como la dimensión fractal para diferenciarlos de los melanomas (**Manousakia, et al.**, 2016).

La interacción de la luz con la piel humana representa una alternativa no invasiva para el diagnóstico de tejidos anómalos y lesiones cutáneas en sus diferentes estados. Una de estas técnicas es el estudio de las imágenes multispectrales (**Vivas & Muñoz**, 2016; **Kim, et al.**, 2016).

Las imágenes multispectrales, que extienden el número de canales de imagen más allá de los tres convencionales (rojo, verde y azul), han demostrado ser útiles para una amplia gama de aplicaciones y, a diferencia de las imágenes comunes, revelan más de lo que permite la visión humana. El sistema de imágenes multispectrales se basa en la utilización de diferentes longitudes de ondas del espectro visible para aumentar el contraste de los diferentes cromóforos que componen las capas de la piel (**Air University**, 2003). De esta forma, la luz penetra en la piel a diferentes profundidades, lo que permite obtener imágenes diferentes a las comunes. Cada segmento de imagen representa una longitud de onda que informa sobre el contenido de los elementos de absorción de la piel, por lo que pueden ser específicos para cada segmento del tejido.

La secuencia de imágenes se puede superponer para obtener una imagen bidimensional de la lesión (**Vivas & Muñoz**, 2016). Asimismo, algunas estructuras pueden discernirse según la absorción y el esparcimiento de los cromóforos presentes, lo cual facilitaría el diagnóstico a partir de la morfología patológica (**Kapsokalyvas, et al.**, 2013).

El estudio de las imágenes multispectrales se basa en diferentes fenómenos físicos como la absorción, el esparcimiento, la reflexión y la transmisión, los cuales ocurren cuando una onda electromagnética incide sobre las diferentes capas de la piel (epidermis, dermis, hipodermis) con una longitud medible (de 400 a 700 nm) para luego emerger del interior de la piel como luz reflejada de forma difusa (**Vivas & Muñoz**, 2016).

Con este enfoque, la piel se reconoce como un medio turbio estratificado. Cuando la luz incide sobre los tejidos, la energía que penetra en la piel no se propaga en dirección recta, pues al entrar en contacto con las diferentes estructuras que componen el tegumento, la luz cambia de dirección de propagación, fenómeno este denominado esparcimiento. Los elementos responsables del esparcimiento en la piel son las fibras de colágeno, las organelas celulares, las células, los folículos pilosos y las glándulas sudoríparas (**Fodor, et al.**, 2012).

Para obtener las imágenes multispectrales nos apoyamos en la dermatoscopia, técnica diagnóstica no invasiva que se basa en la observación submacroscópica de lesiones cutáneas melanocíticas y no melanocíticas. Mediante la

utilización de un sistema óptico, llamado dermatoscopio, se amplifica la imagen por medio de un lente de aumento y se ilumina la piel con un sistema de iluminación multiespectral, consiguiendo así la observación de estructuras epidérmicas y dérmicas invisibles a simple vista. Este procedimiento se debe considerar como un paso intermedio entre la observación clínica y el estudio histopatológico de una lesión (De Giorgi, *et al.*, 2004; Argenziano, *et al.*, 2001).

El presente trabajo tiene como objetivo encontrar diferencias entre los distintos tipos de nevos melanocíticos adquiridos con base en la información proveniente de las imágenes multiespectrales. Dado que estas imágenes cuantifican la energía absorbida por los cromóforos presentes en la piel, lo que depende de la longitud de onda con la que se iluminen, se buscan pistas sobre el ordenamiento de los cromóforos asociados al tipo de nevo. En este sentido, se considera que el orden de los niveles de grises y su distribución en la imagen son cuantificables a través de dos medidas: la dimensión fractal y la entropía. Ello permite reconocer no solo la malignidad (nevo displásico) de la lesión, sino también su avance con respecto al resto de los lunares al verificar si son de tipo unión, compuesto o intradérmico.

### Detección de las características a partir de las imágenes digitales

Una imagen puede definirse como una función bidimensional de la intensidad de la luz  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  representan las coordenadas espaciales y el valor de  $f$  en un punto cualquiera  $(x, y)$  proporcional al brillo o nivel de gris de la imagen en él. Una imagen digital es una imagen  $f(x, y)$  que se ha discretizado tanto en las coordenadas espaciales y en el brillo, y puede considerarse como una matriz cuyos índices de fila y de columna identifican un punto de la imagen, en tanto que el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris en ese punto.

Una imagen constituye una colección de características visuales que describen su contenido. La detección de información cuantitativa permite diferenciar una clase de objetos de otra (Ruiz, *et al.*, 2010).

Con el fin de caracterizar los diferentes tipos de nevos melanocíticos adquiridos se establecieron sus diferentes características mediante el análisis fractal y el análisis de la entropía.

### Análisis fractal

El concepto fractal se ha utilizado en muchos estudios de imágenes médicas, como la morfogénesis pulmonar, las mamografías y las imágenes ultrasónicas de hígado (Falconer, 2007), así como en imágenes dermatoscópicas (Cavalcanti & Scharcanski, 2014; Manousakia, *et al.*, 2016).

Los NMA son elementos de la naturaleza que pueden describirse mediante la geometría fractal. El análisis fractal es el conjunto de procedimientos matemáticos utilizados para determinar la dimensión fractal de un objeto con el menor error posible y esta es la medida numérica adimensional del grado de irregularidad de un objeto.

El método más usado de determinación de la dimensión fractal es la llamada dimensión de Minkowski-Bouligand, también conocida como dimensión de Minkowski o dimensión de conteo de cajas. Al superponer el fractal en una cuadrícula de espacio uniforme, se cuenta la cantidad de cuadros necesarios para cubrir el objeto. La dimensión de conteo de cajas se calcula al ver cómo cambia este número a medida que hacemos la cuadrícula más fina. Asumiendo  $N_S$  como el número de cajas del lado  $S$  requeridas para cubrir el objeto, la dimensión fractal  $D$  se define como:

$$D = \lim_{S \rightarrow 0} \left( \frac{\ln(N_S)}{\ln(1/S)} \right) \quad (1),$$

donde  $D$  es la dimensión fractal,  $N_S$  es el número de piezas para cubrir el objeto y  $S$  es la escala del objeto. En la Figura 2f puede verse la última fase del análisis fractal.

El aumento de la irregularidad del objeto incide en el de la dimensión fractal. Esto corresponde a nuestra noción intuitiva de rugosidad o textura: cuanto más bajo sea el valor de  $D$ , más suave será el objeto, y cuanto mayor sea el valor de  $D$ , más áspero (Falconer, 2007).

Manausaki, *et al.* (2016) consideraron la medida de la dimensión fractal para distinguir 23 melanomas y 109 nevos melanocíticos adquiridos (44 displásicos y 65 nevos melanocíticos comunes) a partir de imágenes RGB. Sus resultados no mostraron una diferencia significativa ( $p=0,359$ ) entre los nevos displásicos y los nevos melanocíticos comunes.

### Análisis de la entropía

Al comparar imágenes es importante tener algún tipo de medida de la cantidad de información disponible en ellas. Shannon presentó una forma de medir la cantidad de información que contiene una variable aleatoria, conocida como entropía de Shannon, según se define en la ecuación 2.

$$E = \sum_{i=1}^{i=N} P_i \log(1/P_i) = - \sum_{i=1}^{i=N} P_i \log(P_i) \quad (2),$$

donde  $P(i)$  es la probabilidad de que ocurra un evento de la  $i$ -clase,  $N$  es el número total de clases, e  $i$  es la  $i$ -clase. En el caso de las imágenes,  $P(i)$  es la probabilidad de que se obtenga un nivel de gris específico  $i$ , y  $N$  el número total de grises en la imagen, que en el caso de una imagen de 8 bits es de 256 niveles de grises. El término  $\log(1/P(i))$  implica que la cantidad de información contenida en una imagen con distribución de grises  $P(i)$  está inversamente relacionada con la probabilidad de aparición del nivel de gris  $i$ . Debe señalarse que la entropía de Shannon también puede concebirse como una medida de incertidumbre, la cual depende no solo del número de posibles niveles de gris sino también de la probabilidad de que estos ocurran. La entropía es máxima cuando todos los niveles tienen la misma probabilidad de ocurrir (Brieva & Montes, 1995; Plum, *et al.*, 2003).

Así, una imagen con una gran cantidad de píxeles con la misma intensidad tiene poca entropía, en tanto que con una distribución uniforme de los valores de gris se obtiene una entropía elevada. En conclusión, la entropía de Shannon también constituye una medida de la distribución de la probabilidad de los valores de gris (Pluim, *et al.*, 2003).

**Metodología**

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo, Venezuela. La población incluyó sujetos a quienes médicos especialistas en dermatología diagnosticaron en un examen visual utilizando el método de ABCD; el diagnóstico definitivo se hizo mediante histopatología. Se pudo comparar la eficiencia de los métodos visuales con el diagnóstico histopatológico para clasificar el tipo de lunar, garantizando la evaluación independiente y cegada de la prueba que se pretendía validar y la técnica diagnóstica con la que se comparó. Se incluyeron en el estudio 146 muestras de lesiones melanocíticas adquiridas provenientes de 83 pacientes, todas diagnosticadas mediante histopatología y clasificadas posteriormente según los cuatro tipos de nevos melanocíticos adquiridos.

**Obtención de las imágenes multispectrales**

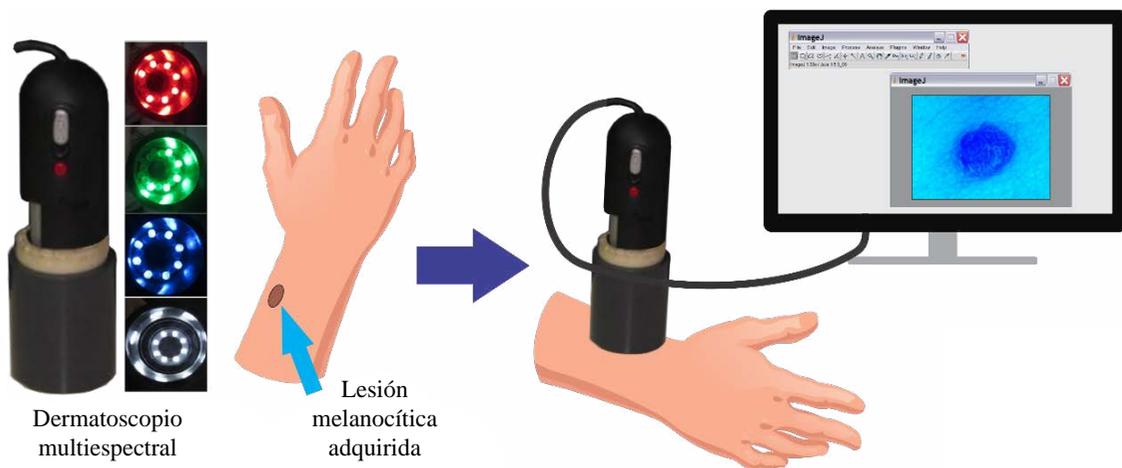
Las imágenes multispectrales se obtuvieron utilizando un dermatoscopio multispectral construido en el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC) (Muñoz, 2014). Dicho equipo está constituido por ocho diodos emisores de luz (*light-emitting diode*, LED) tricromáticos de 3 mm: azul (470 nm), verde (580 nm) y rojo (660 nm), con una lente de 25 mm y un aumento variable de 1X a 4X. Posee también una rosca que permite cambiar la longitud de onda emitida. Para obtener las imágenes, el dermatoscopio se conecta a un computador y mediante el programa de acceso libre ImageJ

(*Image Processing and Analysis in Java*) permite visualizar y guardar las imágenes observadas. El especialista coloca el dermatoscopio sobre la lesión a estudiar y selecciona una de las longitudes de onda para visualizar la imagen de la lesión incidida por dicha longitud de onda a través del ImageJ. El proceso se puede hacer con las seis longitudes de onda que permite el dermatoscopio con la ayuda de una cámara CCD de 3.0 megapíxeles. Las diferentes bandas o longitudes de onda de la luz penetran en la piel a distintas profundidades, y así se obtienen imágenes secuenciales de la misma lesión para el mapeo distante e *in vivo* de cromóforos de la piel mediante el análisis de los datos espectrales reflejados en cada píxel de la imagen (Figura 1).

**Procesamiento de imágenes multispectrales**

Antes del procesamiento se obtiene la imagen en escala de grises y la imagen binaria. La primera debe resaltar las variaciones de brillo en un mismo tipo de nevo melanocítico adquirido como efecto de la distribución de los nidos de melanina, por lo que se aplicó una equalización adaptativa del histograma por contraste limitado (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*, CLAHE). La imagen binaria responde a un umbral tal que binariza en 0 el nevo melanocítico adquirido o NMA y en 1 el resto de la piel sana.

El proceso de captura de la imagen del NMA permite obtenerla en RGB para cada longitud de onda. En este caso, se transformó en una imagen en escala de grises mediante el método de promedios ponderados, es decir:  $I = r \times R + g \times G + b \times B$ , con valores de  $(r, g, b) = (0,299, 0,587 \text{ y } 0,114)$  para aproximarse a la sensibilidad cromática del ojo humano. No se descartó el uso de otros métodos, pero éstos condujeron a resultados poco satisfactorios. El resultado se equalizó para así evitar la iluminación no homogénea y mejorar el contraste. Por último, se binarizó la imagen empleando un umbral global, lo que implicó asumir histogramas bimodales (Figura 2b).

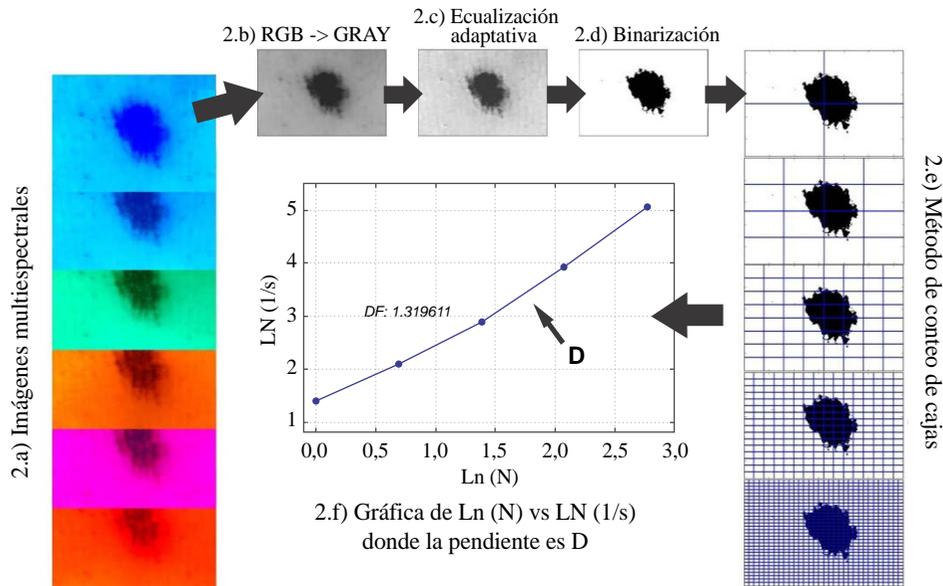


**Figura 1.** Diagrama del proceso de adquisición de las imágenes multispectrales utilizando un dermatoscopio multispectral equipado con LED tricromáticos RGB y una cámara CCD de 3,0 megapíxeles conectada a una computadora para capturar las imágenes utilizando el programa Image J y el paquete *Analysis in Java*

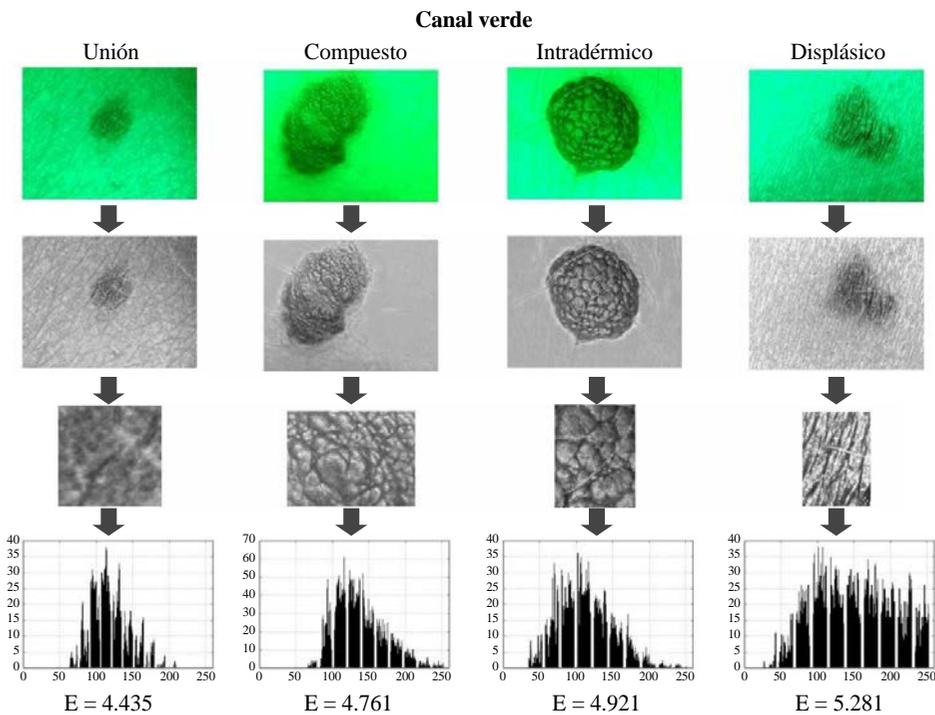
### Características de las imágenes multiespectrales

**Dimensión fractal.** Se diseñó un algoritmo para establecer la dimensión fractal de las imágenes binarias utilizando el método de conteo de cajas en el cálculo de la dimensión fractal (Figura 2 c y d).

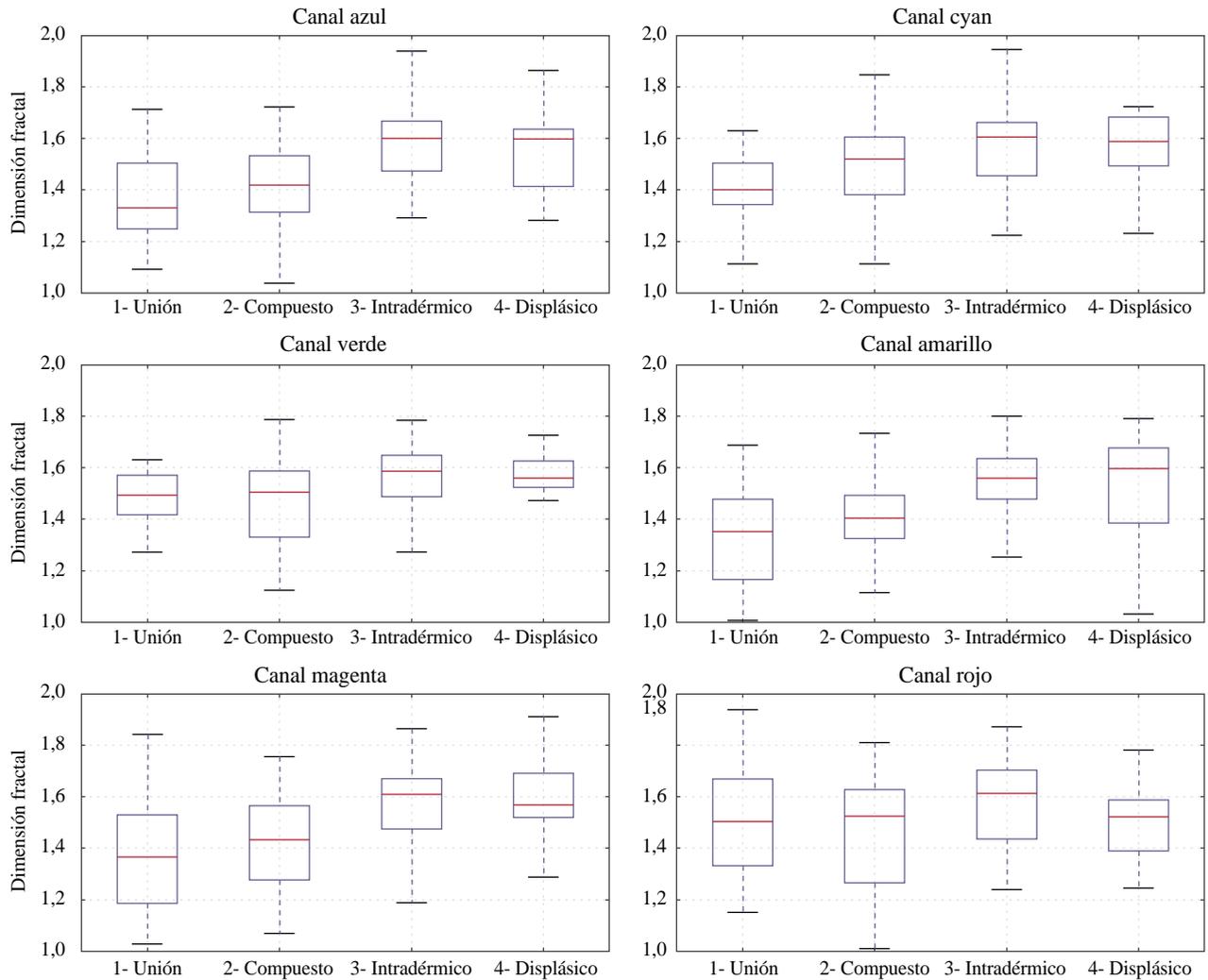
**Entropía.** Se diseñó un algoritmo para calcular la entropía del histograma de las imágenes en escala de grises ecualizadas utilizando el paquete estadístico de python scipy.stats. La imagen proporcionada es un recorte del lunar que incluye solo la lesión. En la Figura 3 se observan cuatro cortes



**Figura 2.** Diagrama del proceso para el cálculo de la dimensión fractal de las imágenes multiespectrales. **a)** Imágenes multiespectrales. **b)** Escala de grises. **c)** Ecualización de la imagen. **d)** Binarización de la imagen. **e)** Métodos de conteo de cajas. **f)** Gráfica de  $\text{Ln}(1/s)$  Vs.  $\text{Ln}(N)$ , donde el parámetro D (dimensión fractal) está dado por la pendiente de la recta



**Figura 3.** Diagrama de proceso para el cálculo de la entropía de las imágenes multiespectrales. Imágenes multiespectrales, escala de grises, ecualizado, recorte del área de la lesión que se va a estudiar, gráfica del histograma de la imagen de la lesión recortada y por último se calcula la entropía del histograma de la imagen.



**Figura 4.** Gráficas de cajas de la comparación de las distribuciones en cada canal de la dimensión fractal de cada tipo de nevo melanocítico adquirido. **a)** Canal azul. **b)** Canal cian. **c)** Canal verde. **d)** Canal amarillo. **e)** Canal magenta. **f)** Canal rojo.

correspondientes a los cuatro tipos de nevos melanocíticos adquiridos, así como la distribución de grises o histograma en los niveles de grises de cada lesión.

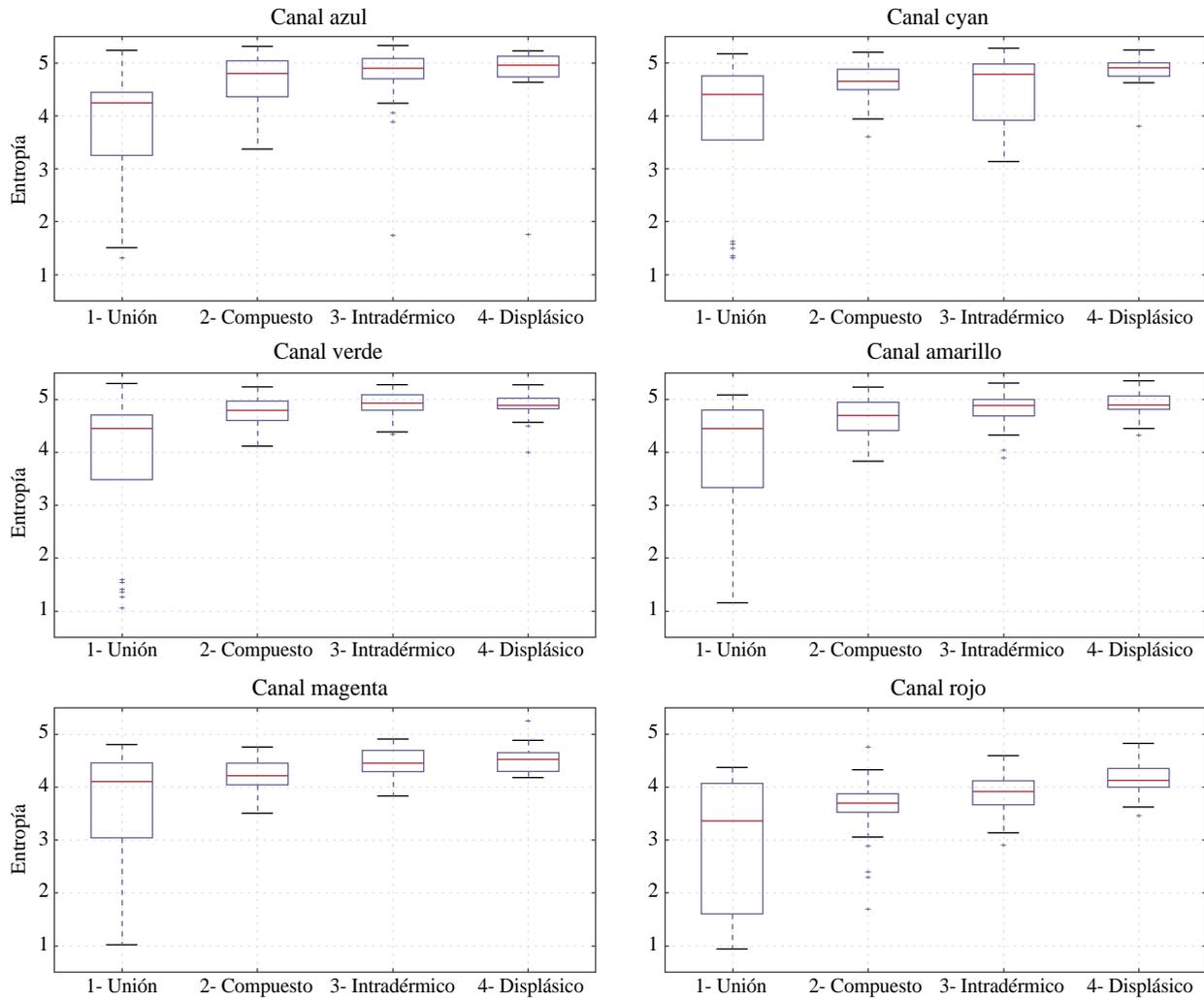
**Resultados y análisis**

Los nevos melanocíticos adquiridos se manifestaron en una imagen según la proporción de luz absorbida, lo cual depende de la presencia y la distribución de los nidos de melanina en la lesión. Para determinar si existían diferencias significativas en los NMA se hizo un análisis de varianza de los cuatro tipos: de unión, compuesto, intradérmico y displásico, en cada uno de los canales y considerando la medida de la dimensión fractal (Figura 4) y la de la entropía (Figura 5). En la Tabla 1 se resumen los resultados del ANOVA en cada canal tanto para la dimensión fractal como para la entropía. El nivel de significación fue de  $\alpha = 0,05$ , por lo que se pudo concluir que las medidas de dimensión fractal permitieron diferenciar los grupos de NMA con un nivel de significación ( $p$ ) menor que  $\alpha$ , excepto cuando la imagen

de la lesión se obtuvo a través del canal rojo. Asimismo, la medida de la entropía también permitió diferenciar los grupos de NMA con un alto nivel de significación ( $p < \alpha$ ), esta vez en todos los canales de observación.

En la Figura 4 se pueden observar los gráficos de cajas que representan la distribución de las medidas de la dimensión fractal por grupos de NMA en los seis canales. Resalta lo encontrado en el canal verde, en el cual los datos fueron menos dispersos que en cualquiera de los otros; sin embargo, fue en los canales azul ( $p=7,87e-8$ ) y magenta ( $p= 7,00e-6$ ) donde se registró mayor significación en la diferencia de las medias de la dimensión fractal entre los grupos.

Las pruebas por pares se llevaron a cabo con el método de Tukey (Tabla 2). Los pares de grupos de interés fueron el de unión y displásico y el de compuesto y displásico, los cuales mostraron altos niveles de significación ( $p<0,05$ ), excepto en los canales verde y rojo. La prueba no pudo distinguir entre lesiones intradérmicas y displásicas en ninguno de los canales.



**Figura 5.** Gráficas de cajas de la comparación de las distribuciones en cada canal de la entropía de los tipos de nevo melanocítico adquirido. **a)** Canal azul. **b)** Canal cian. **c)** Canal verde. **d)** Canal amarillo. **e)** Canal magenta. **f)** Canal rojo

**Tabla 1.** Resultados del ANOVA unifactorial con cada longitud de onda para la dimensión fractal y la entropía

Canal	Dimensión fractal	
	P	F <sub>(3,140)</sub>
Azul	7,87e-08	13,59
Cyan	1,28e-03	5,53
Verde	5,13e-03	4,45
Amarillo	1,13e-07	13,10
Magenta	7,00e-06	9,73
Rojo	4,85e-02	2,69

F: estadístico F

Las medidas de la entropía y su dispersión pueden verse en las gráficas de cajas de la Figura 5. Resulta inconveniente usar esta medida para agrupar los lunares dada su baja significación de la homeogeneidad de los datos en la prueba de

Levene ( $p < 0,05$ ). Los resultados de la prueba T de *Student* en los pares de grupos de interés (unión y displásico, compuesto y displásico e intradérmico) se presentan en la Tabla 2. Se destacó la alta significación ( $p < 0,05$ ) en los análisis en los canales cian y rojo, dado que con esta radiación se logró diferenciar los nevos de unión, compuesto e intradérmicos respecto a los displásicos.

**Conclusiones**

El estudio presenta una propuesta para distinguir los nevos melanocíticos adquiridos en términos del ordenamiento de los nidos de melanina vista la distribución de la energía que absorben en una imagen digital. Todos son benignos. El análisis digital de las imágenes dermatoscópicas multi-espectrales permitió obtener las medidas de distribución de la energía absorbida por los Nevos melanocíticos adquiridos. Mediante la dimensión fractal se midió el orden espacial, en tanto que con la entropía se midió el orden de la distribución de grises en las imágenes. Ambas medidas se sometieron a

**Tabla 2.** Resultados (p) de la comparación por pares de grupos de interés considerando la dimensión fractal y la entropía

	Prueba de Tukey (dimensión fractal)			Prueba T de Student (entropía)		
	UD	CD	ID	UD*	CD**	ID
Cian	0,002	0,010	0,900	0,002	0,023	0,012**
Azul	0,002	0,001	0,900	0,002	0,503	0,905
Verde	0,307	0,195	0,900	0,002	0,310	0,546
Amarillo	0,002	0,015	0,900	0,001	0,011	0,263
Magenta	0,002	0,014	0,900	0,001	1,57e-4	0,293
Rojo	0,900	0,730	0,730	1,0e-4	2,55e-5	0,005

\*Prueba de Leveine:  $p < 0,05$  (se asumen varianzas diferentes). \*\* Prueba de Leveine:  $p > 0,05$  (se asumen varianzas iguales). UD: unión-displásico, CD: compuesto-displásico, ID: intradérmico-displásico,

un ANOVA unifactorial con el cual se pudieron establecer las diferencias entre los distintos grupos de nevos melanocíticos adquiridos y el orden asociado a los tipos de NMA.

Los resultados permiten concluir que el nivel de confianza ( $p < 0,05$ ) de las comparaciones de las medidas de la dimensión fractal y la entropía permitió diferenciar los distintos grupos de NMA. Asimismo, para distinguir los nevos displásicos y los nevos melanocíticos comunes se pudo seleccionar un canal específico, por ejemplo, los canales cyan y rojo para la entropía.

Las imágenes multispectrales son de gran relevancia, ya que con ellas puede reconocerse la forma en que la luz interactúa con un medio estratificado como la piel humana. Así, cada longitud de onda penetra de manera distinta en la piel y permite aproximarse a una tomografía de la distribución de los nidos de melanina en los nevos melanocíticos adquiridos en cada capa de la piel.

### Contribución de los autores

Ariana C. Di Lorenzo: realizó la revisión bibliográfica, procesado y análisis de las imágenes, análisis de resultados y redacción del texto. Reimer A. Romero: planeación del trabajo, participó en análisis de las imágenes y de resultados, redacción de texto y revisión general. Aarón Muñoz: planeación y evaluación óptica el trabajo, participó en análisis de los resultados y revisión general. Sandra C. Vivas: asesoró el parte dermatológico del trabajo, participó en análisis de los resultados y revisión general. Irene Paredes: participó en la preparación metodológica del registro de pacientes, validación patológica de los mismos y la adquisición de imágenes.

El trabajo fue presentado en la modalidad de póster en el XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones (ENO-CANCOA), evento llevado a cabo en la Universidad Industrial de Santander sede Bucarica, en Bucaramanga, Colombia del 20 al 24 de noviembre de 2017.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### Referencias

- Air University. Space Primer** (2003). 'Multispectral Imagery. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.au.af.mil/au/awc/space/primer/index.htm>
- Amelard R., Glaister J., Wong A., Clausi D.A.** (2014). Melanoma Decision Support Using Lighting-Corrected Intuitive Feature Models. In: Scharcanski J., Celebi M. Computer Vision Tech-niques for the Diagnosis of Skin Cancer. Jacob Scharcanski, M. Emre Celeb, Springer Berlin Heidelberg. Series in BioEngineering. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Argenziano, G. & Soyer, P.** (2001). 'Dermoscopy of pigmented skin lesions – a valuable tool for early detection. The Lancet Oncology. **2** (7): 443-449.
- Brieva, J. A. & Montes, L.** (1995). El Análisis de entropía. Un método para determinar el grado de selección en un sedimento. Aplicación en un área del Caribe colombiano". *GEOCOL*. **19**: 145-151.
- Cavalcanti P.G. & Scharcanski J.** (2014) Texture Information in Melanocytic Skin Lesion Analysis Based on Standard Camera Images. In: Scharcanski J., Celebi M. (Editors). Computer Vision Techniques for the Diagnosis of Skin Cancer. Series in BioEngineering. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Chang WY, Huang A, Yang CY, Lee CH, Chen YC, Wu TY, Chen GS.** (2013). Computer-aided diagnosis of skin lesions using conventional digital photography: A reliability and feasibility study. *PLoS One*, **8** (11).
- De Giorgi, V., Piccolo, D., Argenziano, G., Soyer, P.** (2004). Interactive atlas of dermoscopy'. *JAAD*. **50** (5): 807-808.
- Estrada G. & William F.** (2004). Geometría fractal: conceptos y procedimientos para la construcción de fractales. 1a Edición, Bogotá, D.C. Colombia, Cooperativa Editorial Magisterio.
- Falconer, K.** (2007) Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications'. UK, Wiley.
- Fodor, L., Ullmann, Y., Elman, M.** (2012). Aplicaciones estéticas de la luz pulsada intensa'. Alemania, Editorial Amolca.
- González, R.C. & Woods, R.E.** (2008). Digital Image Processing. New Jersey, USA, Pearson Prentice Hall.
- International Agency for Research on Cancer (IARC).** (2012). GLOBOCAN 2012: Estimated Cancer Incidence, Mortality and Prevalence Worldwide in 2012'. Fecha de consulta: 10 de abril de 2018. Disponible en: <http://globocan.iarc.fr>
- Isasi A. G., Zapirain B. G., Zorrilla A. M.** (2011). Melanomas non-invasive diagnosis application based on the ABCD rule and pattern recognition image processing algorithms. *Comput Biol Med*. **41** (9): 742-55.

- Kapsokalyvas D., Bruscano N., Alfieri D., de Giorgi V., Cannarozzo G., Cicchi R., Massi D., Pimpinelli N., Pavone F. S.** (2013). Spectral morphological analysis of skin lesions with a polarization multispectral dermoscope. *Optics Express*. **21** (4): 4826-4840.
- Kim S., Cho D., Kim J., Kim M., Youn S., Jang J. E., Je M., Lee D. H., Lee B., Farkas D. L., Hwang J. Y.** (2016). Smartphone-based multispectral imaging: System development and potential for mobile skin diagnosis. *Biomedical Optics Express*. **7** (12): 5294-5307.
- Manousakia A. G., Manios A. G., Tsompanakic E. I., Tosca A. D.** (2016). Use of color texture in determining the nature of melanocytic skin lesions—a qualitative and quantitative approach. *Computers in Biology and Medicine*. **36** (4): 419-427.
- Ruela, M., Barata, C., Marques, J.S, Rozeira, J.** (2015). A system for the detection of melanomas in dermoscopy images using shape and symmetry features. *CMBBE: Imaging & Visualization*. **5** (2): 127-137.
- McIntosh L. M., Summers R., Jackson M., Mantsch H. H., Mansfield J. R., Howlett M., Crowson A. N., Toole J.W.P.** (2001). Towards Non-Invasive Screening of Skin Lesions by Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Investigative Dermatology*. **116** (1): 175-181.
- Moreno-Giménez, J.C., Garnacho-Saucedo, G.M.** (2012). Trastornos de la pigmentación: léntigos, nevos y melanoma. *Fotoprotección. Pediatría Integral*. **16** (4): 321-331.
- Muñoz, A. & Vivas, S.** (2014). Implementación de sistema de captura de imágenes multiespectrales para el análisis de la piel humana. *FARAUTE*. **9** (1).
- Paredes, I., Rabzelj B., Vivas S., Muñoz A.** (2016) Microscopía de epiluminiscencia multiespectral. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/284187217\\_microscopia\\_de\\_epiluminiscencia\\_multiespectral](https://www.researchgate.net/publication/284187217_microscopia_de_epiluminiscencia_multiespectral)
- Pluim, J. P. W., Maintz, J. B. A., Viergever, M. A.** (2003). Mutual-Information-Based Registration of Medical Images: A Survey. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. **22** (8).
- Rex Cavallé, J., Ferrándiz Foraster, C. Editors.** (2007). *Nevos melanocíticos*. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.aeped.es/sites/default/files/documentos/Nevos.pdf>
- Ruiz, M. E., Palomino, N., Contreras, W.** (2010). Procesamiento digital de textura: técnicas utilizadas en aplicaciones actuales de cbir. *RISI*. **7** (1): 57-64.
- Schmerling R.A., Loria D., Cinat G., Ramos W.E., Cardona A.F., Sánchez J.L., et al.** (2011). Cutaneous melanoma in Latin America: The need for more data. *Rev Panam Salud Pública*. **30** (5):431-8.
- Sortino-Rachou, Curado M.P., Cancela M. de C.** (2011). Cutaneous melanoma in Latin America: A population-based descriptive study. *Cad Saúde Publica*. **27** (3):565-72.
- The Cancer Atlas website.** (2008). Explore Data. Fecha de consulta: 10 abril, 2018. Disponible en: <http://canceratlas.cancer.org/>
- Vivas T. S. & Muñoz M.** (2016). Tomografía óptica multiespectral cutánea con imagej. *OPA*. **49** (4):219–224.
- Wolff, K., Goldsmith, L. A., Katz S. I., Gilchrist B. A., Paller A. S., Leffel D. J.** (2010). *Dermatología en medicina general*. 7a Edición. Buenos Aires. Editorial Panamericana.

# Specklegramas de fibra óptica analizados mediante procesamiento digital de imágenes

Luis C. Gutiérrez<sup>1</sup>, Luis F. Castaño<sup>1</sup>, Jorge A. Gómez<sup>1</sup>, Jairo C. Quijano<sup>1</sup>, Jorge A. Herrera-Ramírez<sup>1,2</sup>, Alejandro Hoyos<sup>1</sup>, Luiz C. Da Silva Nunez<sup>3</sup>, Francisco J. Vélez<sup>4</sup>, Victor H. Aristizabal<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación de Física Básica y Aplicada, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal Fluminense, São Paulo, Brasil.

<sup>4</sup>Grupo de Investigación TERMOMECC, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia

## Resumen

Los sensores basados en el análisis de la distribución de intensidades del patrón de interferencia modal a la salida de una fibra óptica son conocidos como sensores ópticos basados en specklegramas de fibra óptica (Fiber Specklegram Sensors, FSSs). En este trabajo se muestran los specklegramas, simulados numéricamente mediante el método de los elementos finitos, de una fibra óptica Thorlabs 1550BHP perturbada mecánicamente, y se hace uso de la información global o de regiones del specklegrama mediante el procesamiento digital de imágenes a través de un análisis de correlación. Los resultados muestran como la correlación entre imágenes se puede usar como valor de cuantificación para la medición de fuerzas, y cómo la división del patrón por zonas de interés puede mejorar las características metroológicas del sensor. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Specklegramas de fibra óptica; Perturbaciones físicas; Sensores de fibra óptica; Simulación numérica.

## Fiber specklegram sensor analysis by digital image processing

### Abstract

Fiber Specklegram Sensors (FSSs) are sensors based on the analysis of specklegrams, i.e., the intensity distribution of the modal interference pattern at the output of an optical fiber. By using a finite element method, this work shows numerically simulated specklegrams of an optical fiber Thorlabs 1550BHP under a mechanical perturbation. We employ digital image correlation to analyze the behavior of these specklegrams with different applied forces. The image correlation analysis is applied over the whole specklegram or over selected regions. The results show that the correlation between images is a suitable quantifier of the applied force. We also show that the analysis of selected regions improves the metrological parameters of these sensors. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Fiber Specklegram Sensors; Physical Perturbations; Optical Fiber sensors; Numerical simulation.

## Introducción

Cuando la radiación laser es insertada en una fibra óptica multimodo, los efectos de propagación producen a la salida de la fibra un patrón de speckle (moteado), el cual contiene información sobre el estado espacial de la fibra óptica y que puede ser usado en aplicaciones metroológicas (Aristizabal, Vélez, Rueda, Gómez, & Gómez, 2016; Efendioglu, 2017; Gasvik, 2002; Hung, 1978; R. Jones and C. Wykes, 1989; Saleh & Teich, 1991; Yu & Yin, 2002). De esta manera, pequeñas perturbaciones sobre la fibra multi-modo producirán cambios en la distribución espacial del patrón de speckle que pueden ser detectados mediante cambios locales de intensidad o técnicas de correlación (Crammond, Boyd, & Dulieu-Barton, 2013; Liu & Wei, 2007; B. Wang, Huang, Guo, & Yu, 2003). Los sistemas de sensado

basados en patrones de speckle producidos en fibras ópticas multimodo son conocidos como Sensores de Specklegramas de Fibra Óptica (FSS por sus siglas en inglés).

Los FSS han sido ampliamente estudiados mediante arreglos holográficos cuyo medio de registro es un material fotorrefractivo (Gmez, Lorduy G., & Salazar, 2011; Gómez, Lorduy G., & Salazar, 2011; Gómez & Salazar, 2012; Wu, Yin, & Yu, 1991; Yu, Yin, Zhang, & Guo, 1994; Yu, Zhang, Yin, & Ruffin, 1995), sin embargo, más recientemente, se ha explorado la importancia de este tipo de sistemas en esquemas no-holográficos, en la medición

### \*Correspondencia:

Victor H. Aristizabal, [vharisti@yahoo.com](mailto:vharisti@yahoo.com), [victor.aristizabal@campusucc.edu.co](mailto:victor.aristizabal@campusucc.edu.co)

Recibido: 2 de abril de 2018

Aceptado: 16 de mayo de 2018

Editor: Román Castañeda Sepúlveda

de múltiples parámetros de interés en ingeniería (Fujiwara, Marques dos Santos, & Suzuki, 2017; Fujiwara, Wu, dos Santos, Schenkel, & Suzuki, 2017; Fujiwara, Wu, & Suzuki, 2012; Kumar, Varshney, Antony C, & Sharma, 2003; Li, Cai, Geng, Qu, & Fang, 2007; Malki, Gafsi, Michel, Labarrère, & Lecoy, 1996; Rodríguez-Cobo, Lomer, & Lopez-Higuera, 2015; B. Wang, Guo, Yin, & Yu, 2004; Y. Wang, *et al.*, 2008; Yu, Wen, Yin, & Uang, 1993). Principalmente, dos posibilidades han sido reportadas alrededor de los arreglos no-holográficos. En el primer caso, se han usado herramientas de procesamiento de imágenes para calcular la correlación entre los patrones de speckle perturbados que son capturados mediante cámaras CCD a la salida de la fibra multimodo (Malki, *et al.*, 1996; B. Wang, *et al.*, 2004; Yu, *et al.*, 1993). En el segundo caso, se han usado esquemas experimentales de fibras mono-multi-modo para generar y filtrar el patrón de speckle que se genera en la fibra multimodal, lo que permite configurar esquemas de FSS interrogados por variación de potencia óptica (V.H. Aristizabal, Hoyos, Rueda, Gomez, & Gomez, 2015; Darío Gómez & Gómez, 2013). Esta estrategia presenta ventajas de simplicidad, estabilidad y bajo costo (Zhang & Ansari, 2006), pero la correlación entre la distribución espacial de los patrones de speckle y el estado de la fibra óptica se pierde, ya que la salida del sensor es puntual.

En este trabajo exploramos numéricamente la generación de patrones de speckle a la salida de una fibra óptica y el uso del cálculo de valores de correlación entre los patrones de speckle para la medición de perturbaciones físicas, específicamente, esfuerzos mecánicos.

### Análisis teórico

En aproximación de campo cercano, la distribución espacial de intensidad del campo a la salida de una fibra óptica multimodo se puede escribir en coordenadas polares en el punto como (Darío Gómez & Gómez, 2013):

$$I = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M A_m^2 B_{nm}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta) + \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l B_{nm} (U_m R) B_{nl} (U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta) \times \cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\phi_{ml}), \quad (1)$$

donde  $\Delta\beta_{ml} = \beta_m - \beta_l$  es la diferencia de las constantes de propagación,  $\Delta\phi_{ml} = \phi_m - \phi_l$  es la diferencia de las constantes de fase,  $A_m$  y  $A_l$  son las amplitudes de los modos  $m$  y  $l$ , respectivamente.  $R = a/r$  es el radio normalizado siendo  $a$  el radio del núcleo de la fibra óptica,  $Y = n\sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$  es la admitancia característica del núcleo donde  $n$  es el índice de refracción del núcleo,  $U_m = a\sqrt{k_0^2 n^2 - \beta_m^2}$  es el parámetro modal,  $k_0 = 2\pi\lambda_0$  es el número de onda de la luz en el vacío,  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío y  $B_{nm}(U_m R)$  es la función de Bessel de primera especie.

Cuando la fibra es perturbada, se asume que los cambios en el patrón de speckle se deben principalmente a cambios

de fase y que la intensidad total del patrón de speckle en la fibra es constante (Darío Gómez & Gómez, 2013). Ahora, teniendo en cuenta lo dicho anteriormente y considerando que al sensor de specklegramas a fibra o FSS (Fiber Specklegram Sensor) se le aplica una perturbación en una pequeña región de longitud  $L$ , los cambios de fase entre el modo  $m$  y  $l$  se pueden escribir como  $\delta(\Delta\beta_{ml} L)$ . De esta manera, si las variaciones de fase son pequeñas, la nueva distribución de intensidad del patrón a la salida de la fibra multimodo en el punto  $(r, \theta)$  es:

$$I' = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M A_m^2 B_{nm}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta) + \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l B_{nm} (U_m R) B_{nl} (U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta) \times \cos(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\phi_{ml}) \pm \delta(\Delta\beta_{ml} L) \sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\phi_{ml}). \quad (2)$$

Entonces, para calcular los cambios en el patrón de intensidad  $\Delta I$  se usan las ecuaciones (1) y (2):

$$\Delta I = I - I' = \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l B_{nm} (U_m R) B_{nl} (U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta) \times \delta(\Delta\beta_{ml} L) \sin(\Delta\beta_{ml} z - \Delta\phi_{ml}). \quad (3)$$

De (3) se puede concluir que las variaciones en el patrón de intensidad son debidos a las diferencias de fase de los modos  $m$  y  $l$ . Entonces, los cambios de fase se pueden escribir como  $\Delta\beta_{ml} = n D_{ml}$ , donde  $D_{ml}$  es una constante proporcional asociada con el cambio de fase entre los modos  $m$  y  $l$ . De esta forma, los cambio en la constante de propagación en la dirección  $i$  ( $i = x, y$  o  $z$ ) debido a una perturbación en un segmento  $L$  sobre la fibra se puede expresar como

$$\delta_i(\Delta\beta_{ml} L) = D_{ml} \delta_i(nL) \quad (4)$$

En la ecuación (4) se puede observar que los cambios en las constantes de propagación de los modos que viajan a través de la fibra se deben a cambios en la longitud de camino óptico  $\delta_i(nL)$ . Es posible demostrar que cuando una perturbación es aplicada al segmento de fibra multimodo  $\delta_i(nL)$  está dado por

$$\delta_i(nL) = \delta_i nL + n \delta_i L = L(\Delta n_i + n S_i) \quad (5)$$

donde,  $\Delta n_i = n_i - n_0 \approx -\frac{n_0^3}{2} P_{ik} S_k = -C_{ik} \sigma_k$  (aquí se indica en notación tensorial) es el cambio del índice de refracción siendo el material isotrópico en un momento inicial con índice  $n_0$ ,  $S_i$  es la deformación mecánica (mechanical strain en inglés) y  $\sigma_i$  es la tensión o esfuerzo mecánico (mechanical stress en inglés) en la dirección principal  $i$ .  $P_{ik}$  es el tensor de deformación mecánica y  $C_{ik}$  es el tensor de esfuerzo mecánico (Aristizabal, *et al.*, 2016). En forma más simplificada:

$$\begin{aligned} \delta_x(nL) &= L(\Delta n_x + n S_x) \\ \delta_y(nL) &= L(\Delta n_y + n S_y) \\ \delta_z(nL) &= L(\Delta n_z + n S_z) \end{aligned} \quad (6)$$

donde bajo la suposición de deformación plana (plane strain approximation en inglés), es decir  $S_z = 0$  se tiene que los cambios de índice de refracción debido a efectos mecánicos son (Aristizabal, *et al.*, 2016; Mase & Mase, 1999):

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= n_x - n_0 = -\frac{n_0^3}{2}(P_{11}S_x + P_{12}S_y) \\ \Delta n_y &= n_y - n_0 = -\frac{n_0^3}{2}(P_{12}S_x + P_{11}S_y) \\ \Delta n_z &= n_z - n_0 = -\frac{n_0^3}{2}P_{12}(S_x + S_y), \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $P_{11}$  y  $P_{12}$  son conocidos como coeficientes Pockels. Entonces, las ecuaciones en (6) quedan

$$\begin{aligned} \delta_x(nL) &\approx n_0L \left[ S_x - \frac{n_0^2}{2}(P_{11}S_x + P_{12}S_y) \right] \\ \delta_y(nL) &\approx n_0L \left[ S_y - \frac{n_0^2}{2}(P_{12}S_x + P_{11}S_y) \right] \\ \delta_z(nL) &\approx n_0L \left[ S_z - \frac{n_0^2}{2}P_{12}(S_x + S_y) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

En las ecuaciones (8), si las deformaciones mecánicas son pequeñas del orden de  $10^{-3}$  en fibras ópticas (Gianino & Bendow, 1981), se puede despreciar el término que contiene los coeficientes Pockels debido a que estos son mucho menores que uno (Aristizabal, *et al.*, 2016; Victor H. Aristizabal, Velez, & Torres, 2006), obteniéndose la ecuación simplificada:

$$\delta(nL) = \delta_x(nL) = \delta_y(nL) = \delta_z(nL) \approx n_0LS_z. \quad (9)$$

En la ecuación aproximada (9),  $S_z$  se puede estimar como la deformación unitaria de ingeniería que se define como  $(L - L_0)/L_0$ . Al reemplazar la ecuación (9) en (3), se puede observar que los cambios de la intensidad en el patrón de speckle varía linealmente con la deformación mecánica producida en la fibra óptica. En conclusión, cuando la fibra óptica es perturbada, el patrón de speckle a la salida de la fibra es ligeramente modificado por los cambios de fase en la fibra óptica multimodo. Estas modificaciones producen variaciones locales de intensidad lo que genera pequeñas deformaciones en el patrón de speckle de la fibra. Este tipo de comportamiento se ilustra en (Aristizabal, *et al.*, 2016) donde la intensidad es perturbada localmente deformando ligeramente el patrón de speckle de la fibra para el caso de una perturbación mecánica.

En este trabajo se empleará un método alternativo para calcular las intensidades definidas en las expresiones (1) y (2). Primero, para calcular las distribuciones de intensidad del campo eléctrico para una fibra multimodo bajo la aplicación de una línea de carga mecánica (Aristizabal, *et al.*, 2016; Victor H. Aristizabal, *et al.*, 2006), se soluciona numéricamente mediante el método de los elementos finitos la ecuación de onda vectorial para una onda monocromática (V.H. Aristizabal, Velez, & Torres, 2004, 2006; Torres, Aristizabal, & Andrés, 2011):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k_0^2 n^2 \vec{E} = 0, \quad (10)$$

dónde  $n$  es la distribución del índice de refracción de la fibra y se puede expresar como:

$$n = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

siendo  $n_x$ ,  $n_y$  y  $n_z$  los índices definidos en (7).  $n_0$  para el núcleo se calculó usando la ecuación de Sellmeier para el Sílice fundido (Aristizabal, *et al.*, 2016):

$$\begin{aligned} n_{0\text{núcleo}}^2(\lambda[\mu\text{m}]) &= 1 + \frac{0.6961663\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.0684043^2} \\ &+ \frac{0.4079426\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 9.896161^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

y  $n_0$  para el revestimiento se computó desde la ecuación (12) y la apertura numérica de la fibra bajo estudio ( $NA = \sqrt{n_{0\text{núcleo}}^2 - n_{0\text{revestimiento}}^2}$ ). De esta manera se obtienen el campo vectorial de los modos y las constantes de propagación para el sistema perturbado mecánicamente. Todos los modos calculados se suman vectorialmente para hallar la intensidad del campo resultante, obteniéndose finalmente el patrón de speckle (Aristizabal, *et al.*, 2016).

Ya que los cambios de intensidad por perturbaciones se dan a una escala local cercana a la del tamaño del grano de speckle, estos cambios no se pueden cuantificar adecuadamente por medio del promedio de la intensidad del patrón speckle completo. Así, cuando se tienen imágenes, regularmente se usan técnicas de correlación para esta cuantificación. La implementación algebraica de esta técnica se puede llevar a cabo por medio de varias expresiones similares. (Efendioglu, 2017; Gubarev, Li, Klenovskii, & Glotov, 2016), aunque la más común es el coeficiente de correlación (C) dado por:

$$C = \frac{\sum_i \sum_j (I_{ref}(i,j) - \langle I_{ref} \rangle) \cdot (I_n(i,j) - \langle I_n \rangle)}{\sqrt{(\sum_i \sum_j (I_{ref}(i,j) - \langle I_{ref} \rangle)^2) (\sum_i \sum_j (I_n(i,j) - \langle I_n \rangle)^2)}} \quad (13)$$

donde  $\langle I_{ref} \rangle$  y  $\langle I_n \rangle$  corresponden a las intensidades promedio del patrón de speckle a la salida de la fibra en un estado de referencia y perturbada, respectivamente.

## Resultados y discusión

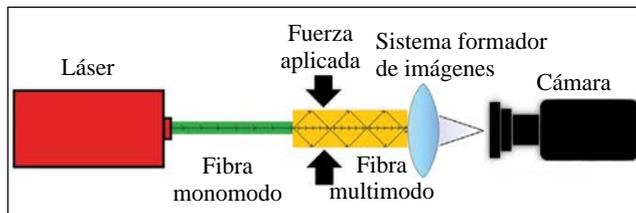
Siguiendo la metodología explicada anteriormente, se calculó y simuló el patrón de speckle para una fibra multimodo (MMF) Thorlabs 1550BHP, con los parámetros descritos en la Tabla 1, donde la fuente de luz tiene una distribución gaussiana y el campo eléctrico polarizado en  $x$ . A la fibra multimodo se le aplicó una fuerza en dirección contraria a  $y$ . En la Figura 1 se ilustra la situación física que se simula. Los patrones de la Figura 2 muestran el speckle obtenido mediante la superposición de pocos modos para diferentes valores de la fuerza de perturbación, alrededor de 16 modos que son los que se propagan en la fibra estudiada. En este caso, debido a que la fibra que estudiamos sólo soporta 16 modos de propagación, la distribución de puntos brillantes y oscuros no corresponde a la de un patrón de speckle bien comportado, sino una distribución de intensidades con una modulación más suave extendida sobre toda la salida de la

fibra. Así, estas imágenes hacen evidente la interferencia entre los modos de propagación y el intercambio de energía entre ellos al perturbar la fibra.

Al analizar la evolución de estos patrones completos usando la medida de correlación entre ellos en diferentes estados de perturbación, se encuentran varios comportamientos

**Tabla 1.** Propiedades de la fibra óptica usada en la simulación con una apertura numérica de 0.13

Parámetro	Núcleo	Revestimiento
Diámetro [ $\mu m$ ]	9,0	125
Densidad [ $kg / m^3$ ]	2201	2201
Módulo de Young [ $GPa$ ]	72,6	72,6
Coefficiente de Poisson	0,164	0,164
Primer coeficiente de Pockels: $P_{11}$	0,121	0,121
Segundo coeficiente de Pockels: $P_{12}$	0,270	0,270
Índice de refracción antes de aplicar la fuerza externa: $n_0$ a 632,8 nm	1,4570	1,4521

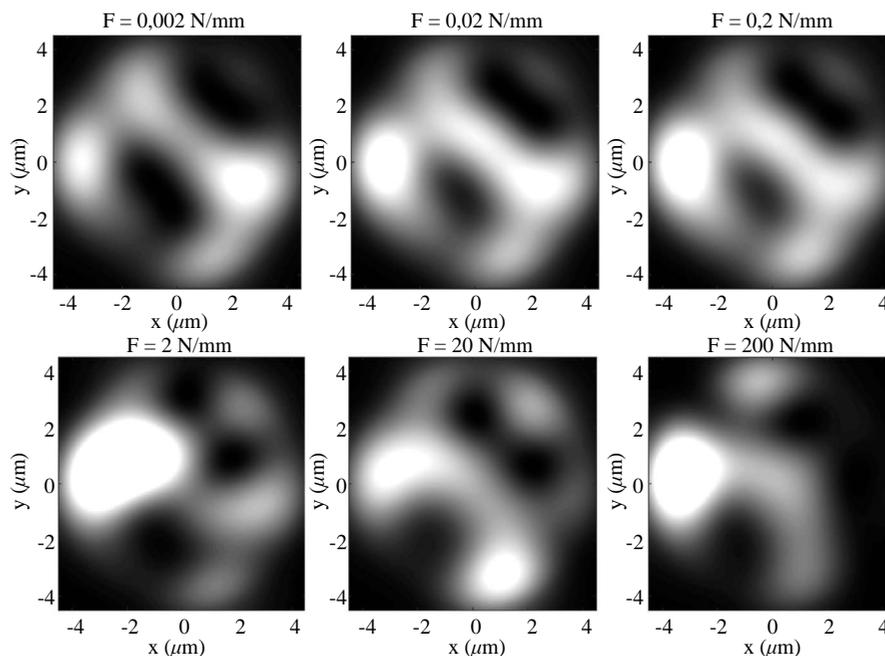


**Figura 1.** Diagrama del escenario físico que recrea la simulación.

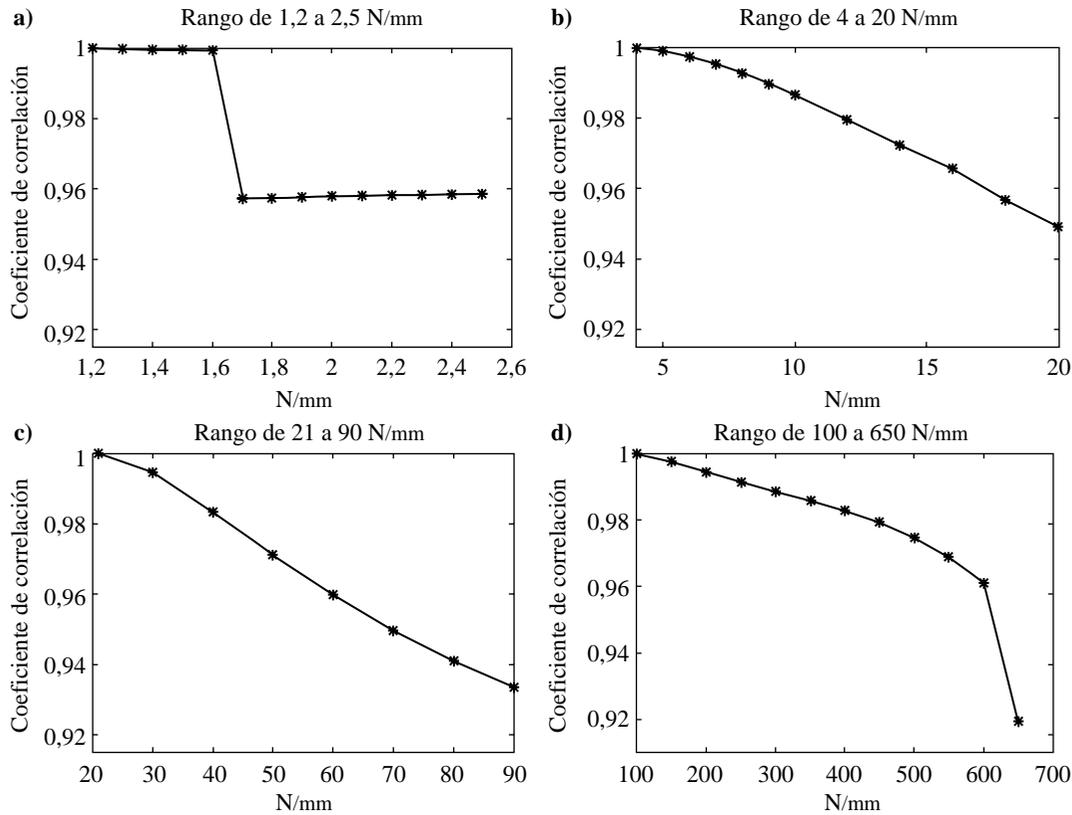
para los diferentes rangos de fuerza por unidad de longitud aplicada. El coeficiente de correlación se comporta linealmente para ciertos rangos, como lo muestra la Figura 3b y 3c, pero en otros no existe un comportamiento lineal, ni siquiera monótonico (Figura 3a y 3d). Adicionalmente, la sensibilidad también es dependiente del rango de fuerzas analizado, por ejemplo, la sensibilidad es más alta en la Figura 3c que en la Figura 3b o 3d, si en esta última se redujera el rango de trabajo a la zona lineal de la curva.

La medida de correlación es dependiente de que tan grandes son los cambios en la distribución de intensidades del patrón al cambiar la fuerza aplicada. Ante cambios grandes en la intensidad del patrón se pueden generar comportamientos no monótonicos como de discontinuidad de las curvas de correlación. Una propuesta para evitar estos inconvenientes es la redefinición del patrón de intensidades usado como referencia en los cálculos de correlación, lo que equivale a una recalibración del sistema, pero también es algo que permite aprovechar zonas específicas donde el comportamiento de la curva de correlación sea el adecuado. En la Figura 3b se muestra la curva de correlación en la que el patrón de referencia usado es el proveniente de la fuerza por unidad de longitud de  $4 N/mm$  y con respecto a este patrón es que se calculan las correlaciones de los demás puntos en esa figura.

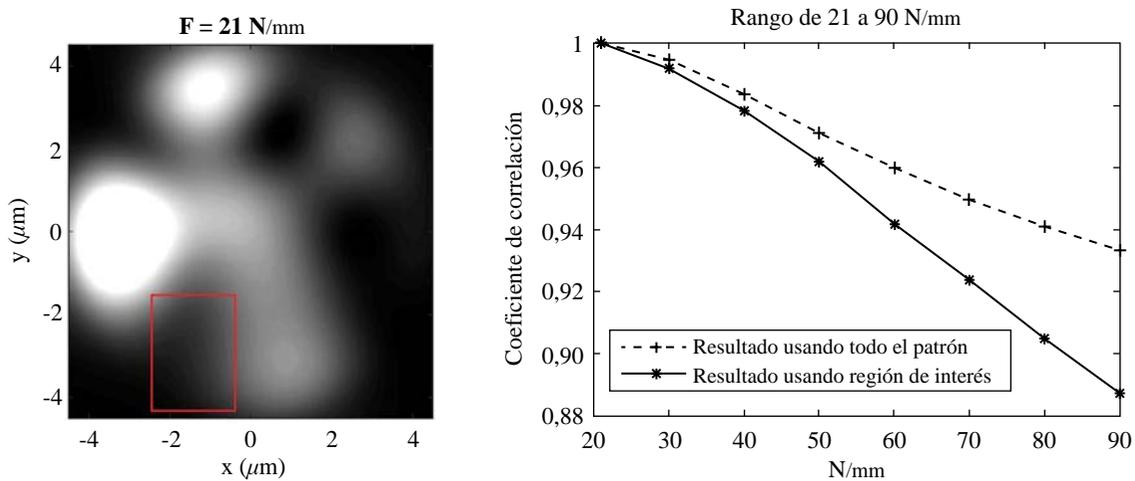
Si se hace una división en regiones del patrón de intensidades, como por ejemplo la región del rectángulo rojo en la figura 4a, y se analiza la correlación para esta región en diferentes patrones de intensidad (diferentes fuerzas aplicadas), se puede mejorar el comportamiento de las curvas de respuesta en correlación. De esta manera, se puede



**Figura 2.** Imágenes de patrones de speckle en una fibra multimodo simulados numéricamente a 650 nm para varios valores de fuerza por unidad de longitud aplicada.



**Figura 3.** Curvas de correlación entre patrones de speckle a la salida de la fibra para diferentes rangos de fuerza por unidad de longitud aplicada.



**Figura 4.** División del patrón de intensidades para la medida de correlación. a) Patrón de intensidades completo y zona de división o interés, rectángulo rojo. b) comparación de curva de correlación usando todo el patrón o una zona de interés menor.

mejorar en la capacidad de sensado del sistema según sea el requerimiento. La figura 4b muestra la curva de correlación para el rango de fuerzas entre 21 *N/mm* y 90 *N/mm* (antes mostrado en la figura 3c), usando la zona del rectángulo rojo mencionado, el cual tiene una mayor sensibilidad manteniendo una alta linealidad. Este caso muestra las posibilidades de mejorar las características metrológicas del sensor

al usar diferentes zonas del patrón de salida. Finalmente, se puede observar que la sensibilidad y el rango dinámico dependerán de cómo cambia el patrón de intensidades para cada zona elegida. Así, se pueden encontrar zonas que mejoren ostensiblemente el desempeño del sensor como otras que producen comportamientos no monotónicos o discontinuidades en un rango de fuerza requerido.

## Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo la simulación numérica de la acción de una fuerza de perturbación sobre una fibra óptica y la respuesta en el patrón de intensidades a la salida de ésta. Los resultados son cercanos a los observados experimentalmente y mostrados en la literatura. Sobre estos patrones se realizó análisis de correlación como método de cuantificación/interrogación del sistema al ser usado como sensor de perturbaciones físicas. Se mostró que esta metodología es útil y que la división del patrón de intensidades puede mejorar las características metrológicas del sistema como sensor.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, a la Universidad Cooperativa de Colombia y a la Universidade Federal Fluminense. V.H. Aristizabal y F.J. Velez agradecen el apoyo financiero de la Universidad Cooperativa de Colombia mediante el proyecto con código INV1898.

## Contribución de los autores

Los autores mencionados anteriormente han contribuido de manera original y eficiente para el desarrollo completo del artículo.

El trabajo fue presentado en la modalidad de póster en el XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones (ENO-CANCOA), evento llevado a cabo en la Universidad Industrial de Santander sede Bucarica, en Bucaramanga, Colombia del 20 al 24 de noviembre de 2017.

## Conflicto de intereses

Los autores y coautores de este trabajo no tienen ningún conflicto de intereses de índole académico, personal, religioso, ético y profesional.

## Referencias

- Aristizabal, V. H., Hoyos, A., Rueda, E., Gomez, N. D., & Gomez, J. A. (2015). Effect of wavelength on metrological characteristics of non-holographic fiber specklegram sensor. *Photonic Sensors*, **5** (1). <http://doi.org/10.1007/s13320-014-0210-3>
- Aristizabal, V. H., Vélez, F. J., Rueda, E., Gómez, N. D., & Gómez, J. A. (2016). Numerical modeling of fiber specklegram sensors by using finite element method (FEM). *Optics Express*, **24** (24): 27225-27238. <http://doi.org/10.1364/OE.24.027225>
- Aristizabal, V. H., Velez, F. J., & Torres, P. (2006). Numerical model and analysis of optical fibers with internal electrodes. *Revista Colombiana de Física*. **38** (1): 173-176. Retrieved from [http://revcolfis.org/publicaciones/vol38\\_1/resumenes/3801173.htm](http://revcolfis.org/publicaciones/vol38_1/resumenes/3801173.htm)
- Aristizabal, V. H., Vélez, F. J., & Torres, P. (2004). Modeling of photonic crystal fibers with the Scalar Finite Element Method. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (Vol. 5622). <http://doi.org/10.1117/12.591051>
- Aristizabal, V. H., Vélez, F. J., & Torres, P. (2006). Analysis of photonic crystal fibers: Scalar solution and polarization correction. *Optics Express*. **14** (24). <http://doi.org/10.1364/OE.14.011848>
- Cramond, G., Boyd, S. W., & Dulieu-Barton, J. M. (2013). Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. **51** (12): 1368-1378. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.03.014>
- Darío Gómez, N., & Gómez, J. A. (2013). Effects of the speckle size on non-holographic fiber specklegram sensors. *Optics and Lasers in Engineering*. **51** (11): 1291-1295. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.05.007>
- Efendioglu, H. S. (2017). A Review of Fiber-Optic Modal Modulated Sensors: Specklegram and Modal Power Distribution Sensing. *IEEE Sensors Journal*. **17** (7): 2055-2064. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2658683>
- Fujiwara, E., Marques dos Santos, M. F., & Suzuki, C. K. (2017). Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division. *Applied Optics*. **56** (6): 1585. <http://doi.org/10.1364/AO.56.001585>
- Fujiwara, E., Wu, Y. T., dos Santos, M. F. M., Schenkel, E. A., & Suzuki, C. K. (2017). Development of a tactile sensor based on optical fiber specklegram analysis and sensor data fusion technique. *Sensors and Actuators A: Physical*. **263**: 677-686. <http://doi.org/10.1016/j.sna.2017.07.031>
- Fujiwara, E., Wu, Y. T., & Suzuki, C. K. (2012). Vibration-based specklegram fiber sensor for measurement of properties of liquids. *Optics and Lasers in Engineering*. **50** (12): 1726-1730. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.06.018>
- Gasvik, K. J. (2002). *Optical Metrology* (3rd ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Gianino, P. D., & Bendow, B. (1981). Calculations of stress-induced changes in the transverse refractive-index profile of optical fibers. *Applied Optics*. **20** (3): 430. <http://doi.org/10.1364/AO.20.000430>
- Gómez, J. A., Lorduy G., H., & Salazar, Á. (2011). Improvement of the dynamic range of a fiber specklegram sensor based on volume speckle recording in photorefractive materials. *Optics and Lasers in Engineering*. **49** (3): 473-480. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.11.017>
- Gómez, J. A., Lorduy G., H., & Salazar, Á. (2011). Influence of the volume speckle on fiber specklegram sensors based on four-wave mixing in photorefractive materials. *Optics Communications*. **284** (4): 1008-1014. <http://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.10.037>
- Gómez, J. A., & Salazar, Á. (2012). Self-correlation fiber specklegram sensor using volume characteristics of speckle patterns. *Optics and Lasers in Engineering*. **50** (5): 812-815. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.01.002>
- Gubarev, F., Li, L., Klenovskii, M., & Glotov, A. (2016). Speckle pattern processing by digital image correlation. *MATEC Web of Conferences*. **48**: 4003. <http://doi.org/10.1051/mateconf/20164804003>
- Hung, Y. Y. (1978). Displacement and strain measurement. In R. K. Erf (Ed.), *Speckle metrology* (pp. 51-71). New York: Academic Press, Inc.
- Kumar, A., Varshney, R. K., Antony C, S., & Sharma, P. (2003). Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures. *Optics Communications*. **219** (1-6): 215-219. [http://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01289-6](http://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01289-6)

- Li, J., Cai, H., Geng, J., Qu, R., & Fang, Z.** (2007). Specklegram in a multiple-mode fiber and its dependence on longitudinal modes of the laser source. *Applied Optics*. **46** (17): 3572. <http://doi.org/10.1364/AO.46.003572>
- Liu, Y., & Wei, L.** (2007). Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers. *Applied Optics*. **46** (13): 2516-2519. <http://doi.org/10.1364/AO.46.002516>
- Malki, A., Gafsi, R., Michel, L., Labarrère, M., & Lecoy, P.** (1996). Impact and vibration detection in composite materials by using intermodal interference in multimode optical fibers. *Applied Optics*. **35** (25): 5198. <http://doi.org/10.1364/AO.35.005198>
- Mase, G. T., & Mase, G. E.** (1999). *Continuum for Engineers*. New York (2 Ed). Boca Raton: CRC Press.
- R. Jones and C. Wykes.** (1989). *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511622465>
- Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M., & Lopez-Higuera, J.-M.** (2015). Fiber Specklegram-Multiplexed Sensor. *Journal of Lightwave Technology*. **33** (12): 2591-2597. <http://doi.org/10.1109/JLT.2014.2364318>
- Saleh, B. E. a, & Teich, M. C.** (1991). *Fundamentals of Photonics* (Vol. 5). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc. <http://doi.org/10.1002/0471213748>
- Torres, P., Aristizábal, V. H., & Andrés, M. V.** (2011). Modeling of photonic crystal fibers from the scalar wave equation with a purely transverse linearly polarized vector potential. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. **28** (4). <http://doi.org/10.1364/JOSAB.28.000787>
- Wang, B., Guo, R., Yin, S., & Yu, F. T. S.** (2004). Chemical Sensing with Hetero-Core Fiber Specklegram. *Journal of Holography and Speckle*. **1** (1): 53-57. <http://doi.org/10.1166/jhs.2004.008>
- Wang, B., Huang, C., Guo, R., & Yu, F. T. S.** (2003). A novel fiber chemical sensor using inner-product multimode fiber speckle fields. In F. T. S. Yu, R. Guo, & S. Yin (Eds.), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (p. 299). <http://doi.org/10.1117/12.515977>
- Wang, Y., Cai, H., Qu, R., Fang, Z., Marin, E., & Meunier, J.-P.** (2008). Specklegram in a grapefruit fiber and its response to external mechanical disturbance in a single-multiple-single mode fiber structure. *Applied Optics*. **47** (20): 3543. <http://doi.org/10.1364/AO.47.003543>
- Wu, S., Yin, S., & Yu, F. T. S.** (1991). Sensing with fiber specklegrams. *Applied Optics*. **30** (31): 4468. <http://doi.org/10.1364/AO.30.004468>
- Yu, F. T. S., Wen, M., Yin, S., & Uang, C.-M.** (1993). Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields. *Applied Optics*. **32** (25): 4685. <http://doi.org/10.1364/AO.32.004685>
- Yu, F. T. S., & Yin, S.** (2002). *Fiber Optic Sensors*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Yu, F. T. S., Yin, S., Zhang, J., & Guo, R.** (1994). Application of a fiber-speckle hologram to fiber sensing. *Applied Optics*. **33** (22): 5202. <http://doi.org/10.1364/AO.33.005202>
- Yu, F. T. S., Zhang, J., Yin, S., & Ruffin, P. B.** (1995). Analysis of a fiber specklegram sensor by using coupled-mode theory. *Applied Optics*. **34** (16): 3018. <http://doi.org/10.1364/AO.34.003018>
- Zhang, Z., & Ansari, F.** (2006). Fiber-optic laser speckle-intensity crack sensor for embedment in concrete. *Sensors and Actuators A: Physical*. **126** (1): 107-111. <http://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.002>

# Características del efecto Lau empleando redes de fase y de volumen fotorrefractivas

Gustavo Forte<sup>1,2,\*</sup>, Myrian Tebaldi<sup>1,3</sup>, Nestor Bolognini<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Ópticas, CIOp (CONICET La Plata –CIC-UNLP) La Plata, Argentina

<sup>2</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

<sup>3</sup>UIDET OPTIMO, Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

## Resumen

En este trabajo se estudia el efecto Lau empleando redes de fase de volumen generadas en un cristal fotorrefractivo tipo BSO. En nuestra propuesta la red de fase objeto se genera mediante la proyección de la imagen de una red iluminada incoherentemente en el volumen del cristal. Para esta red de fase fotorrefractiva se define un parámetro de modulación que depende del espesor del cristal. Se presentan resultados teóricos para diferentes distancias entre redes objeto-fuente que confirman nuestra propuesta. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Efecto Lau; Red de volumen; Cristales fotorrefractivos.

**Features of the Lau effect by using a photorefractive volume phase grating**

## Abstract

This work analyzes the Lau effect produced by the volume phase grating generated in a photorefractive BSO crystal. In our proposal, the object phase grating is generated by projecting the image of an incoherently illuminated grating in the crystal volume. A modulation parameter that includes the effect of the crystal depth is introduced for this photorefractive phase grating. Theoretical results for different distances between object-source gratings that confirm our approach are presented. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Lau effect; Volume grating; Photorefractive crystals.

## Introducción

Es conocido que las autoimágenes de una estructura periódica desaparecen cuando se aumentan las dimensiones laterales de la fuente de iluminación (Patorski, 1989). Sin embargo, se pueden obtener patrones de franjas semejantes a las autoimágenes iluminando una red objeto con una fuente extensa convenientemente codificada. De este modo, empleando dos redes de amplitud separadas una distancia  $z_0 = \frac{n \cdot d^2}{\lambda}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) donde  $d$  es el periodo de la red y  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente luminosa, se obtiene en el infinito franjas de alto contraste conocidas como franjas de Lau (Lau, 1948). La primera red de amplitud o red fuente de este dispositivo actúa codificando linealmente la fuente incoherente, mientras que la segunda red o red objeto, de amplitud o de fase, actúa como una transparencia objeto. Se han desarrollado diferentes modelos para explicar la formación de las franjas de Lau. Estos modelos se han basado en: la teoría de la difracción (Jahns y Lohmann, 1979), la teoría de la coherencia (Gori, 1979), la función de transferencia óptica del sistema (OTF) (Brenner, 1983), las funciones de Walsh (Colautti, 1988), las propiedades de un interferómetro de doble red (Swanson, 1982, Swanson, 1985), y la utilización de una representación dual espacio-fase y de autoimágenes (Patorski, 1983).

El dispositivo de Lau convencional, que emplea dos redes de amplitud, posee una baja eficiencia luminosa debido a la absorción de luz que se produce en las redes de amplitud. Consecuentemente, las franjas de Lau presentan una baja visibilidad. El efecto Lau fue utilizado para implementar interferómetros ópticos con el propósito de obtener información de fase de un objeto bajo estudio (Tebaldi, 1999, Angel, 1999). Cabe destacar que, si bien este interferómetro presenta una mejor relación señal ruido que aquellos basados en el efecto Talbot, la baja visibilidad de las franjas limita el desarrollo de dispositivos basados en el efecto Lau. Por lo tanto, resulta relevante encontrar estrategias para obtener franjas de alto contraste. El empleo de una red objeto de fase produce una mejora en la luminosidad del dispositivo y la visibilidad de las franjas que depende de la modulación de fase de la red (Jinhong, 1987, Jinhong, 1988).

Los trabajos previos consideraban redes planas, en cambio en nuestra propuesta se estudia el efecto Lau empleando redes de fase de volumen generadas en un cristal

### \*Correspondencia:

Gustavo Forte, [gforte@ciop.unlp.edu.ar](mailto:gforte@ciop.unlp.edu.ar)

Recibido: 9 de febrero de 2018

Aceptado: 25 de abril de 2018

Editor: Román Castañeda Sepúlveda

fotorrefractivo tipo BSO. Es evidente que, para poder aprovechar las características de volumen del medio de registro, es necesario que la distribución a ser almacenada sea tridimensional. En nuestra propuesta, la red objeto de fase se genera mediante la proyección de la imagen de una red de Ronchi iluminada incoherentemente en el volumen del cristal. Se emplea un cálculo basado en la OTF de un sistema formador de imagen incoherente para describir teóricamente la distribución de intensidad 3D. En Ref. (Forte, 2012) se determinaron las condiciones para generar una red en el volumen completo del cristal. Esta distribución se mapea en una perturbación del índice de refracción a través del efecto fotorrefractivo. Tres parámetros gobiernan la modulación de la red de índice: el campo eléctrico externo que determina la amplitud de la modulación, el diámetro de la pupila de salida del sistema de registro que controla la profundidad de la red a ser almacenada en el cristal y el espesor del cristal (Forte, 2012).

Para analizar teóricamente las franjas se utiliza un modelo basado en una formulación de la integral de camino para calcular la intensidad de los patrones generados por la red de fase de volumen (Forte, 2011). En nuestro cálculo se considera que la distribución de intensidad en el experimento de Lau puede ser interpretada como la correlación entre la distribución de intensidad de la red fuente, con el módulo cuadrado del patrón de Fresnel de la red objeto (Jahns y Lohmann, 1979, Forte, 2017). En nuestra propuesta se emplea un parámetro de fase, que incluye los efectos del volumen, respecto del cual la visibilidad mantiene la típica dependencia sinusoidal observada con redes planas. Este parámetro, propio de las redes de volumen tales como las generadas en cristales fotorrefractivos, incluye la dependencia con el espesor del cristal. En nuestro análisis elegimos adecuadamente el diámetro de la pupila del sistema óptico de registro con el propósito de garantizar la generación de una red en el volumen completo de los cristales. Se estudian patrones asociados a diferentes distancias entre redes fuente-objeto. En cada caso, se determinan las condiciones para optimizar la visibilidad de las franjas a través de la elección adecuada del espesor del cristal.

### Planteamiento del problema y motivación

Como ya se mencionó en la introducción, se pueden obtener patrones de franjas de Lau iluminando una red objeto con una fuente extensa convenientemente codificada. En el dispositivo de Lau se obtienen franjas rectilíneas en el infinito o en el plano focal de una lente convergente (ver esquema experimental de la figura 1). Jahns y Lohmann (1979) aplicaron la teoría escalar de la difracción para demostrar que la distribución de intensidad en el experimento puede ser interpretada como la correlación entre la distribución de intensidad de la primera red o red fuente,  $t(x)$ , con el módulo cuadrado del patrón de Fresnel de la segunda red o red objeto,  $\psi(x)$ :

$$I(x) = |t(x)|^2 \otimes |\psi(x)|^2 \quad (1)$$

donde  $\otimes$  denota la operación de correlación. Las franjas obtenidas en este experimento empleando dos redes planas de amplitud presentan un contraste óptimo y un perfil triangular cuando las distancias entre las redes es  $z_0 = \frac{n \cdot d^2}{\lambda}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) donde  $d$  es el período de la red y  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente de iluminación. El período  $w$  del patrón de franjas de Lau obtenidas depende de  $z_0$  y está dado por  $w = \frac{d \cdot f}{z_0}$ , donde  $f$  es la distancia focal de la lente.

El dispositivo de Lau que emplea redes de amplitud posee una baja eficiencia luminosa, debido a la absorción de luz que se produce en estas redes. El empleo de una red objeto de fase produce una mejora en la eficiencia luminosa. Considerando redes de perfil cuadradas para este caso, Tu Jinhong (1987) obtuvo que la distribución en el plano de observación está dada por:

$$I(x) = 2 \left\{ \frac{1}{4} + \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} |C_n|^2 \text{sen}(m) \cdot \text{sen}(\pi \lambda z_0 n^2 / d^2) \cdot \exp(i 2 n \pi x / w) \right\} \quad (2)$$

donde  $C_n$  es el coeficiente de Fourier,  $m$  es la modulación de la red de fase,  $z_0$  es la distancia entre las redes fuente-objeto y  $w$  es el período de las franjas de Lau. Asimismo, en Jinhong, 1987 se determinó que la visibilidad de las franjas varía periódicamente en función de la distancia entre las redes fuente-objeto y de la modulación de fase de acuerdo con:

$$V = 4 \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} |C_n|^2 \text{sen}(m) \cdot \text{sen}(\pi \lambda z_0 n^2 / d^2) \quad (3)$$

Cuando se emplea una red objeto de fase, el contraste óptimo se observa en los planos a las distancias  $z_0 = \frac{(M \pm \frac{1}{2}) d^2}{\lambda}$  ( $M=1, 2, 3, \dots$ ). Por otra parte, el valor de visibilidad será máximo cuando la modulación toma el valor  $m = \pi/2$ . A su vez, en  $z_0 = \frac{M d^2}{\lambda}$ , la visibilidad será mínima mientras que para  $z_0 = \frac{(M \pm \frac{1}{4}) d^2}{\lambda}$  las franjas presentarán una visibilidad reducida con respecto a la que se presenta para  $z_0 = \frac{(M \pm \frac{1}{2}) d^2}{\lambda}$ .

A continuación, se analizará lo que ocurre cuando se emplea una red almacenada en un cristal fotorrefractivo como red objeto. Debemos notar que las variaciones de intensidad incidente en un cristal fotorrefractivo se traducen en cambios en el índice de refracción. Por lo tanto, la información de entrada queda codificada como información de fase. En el caso de un cristal fotorrefractivo BSO la modulación de fase alcanza valores típicos entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ .

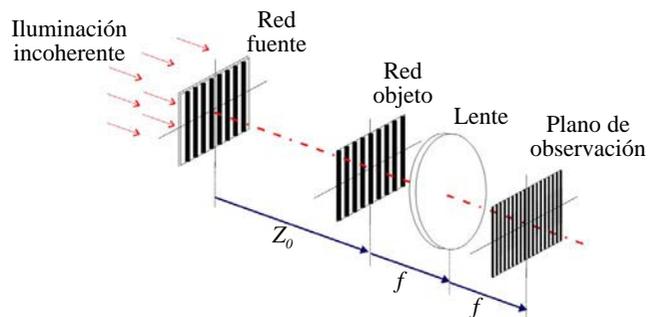


Figura 1. Dispositivo experimental de Lau

Como se mencionó anteriormente, cuando se emplea una red objeto de fase, la visibilidad de las franjas de Lau depende de la modulación. En la figura 2 se muestran los perfiles de intensidad de las franjas obtenidos teóricamente, considerando redes objeto planas de fase y con modulaciones de  $10^{-4}$  y de  $\pi/2$ . Para  $m = \pi/2$  se observan franjas de máxima visibilidad; en cambio, cuando se consideran modulaciones del orden de las obtenidas con cristales BSO, se observa que la visibilidad de las franjas decae considerablemente.

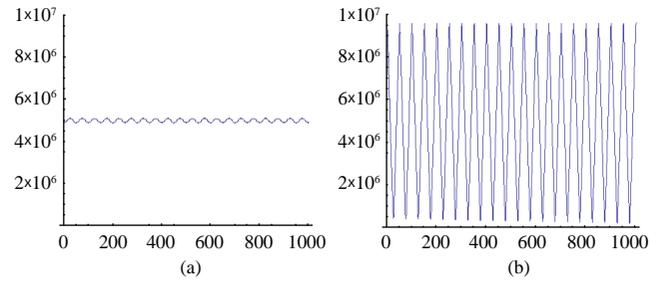
La figura 3 muestra las franjas de Lau obtenidas experimentalmente a partir de una red de fase almacenada en un cristal BSO. Es evidente la alta visibilidad de las franjas obtenidas en comparación con el resultado simulado de la figura 2 (a). Nótese sin embargo que la simulación fue realizada considerando una red plana. Este es el punto de partida para profundizar el efecto de volumen de la red objeto en el fenómeno de Lau.

### Descripción del esquema experimental

En Ref. (Forte, 2012) se analizó la influencia del volumen del medio fotorrefractivo en la visibilidad de las autoimágenes. Se propuso reemplazar el parámetro de modulación  $m$  por un nuevo parámetro de fase  $\beta_{mod}$ , que tenga en cuenta las variaciones de modulación en el volumen del medio de registro. En este trabajo, dichas ideas se extienden al dispositivo de Lau y, en las ecuaciones (2) y (3), se reemplaza la modulación  $m$  por  $\beta_{mod}$ . Finalmente, se estudian las franjas para distintas distancias  $z_0$  entre las redes fuente-objeto.

La figura 4 muestra el esquema experimental correspondiente a la etapa de registro de la red fotorrefractiva. La imagen de una red de Ronchi de baja frecuencia,  $G$ , iluminada incoherentemente es proyectada dentro del volumen de un cristal  $B_{12}SiO_{20}$  (conocido como BSO). Un filtro interferencial,  $F_G$ , centrado en la longitud de onda  $\lambda_G = 534$  nm ( $\Delta\lambda_G = \pm 7$  nm), es usado en la etapa de registro debido a la alta sensibilidad del cristal en la región azul-verde del espectro visible. La lente  $L_2$ , de distancia focal  $f = 50$  mm, forma una imagen de la red en el cristal con magnificación unitaria. Para nuestra propuesta, se utiliza un cristal BSO en configuración transversal. Las dimensiones de los cristales considerados son  $L_x = 10$  mm y  $L_y = 10$  mm, mientras que  $L_z$  es variable. Un campo eléctrico se aplica al cristal en una dirección paralela al vector de onda de la imagen de la red proyectada y un diafragma  $P$  se ubica detrás de la lente formadora de imagen  $L_2$ . En nuestras condiciones experimentales, el diámetro de la pupila de salida del sistema óptico, controlado por el diafragma  $P$ , se mantiene fijo en un valor que asegure el registro de red en el volumen completo del cristal. La distribución de intensidad luminosa 3D incidente en el medio de registro es mapeada, vía el efecto fotorrefractivo, como una perturbación de índice de refracción (Tebaldi, 1998, Huignard, 1989), generando de este modo una red de fase de volumen con el mismo vector de onda que la red plana de entrada.

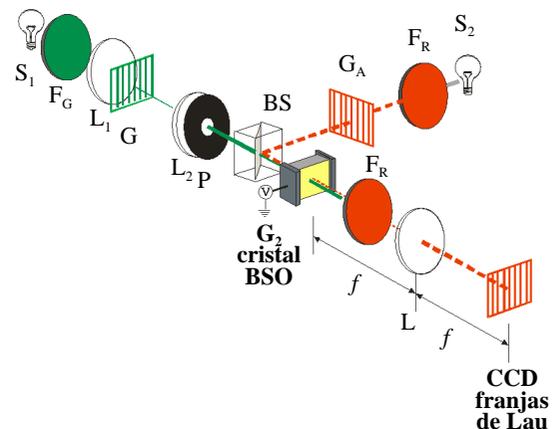
En la etapa de generación de las franjas de Lau, la red fuente de amplitud  $G_A$  es iluminada con una fuente



**Figura 2.** Perfil de intensidad de los patrones de Lau simulados, correspondientes a una red objeto plana de fase con una modulación (a)  $m = 10^{-4}$  y (b)  $m = \pi/2$



**Figura 3.** Franjas de Lau obtenidas empleando como red objeto una red almacenada en un cristal fotorrefractivo tipo BSO



**Figura 4.** Esquema experimental  $S_1$  y  $S_2$ : fuentes incoherentes,  $F_G$  y  $F_R$ : filtros interferenciales centrados en  $\lambda_G = 534$  nm ( $\Delta\lambda_G = \pm 7$  nm), y  $\lambda_R = 633$  nm ( $\Delta\lambda_R = \pm 5$  nm), respectivamente,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L$ : lentes, BS: divisor de haz; P: diafragma;  $G$  y  $G_A$ : redes de amplitud,  $G_2$ : red objeto almacenada en el cristal fotorrefractivo como modulación de fase, CCD (cámara CCD)

incoherente provista con un filtro interferencial  $F_R$  con su máximo de transmisión en  $\lambda_R = 633$  nm ( $\Delta\lambda_R = \pm 5$  nm). Esta longitud de onda de lectura está fuera del rango de sensibilidad espectral del cristal BSO, evitando así la degradación de

la información almacenada en la etapa de registro descrita anteriormente. La red  $G_A$  está separada una distancia  $z_0$  de la red  $G_2$ , que actúa como red objeto del dispositivo de Lau. Esta última se registra en el medio fotorrefractivo de volumen cuando se forma la imagen de la red de amplitud  $G$  en el cristal. La lente  $L$  realiza la transformada de Fourier de la distribución luminosa proveniente de  $G_A$  y transmitida a través de la red fotorrefractiva  $G_2$ , formándose así las franjas de Lau en el plano de Fourier de la lente  $L$ . A la salida del cristal se coloca un segundo filtro interferencial  $F_R$  con su máximo de transmisión en  $\lambda_R = 633\text{nm}$  ( $\Delta\lambda_R = \pm 5\text{ nm}$ ), para bloquear la luz proveniente de la etapa de registro y la imagen que esta pueda formar de la red.

### Resultados y discusión

Como se reportó en Forte 2012, la generación de la red de fase de volumen depende de la profundidad de foco de la imagen registrada, de la amplitud del campo de cargas espaciales y del espesor del medio de volumen de registro. La profundidad de foco de la imagen proyectada se controla cambiando el diámetro de la pupila de salida del sistema óptico de registro. De esta manera, se modifica la región en la cual la red de índice se extiende dentro del cristal. En el análisis que realizaremos a continuación, el diámetro de la pupila permanecerá fijo en un valor que asegure el registro de la red en el volumen completo del cristal.

Por otra parte, la amplitud de modulación de la red de índice depende de la amplitud del campo de carga espacial, el cual es controlado mediante el campo eléctrico externo aplicado al cristal tipo silenita. Este parámetro también se mantendrá sin variaciones en nuestro análisis.

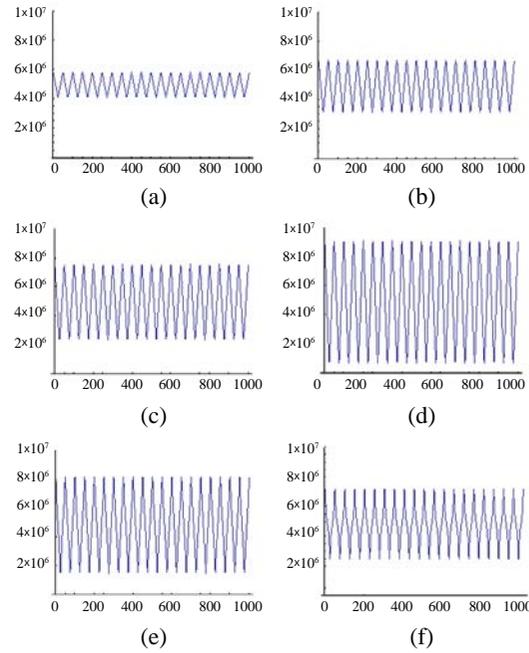
En las figuras 5 y 6, se presentan los perfiles de intensidad de los patrones de Lau correspondientes a dos distancias  $z_0$ , una asociada a la máxima visibilidad y otra a una visibilidad reducida. Estos perfiles fueron calculados usando las redes de volumen simuladas (Forte, 2012, Forte, 2011), en las condiciones del arreglo experimental de la figura 4. En estas condiciones, la modulación  $m$  correspondiente a una red plana es reemplazada por el parámetro de modulación,  $\beta_{\text{mod}}$  dado por:

$$\beta_{\text{mod}} = k_r \left( \int_0^{L_z} (\Delta n(z'; 0; E_0, D, L_z) - \Delta n(z'; d/2; E_0, D, L_z)) dz' \right) \quad (3)$$

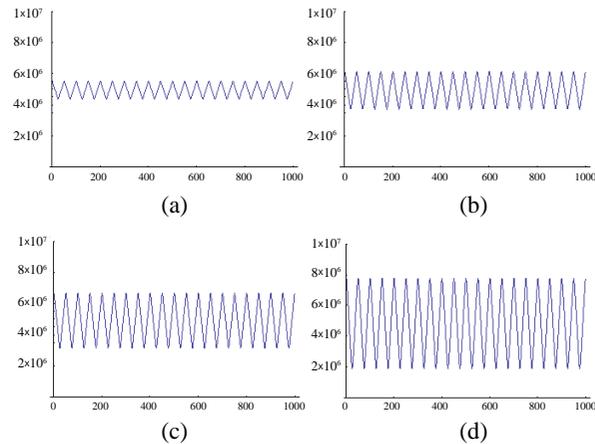
donde  $k_r$  es el número de onda,  $\Delta n$  es la variación del índice de refracción,  $E_0$  es el campo externo aplicado,  $D$  es el diámetro de la pupila  $P$ ,  $L_z$  es el espesor del cristal. A continuación, solo se analizará el efecto del parámetro  $L_z$ .

Los perfiles de las franjas de Lau de la figura 5 corresponden a una distancia entre las redes fuente-objeto de  $z_0 = (\frac{3}{2}) \frac{d^2}{\lambda_R}$ . Asimismo, la red objeto es generada en cristales BSO con diferentes valores del espesor  $L_z$ . A partir de los resultados es evidente que el contraste de las franjas varía en términos de los espesores considerados. En particular, se observa un aumento paulatino del contraste de las franjas entre los casos de 1 mm y 6 mm.

La ecuación (3) muestra que la visibilidad de las franjas de Lau varía sinusoidalmente en función del parámetro de



**Figura 5.** Perfiles de intensidad de las franjas de Lau correspondientes a una distancia entre redes de  $z_0 = (\frac{3}{2}) \frac{d^2}{\lambda_R}$  y generados a partir de una red fotorrefractiva de volumen con espesores (a)  $L_z = 1\text{mm}$  (b)  $L_z = 2\text{mm}$  (c)  $L_z = 3\text{mm}$  (d)  $L_z = 6\text{mm}$  (e)  $L_z = 12\text{mm}$  y (f)  $L_z = 14\text{mm}$



**Figura 6.** Perfiles de intensidad de las patrones correspondientes a una distancia entre redes de  $z_0 = (\frac{3}{4}) \frac{d^2}{\lambda_R}$  y generados a partir de una red fotorrefractiva de volumen con espesores (a)  $L_z = 1\text{mm}$  (b)  $L_z = 2\text{mm}$  (c)  $L_z = 3\text{mm}$  (d)  $L_z = 6\text{mm}$

modulación. En nuestra propuesta, el parámetro de modulación está dado por  $\beta_{\text{mod}}$ , que depende del espesor de la red fotorrefractiva. La visibilidad máxima para una red de fase se obtiene con una modulación  $\beta_{\text{mod}} = \pi/2$ . En el caso planteado ese máximo corresponde a un espesor de la red de volumen o espesor de cristal de aproximadamente 7,5 mm. En consecuencia, para espesores mayores la visibilidad decae, lo que se visualiza en los perfiles de la figura 5 (e) y 5 (f).

Como se mencionó anteriormente, en los planos  $z_0 = \frac{(M \pm \frac{1}{4})d^2}{\lambda_R}$  las franjas presentarán una visibilidad reducida con respecto a la que se presenta en  $z_0 = \frac{(M \pm \frac{1}{2})d^2}{\lambda_R}$ . Esto puede ser confirmado considerando los resultados de la figura 6 donde se observa una menor visibilidad de franjas en comparación con los mismos espesores de cristal que en la figura 5.

## Conclusiones

En este trabajo se estudió el efecto Lau mediante el uso de una red de fase de volumen generada en un cristal fotorrefractivo. La distribución de intensidad 3D almacenada en el cristal se genera al formar la imagen de una red de Ronchi incoherentemente iluminada en un cristal BSO. Se empleó una pupila adecuada con el propósito de garantizar la generación de una red en el volumen completo del cristal. Esta distribución es mapeada como una perturbación de índice de refracción a través del efecto fotorrefractivo, generando una red de fase de volumen. En el experimento de Lau convencional el control de la visibilidad de las franjas depende de la distancia entre las redes fuente-objeto,  $z_0$ . En nuestra propuesta, se incorpora el espesor del cristal como un parámetro adicional de control de la visibilidad para cualquier distancia  $z_0$ . Esto se verificó con el análisis de las franjas para  $z_0 = (\frac{3}{2})\frac{d^2}{\lambda_R}$  y  $z_0 = (\frac{3}{4})\frac{d^2}{\lambda_R}$ . Asimismo, la visibilidad de las franjas mantiene la dependencia sinusoidal de la red de fase plana, pero introduciendo un parámetro de fase apropiado que depende del espesor de la red fotorrefractiva de volumen.

## Agradecimientos

Este trabajo fue auspiciado por CONICET No. 0849/16 (Argentina); Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata No. 11/I215 y 11/I239 (Argentina).

## Contribución de los autores

Los autores mencionados anteriormente han contribuido de manera original y eficiente para el desarrollo completo del artículo.

El trabajo fue presentado en la modalidad de póster en el XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones (ENO-CANCOA), evento llevado a cabo en la Universidad Industrial de Santander sede Bucarica, en Bucaramanga, Colombia del 20 al 24 de noviembre de 2017.

## Conflicto de intereses

No existen conflictos de intereses que puedan influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

## Referencias

- Patorski, K.** (1989). The self-imaging phenomenon and its applications. *Prog. Opt.*, **27**: 3-108.
- Lau, E.** (1948). Beugungerscheinungen and Doppelrastern. *Ann. Phys. (Leipzig)*. **6**: 417-423.
- Jahns J., Lohmann, A. W.** (1979). The Lau effect a diffraction experiment with incoherent illumination. *Opt. Commun.* **28**: 263-267.
- Gori, F.** (1979). Lau effect and coherence theory. *Opt. Commun.*, **31**: 4-8.
- Brenner, K. H., Lohmann, A. W., Ojeda- Castañeda, J.** (1983). Lau effect: OTF theory. *Opt. Commun.*, **46**: 14-17.
- Colautti, C., Sicre, E.E., Garavaglia, M.** (1988). Analysis of the Lau effect using Walsh functions. *Opt. Lett.*, **13**: 1069-1071.
- Swanson, G. J., Leith, E. N.** (1982). Lau effect and grating imaging. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**: 552-555.
- Swanson, G. J., Leith E. N.** (1985). Analysis of the Lau effect and generalized grating imaging. *J. Opt. Soc. Am.*, **2**: 789-793.
- Patorski, K.** (1983). Incoherent superposition of multiple self-imaging. Lau effect and moiré fringe explanation. *Optica Acta*, **30**: 745-748.
- Tebaldi, M., Angel Toro, L., Bolognini, N.** (1999). Interferometry based on Lau effect with a grating registered in a photorefractive crystal. *Optics & Laser Technology*, **31**: 127-134.
- Angel, L., Tebaldi, M., Henao, R.** (1999). Phase stepping in Lau interferometry. *Opt. Commun.*, **164**: 247-255.
- Jinhong, T.** (1987). Theoretical analysis of the Lau effect with a sinusoidal phase grating. *J. Mod. Opt.* **34**: 307-313.
- Jinhong, T.** (1988). The diffraction near fields and Lau effect of a square-wave modulated phase grating. *J. Mod. Opt.*, **35**: 1399-1408.
- Forte, G., Lencina, A., Tebaldi, M., Bolognini, N.** (2012). Talbot effect by a photorefractive volume phase grating. *Appl. Opt.*, **51**: 479-485.
- Forte, G., Lencina, A., Tebaldi, M., Bolognini, N.** (2011). Self-imaging by a volume grating. *Opt. Commun.*, **284**: 2494-2499.
- Tebaldi, M., Angel, L., Bolognini, N.** (1998) Lau fringes formation using a grating registered in a BSO crystal. *Opt. Eng.*, **37**: 2971-2978.
- Huignard, P., Gunter, P.** (1989). Optical processing using wave mixing in photorefractive crystals. En P. Gunter, J. P. Huignard (Eds.), *Photorefractive Material and their Applications II* (205-273) Berlin and Heidelberg, Alemania: Springer- Verlag.
- Forte G, Tebaldi M, Bolognini N.** (2017) Study of Lau fringes generated by a photorefractive volume grating. *Opt. Commun.*, **396**: 110-115.

# Seguimiento de una reacción fotocatalítica modelo expuesta a la propagación de la superposición de dos vórtices ópticos con momento angular orbital entero definido y opuesto, por medio de espectroscopía UV-VIS

Carlos Fernando Díaz Meza<sup>1,\*</sup>, Diego Fernando Motta Nieto<sup>2</sup>, Yezid Torres Moreno<sup>1</sup>, Fernando Martínez Ortega<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Óptica y Tratamiento de Señales, GOTS, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Catálisis, CICAT, Universidad Industrial de Santander, UIS, Bucaramanga, Colombia

## Resumen

El presente artículo realiza un análisis espectral de un conjunto de ensayos efectuados sobre una reacción fotocatalítica modelo basada en la actividad de fenol disuelto en agua con óxido de titanio dopado como catalizador e irradiada con un haz de luz coherente, cuyo frente de onda corresponde a la superposición de dos vórtices ópticos con momento angular orbital entero definido de sentido opuesto.

Como primera instancia se describe la arquitectura opto-electro-química empleada en el estudio, luego se selecciona por medio de un barrido discreto de haces propagados de 405 y 450 nm, la longitud de onda adecuada para proyectar los vórtices ópticos sobre la muestra. Por último se realiza el tratamiento y análisis de las señales adquiridas a través de espectrofotometría UV de las muestras irradiadas con las distribuciones espaciales de luz de interés controladas por un holograma generado por computador. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Superposición; Momento Angular Orbital; Fotocatálisis; Absorbancia.

**Monitoring of a photocatalytic reaction pattern exposed to the propagation of the superposition of two optical vortices with defined and opposite orbital angular momentum, by UV-VIS spectroscopy**

## Abstract

This paper presents a spectral analysis of tests performed on a photocatalytic model reaction based on phenol activity diluted in water with doped titanium oxide using as catalyst and irradiated with a coherent beam of light, whose wave front is the superposition of the optical vortices with integer orbital angular momentum opposite.

Primarily, the architecture of the system optoelectronics and chemistry related is described, then is selected by discrete test of beams propagated the appropriate wavelength (405 and 450 nm) to project optical vortices over the sample. Finally, the processing and analysis of the signals acquired by a spectrophotometry UV, corresponding to the samples irradiated with the controlled spatial distributions of light by hologram generated computer. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key Words:** Superposition; Orbital Angular Momentum of Light; Photocatalysis; Absorbance.

## Introducción

En la actualidad es reconocida la trayectoria y el impacto que tienen los procesos relacionados con la fotoquímica y la fotocatalisis inducida por láser; trabajos que se registran en la década de los sesenta como los realizados por (Tiffany, *et al.*, 1967, 1968), donde se evidencia la bromación de compuestos fluorocarbonados y en años posteriores como (Whetten, *et al.*, 1982) y (Fu, *et al.*, 1984), donde se desencadenan reacciones de isomerización de olefinas con conglomerados organometálicos en fase gaseosa y líquida, demuestran ventajas en cuanto a la selectividad, activación de moléculas y cantidad de transformaciones de los agregados químicos según la energía absorbida en forma luz coherente y térmica.

Desde entonces se han expandido los procedimientos con vista al desarrollo de soluciones en diversos sectores tales como el petroquímico, energético y ambiental entre otros. Experimentos publicados por (Gonda, *et al.*, 2004, 2009), describen una gama de fotosensibilizadores, compuestos y la arquitectura de un fotorreactor, enfocados a la conversión de metano en metanol, la separación de hidrógeno a partir de una molécula de agua, la degradación de fenol y la purificación de microorganismos E-coli presentes en aguas residuales.

### \*Correspondencia:

Carlos Fernando Díaz Meza, [marck177@hotmail.com](mailto:marck177@hotmail.com)

Recibido: 7 de febrero de 2018

Aceptado: 25 de junio de 2018

Editor: Román Castañeda Sepúlveda

Por su parte el momento angular orbital como propiedad física presente en las dinámicas rotacionales de los frentes de onda electromagnéticos en el rango del visible, ha sido aprovechada en pinzas ópticas para rotar y trasladar nano partículas, átomos o moléculas (Andrews, 2008) y (Xavier, et al., 2012), lo cual evidencia que las singularidades insertadas en la estructura de un haz de luz producen efectos opto mecánicos, que por el momento se efectúan a nivel de demostraciones científicas o académicas.

Basado en lo anterior y teniendo en cuenta el impacto que ha tenido la variable física, es posible sugerir entonces que dicha configuración espacial de luz, también tiene el potencial de transferir su cantidad de movimiento sobre soluciones ampliamente estudiadas y trabajadas en el campo de la fotocatalisis, por ende el presente documento expone una arquitectura optoelectrónica, el conjunto de procedimientos y el análisis de los resultados concernientes al efecto de la proyección incidente de la distribución espacial de luz de interés en la fotoactividad de fenol.

**Sistema optoelectrónico y químico.** Las arquitecturas destinadas a la fotorreacción expuestas por (Okada, et al., 2013) y (Gondal, et al., 2003), son las disposiciones más sencillas en cuanto a la cantidad de elementos implementados y caminos ópticos. Una variante para el diseño del presente estudio consiste en incluir una matriz de cristal líquido controlada por computador inmediatamente después de la fuente de radiación coherente, con el fin de desplegar los hologramas generados e insertar la dislocación de fase en el frente de onda incidente, el cual posteriormente es difractado en diversos órdenes.

En síntesis el sistema optoelectrónico - fotocatalítico computacional empleado en el presente estudio, consiste en una fuente de luz coherente no polarizada, tipo diodo láser de 405 o 450 nm, con densidades de potencia de 80 y 200 mw/cm<sup>2</sup> respectivamente, ambas fabricadas por Huanic Corporation, un modulador espacial de luz (MEL) LC2002, seguido de una celda translúcida para la reserva y exposición de los sustratos químicos a las distintas distribuciones espaciales de luz y un agitador magnético encargado de garantizar la homogeneidad de las soluciones tal como se muestra en la figura suplementaria 1S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2780> y en la la figura suplementaria 2S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2781>. Por ultimo el producto final del experimento es llevado a un espectrofotometro UV Hewlett Packard 8453 para el análisis de la respuesta de absorbancia comprendida entre los 180 y 300 nm.

Las dimensiones del reactor se consideran de 8 cm de diámetro interno y de 10 cm de altura para el espacio útil de reacción. Por otra parte, los puertos del reactor se seleccionan con rosca 14 (puertos para una posible entrada y salida de gas) y rosca 18 (puerto para toma de muestra) para acople de tapones y elementos externos.

## Reacción modelo

La reacción modelo corresponde a la fotoactividad del fenol contenido en agua, la cual ha demostrado ser sensible ante fuentes de luz en el visible y en un reactor análogo al empleado por (Gondal, et al., 2005).

Sin embargo para seleccionar cuál de las longitudes de onda comprendidas entre 405 y 450 nm bajo la proyección de su modo fundamental, proporciona la mayor actividad incorporando por separado los fotocatalizadores TiO<sub>2</sub> dopado con nitrógeno, puro, WO<sub>3</sub> estándar y nano estructurado en la solución química; se efectúan una serie de ensayos con la misma sustancia del fotocatalizador, solvente y reactivo medida en unidades de masa o de volumen, bajo la cual no se presenta apantallamiento y cuyas cantidades se relacionan en la tabla 1.

Para el caso de los sólidos puros no se evidencia actividad fotocatalítica ante las dos fuentes lumínicas, según queda expresado en los espectros UV de seguimiento de reacción, donde el pico de control de 238 nm se mantiene inalterable antes y después de someter la matriz solución/ catalizador al efecto de la radiación, tal como se evidencia en las figuras suplementarias 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2782> y 4S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2783>

Si bien para la soluciones mezcladas con TIO<sub>2</sub> puro, WO<sub>3</sub> estándar y nano estructurado no se aprecia dinámica alguna en el periodo de tiempo establecido bajo ninguna de las longitudes de onda irradiadas, si se presenta variación en la absorbancia del conglomerado cuando a este le es incorporado NTIO<sub>2</sub>, causando el cambio de la pendiente presentada en el rango de 210 y 230 nm, al igual que se observa el desplazamiento en la amplitud del valle comprendido en las longitudes de onda entre 234 y 250 nm del eje de las abscisas, tal como se puede apreciar en los espectros de las figuras suplementarias 5S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2784> y 6S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2785>.

## Proyección de la superposición de vórtices ópticos con momento angular orbital entero de sentido opuesto

La modulación del holograma modificado de Lohman expuesta en la ecuación (3) y producto de la multiplicación

**Tabla 1.** Relación de cantidades de los precursores de la reacción.

Elemento	Cantidad
Catalizador	30 miligramos
Agua (Solvente)	142 mililitros
Fenol (Reactivo)	42 miligramos
Concentración molar de la solución	0,003 M
Concentración en ppm de solución	293 pmm

de una expresión matemática cosenoidal con la función de transmitancia expresada en (1), genera la superposición de vórtices ópticos portadores de momento angular orbital entero o fraccional de sentido opuesto (Díaz, *et al.*, 2016).

$$T(x, y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1^n}{n^2 - 0,5^2} \left[ \text{sen} \left( \frac{2n\pi x}{d} + m\varphi(x, y) \right) \right. \tag{1}$$

$$\left. + j2 \cos \left( \frac{2n\pi x}{d} + m\varphi(x, y) \right) \right]$$

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1}[y/x] \tag{2}$$

$$T_2(x, y) = T_1(x, y) \cdot \cos(2\pi x/d) \tag{3}$$

donde en (1),  $n$  se describe como la cantidad de órdenes de difracción,  $d$  el paso interfranja del holograma y  $m$  el índice acimutal que le inserta la carga topológica al vórtice. En la figura suplementaria 7S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2786>, es posible apreciar tanto teórica como experimentalmente, el frente onda resultante de la difracción del modo fundamental que incide sobre la función de transmitancia expresada en (3), donde se representa la distribución espacial de luz relacionada a la superposición de los vórtices con momento angular orbital de sentido opuesto.

Ahora, el procedimiento consiste en irradiar sobre la solución química, los frentes de onda difractados por el holograma en cuestión, que portan las cargas topológicas superpuestas de  $\pm 0, \pm 5, \pm 10, \pm 15$  y  $\pm 20$ .

Las figuras 1 y 2, y las figuras suplementarias 8S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2787> y 9S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2788>, presentan los cambios de la absorbancia localizados en los 238 nm de la respuesta de espectrofotometría UV de la reacción, debido a la propagación de los modos superpuestos en longitudes de onda de 450 y 405 nm, durante media hora en intervalos de diez minutos respectivamente:

Con el fin de cuantificar la actividad de la reacción con respecto a los momentos proyectados se realiza una diferencia de absorbancias ( $Dif\ Abs(238nm)$ ) en el mínimo del valle ubicado en los 238 nm, entre cada uno de los minutos 10, 20 y 30, con la línea del blanco correspondiente al minuto cero. El valle a los 238 nm es característico del espectro UV-VIS del fenol, el cual se disminuye a medida que avanza la reacción, discriminando el ruido en longitudes de onda muy lejanas a esta. De esta forma es posible determinar la distancia presente en las curvas en cada uno de los tiempos.

La expresión matemática que describe este procesamiento se establece como:

$$Dif\ Abs(238nm)_{min\ k}^{Cts} = Abs(238nm)_{min\ k}^{Cts} - Abs(238nm)_{min\ 0}^{Cts} \tag{4}$$

donde  $Abs(238nm)$ , es el valor de la curva de absorbancia en la longitud de onda de 238 nm,  $Cts$  son las cargas topológicas superpuestas de  $\pm 0, \pm 5, \pm 10, \pm 15$  y  $\pm 20$ , por su parte  $min\ k$  es equivalente a cada uno de los tiempos donde se efectuaron las medidas; es decir 10, 20 y 30 minutos. Los

esquemas presentes en la figura 3 representan la tendencia del diferencial de absorbancias calculada mediante la ecuación (4).

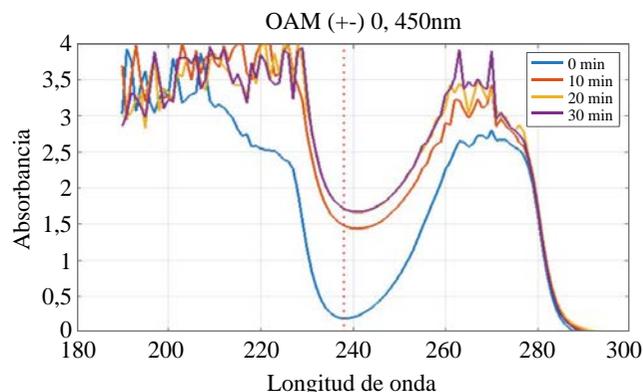
Ahora desde el punto de vista de la superposición de los momentos angulares orbitales, la dinámica del inverso de la transmitancia es expuesta en las figuras 4 y 5.

Para establecer una posible ganancia en la velocidad de la reacción, se relacionan las diferencias de las absorbancias en los distintos tiempos, de cada uno de los momentos superpuestos con respecto al frente de onda con carga topológica cero, así como describe en la siguiente expresión matemática (5).

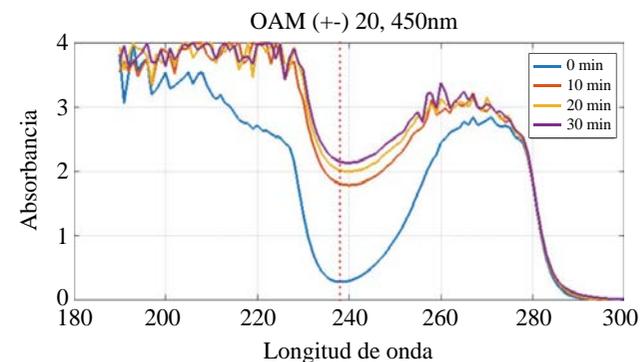
$$Ganancia_{min\ k}^{Cts} = \frac{Dif\ Abs(238nm)_{min\ k}^{Cts}}{Dif\ Abs(238nm)_{min\ 0}^{Cts}} \tag{5}$$

donde  $Cts$  corresponden a las cargas topológicas superpuestas y  $min\ k$  los minutos en los cuales se realizó el seguimiento a la reacción química.

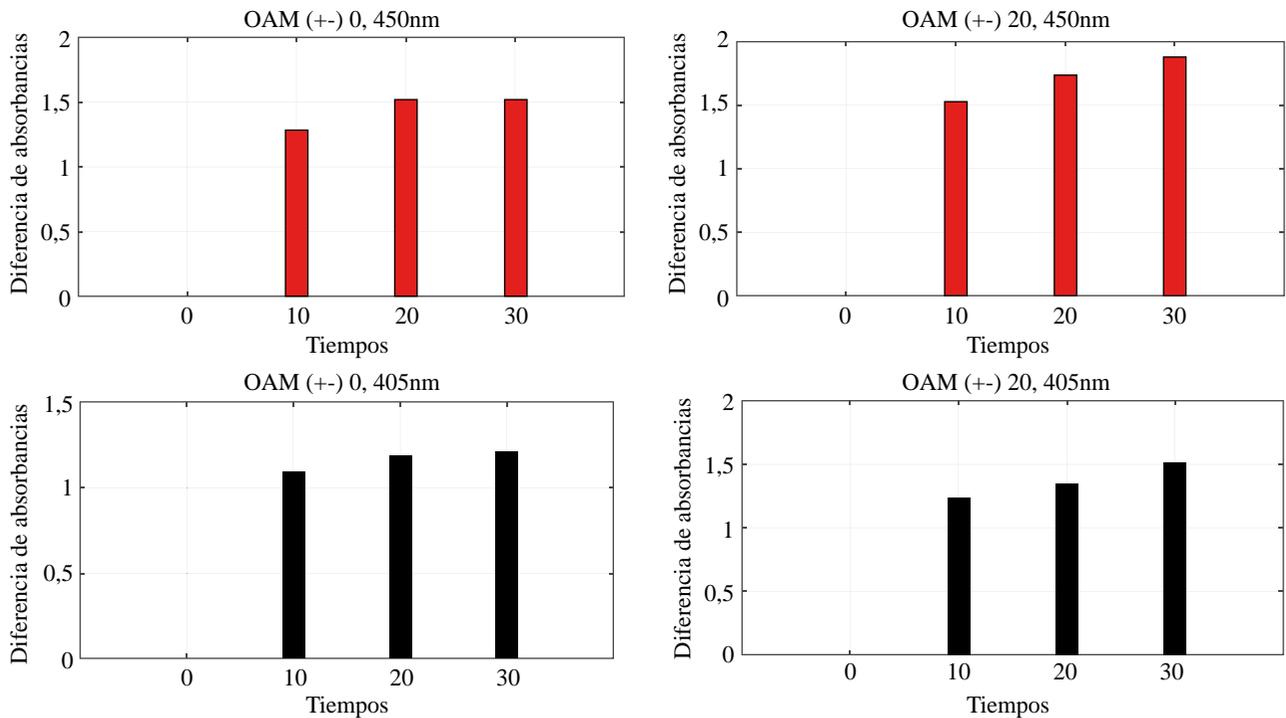
Las figuras 6 y 7, exponen las ganancias calculadas en los diversos tiempos y según la superposición de los momentos de los vórtices ópticos proyectados.



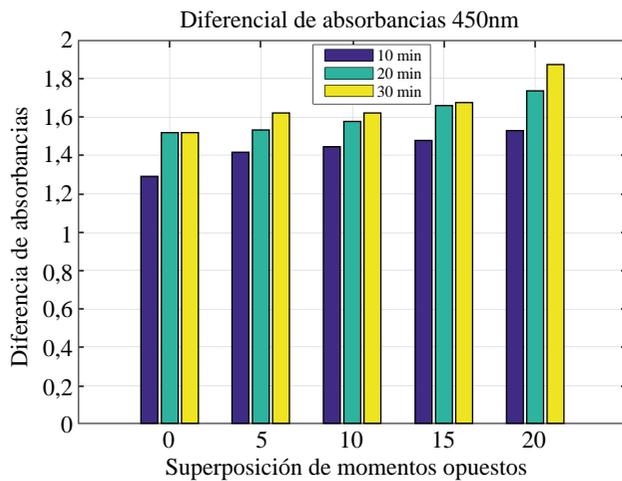
**Figura 1.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 450 nm, catalizador  $NTIO_2$  y superposición de cargas topológicas opuestas  $\pm 0$ . Fuente Autores.



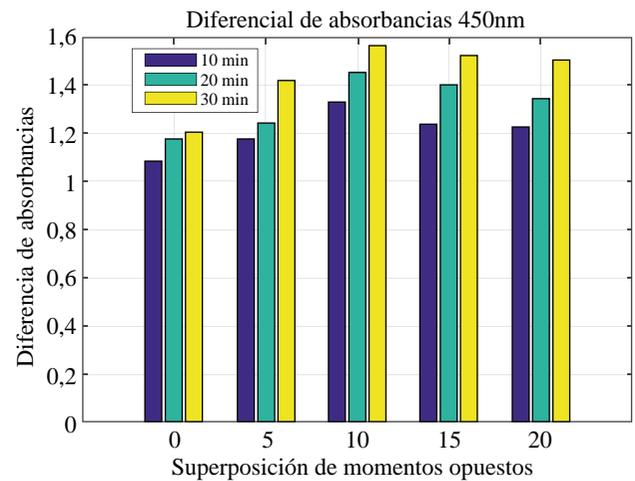
**Figura 2.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 450 nm, catalizador  $NTIO_2$  y superposición de cargas topológicas opuestas  $\pm 20$ . Fuente Autores.



**Figura 3.** Diferencia de absorbancias de la reacción irradiada con un haz de 450 y 405nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$  y superposición de cargas topológicas opuestas desde la perspectiva temporal. Fuente Autores.



**Figura 4.** Diferencia de absorbancias de la reacción irradiada con un haz de 450 nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$ , durante 10, 20 y 30 minutos según la superposición de cargas topológicas opuestas. Fuente Autores.



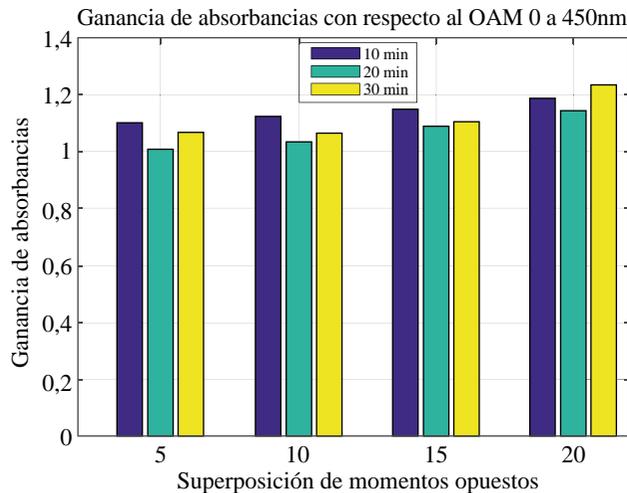
**Figura 5.** Diferencia de absorbancias de la reacción irradiada con un haz de 405 nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$ , durante 10, 20 y 30 minutos según la superposición de cargas topológicas opuestas. Fuente Autores.

### Conclusiones

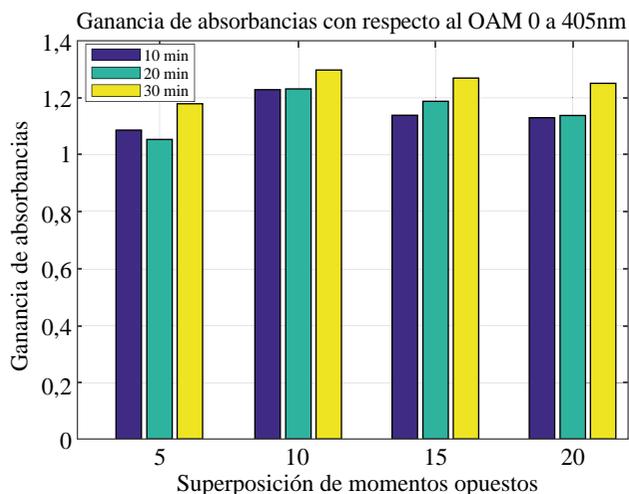
No se evidencia actividad cuando a la solución química de fenol diluido en agua, le son agregados los semiconductores  $\text{TIO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  standard y nano estructurado, bajo la proyección de distribuciones espaciales de luz con longitud de onda de 405 y 450 nm. Por su parte según los resultados de espectrofotometría UV-Vis, se reflejan dinámicas crecientes en la absorbancia cuando la matriz de reacción le es introducido  $\text{TIO}_2$  dopado con nitrógeno bajo la propagación

de los modos fundamentales de las dos longitudes de onda citadas anteriormente, por lo tanto el semiconductor seleccionado para determinar los efectos del momento angular orbital entero y superpuesto es el  $\text{NTiO}_2$ .

Es posible sugerir una leve ganancia en la velocidad de la reacción cuando se propagan vórtices ópticos con momento angular orbital superpuesto de sentido contrario, debido a que el diferencial de las absorbancias para las cargas topológicas propagadas de  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 15$  y  $\pm 20$ , poseen una



**Figura 6.** Ganancia de absorbancias de la reacción irradiada con un haz de 450 nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$ , durante 10, 20 y 30 minutos según la superposición de cargas topológicas opuestas con respecto al índice acimutal cero. Fuente Autores



**Figura 7.** Ganancia de absorbancias de la reacción irradiada con un haz de 405 nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$ , durante 10, 20 y 30 minutos según la superposición de cargas topológicas opuestas con respecto al índice acimutal cero. Fuente Autores

tendencia creciente con respecto a la carga  $\pm 0$ , para los tiempos de 10, 20 y 30 minutos (figura 4). Así mismo la relación contemplada como la división entre el diferencial de absorbancias de los índices acimutales  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 15$  y  $\pm 20$  con el modo fundamental, se sitúan por encima de la unidad (figuras 6 y 7), para los intervalos de tiempo anteriormente descritos.

Los vórtices superpuestos con longitud de onda de 405 nm, si bien no manifiestan comportamiento organizado en el diferencial de las absorbancias (figura 5), como el descrito por la fuente de 450 nm (figura 4), si refleja un incremento en el diferencial de la reacción en todos los tiempos de estudio de la matriz con respecto a la carga topológica del haz proyectado.

El presente trabajo interdisciplinar, es pionero en los campos de la física, química y optoelectrónica, que abre nuevas perspectivas hacia el control de una reacción fotocatalítica o fotoquímica a nivel computacional, modificando desde un procesador el frente de onda de un haz coherente que se propaga hacia una solución química.

## Información suplementaria

**Figura 1S.** Diagrama de bloques del sistema optoelectrónico fotoquímico computacional. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2780>

**Figura 2S.** Montaje experimental. Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2781>

**Figura 3S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 450nm con catalizadores  $\text{WO}_3$  y  $\text{TIO}_2$ . Vea la figura 3S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2782>

**Figura 4S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 405nm con catalizadores  $\text{WO}_3$  y  $\text{TIO}_2$ . Vea la figura 4S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2783>

**Figura 5S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 450nm con catalizador  $\text{NTiO}_2$ . Vea la figura 5S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2784>

**Figura 6S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 405nm con catalizador  $\text{NTiO}_2$ . Vea la figura 6S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2785>

**Figura 7S.** Perfil de intensidad teórico y experimental de la superposición de dos vórtices ópticos con cargas topológicas opuestas de  $\pm 5$ . Vea la figura 7S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2786>

**Figura 8S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 405nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$  y superposición de cargas topológicas opuestas  $\pm 0$ . Vea la figura 8S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2787>

**Figura 9S.** Absorbancia de la reacción irradiada con un haz de 405nm, catalizador  $\text{NTiO}_2$  y superposición de cargas topológicas opuestas  $\pm 20$ . Vea la figura 9S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/615/2788>

## Agradecimientos

Agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander por el apoyo brindado a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, VIE, con el proyecto de financiación interna, “Efecto de la proyección de luz coherente con momento angular orbital y/o momento angular spin sobre una reacción fotocatalítica y/o fotoquímica modelo” código 1845, del programa de apoyo a la consolidación de grupos de investigación año 2016.

## Contribución de los autores

Carlos Fernando Díaz Meza y Yezid Torres Moreno desarrollaron el sistema optoelectrónico y las técnicas holográficas para la propagación del haz de luz coherente portador de

la superposición de momentos angulares orbitales enteros definidos de sentido opuesto, el cual se proyectó sobre la reacción química. Diego Fernando Motta Nieto y Fernando Martínez Ortega desarrollaron la sección fotocatalítica, incluyendo la selección y evaluación de los sólidos que sirvieron como fotocatalizadores de la reacción química.

### Contribución de los autores

Los autores mencionados anteriormente han contribuido de manera original y eficiente para el desarrollo completo del artículo.

El trabajo fue presentado en la modalidad de póster en el XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones (ENO-CANCOA), evento llevado a cabo en la Universidad Industrial de Santander sede Bucarica, en Bucaramanga, Colombia del 20 al 24 de noviembre de 2017.

### Conflicto de intereses

Ninguno

### Referencias

- Andrews, D.L.** (2008). *Structured Light and Its Applications: An Introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces*, First Edition, Academic Press Inc Elsevier, 373 pp.
- Díaz, C. F., Moreno, Y. T., Acevedo, C. H.** (2016). Superposition of two optical vortices with opposite integer or non-integer orbital angular momentum. *Ingeniería e Investigación*. **36** (1): 79-84.
- Fu, K. J., Whetten, R. L., Grant, E. R.** (1984). Pulsed laser initiated photocatalysis in the liquid phase. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. **23** (1): 33-40.
- Gondal, M. A., Hameed, A., Yamani, Z. H., Suwaiyan, A.** (2004). Laser induced photocatalytic oxidation/splitting of water over  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and NiO catalysts: activity comparison. *Chemical Physics Letters*. **385** (1): 111-115.
- Gondal, M. A., Dastageer, M. A., Khalil, A.** (2009). Synthesis of nano-WO<sub>3</sub> and its catalytic activity for enhanced anti-microbial process for water purification using laser induced photocatalysis. *Catalysis Communications*. **11** (3): 214-219.
- Gondal, M. A., Hameed, A., Yamani, Z. H., Seddigi, Z.** (2005). Laser induced photocatalysis and its applications in petrochemicals. *Fuel Cells and phenol degradation*.
- Gondal, M. A., Hameed, A., Suwaiyan, A.** (2003). Photocatalytic conversion of methane into methanol using visible laser. *Applied Catalysis A: General*. **243** (1): 165-174.
- Okada, T., Saiki, T., Taniguchi, S., Ueda, T., Nakamura, K., Nishikawa, Y., Iida, Y.** (2013). Hydrogen production using reduced-Iron nanoparticles by laser ablation in liquids. *ISRN Renewable Energy* 2013.
- Tiffany, W. B., Moos, H. W., Schawlow, A. L.** (1967). Selective laser photocatalysis of bromine reactions laser light excites gaseous bromine molecules to single bound quantum states near the dissociation continuum. *Science*. **157** (3784): 40-43.
- Tiffany, W. B.** (1968). Selective photochemistry of bromine using a ruby laser. *The Journal of Chemical Physics*. **48** (7): 3019-3031.
- Whetten, R. L., Fu, K. J., Grant, E. R.** (1982). Pulsed-laser photocatalytic isomerization and hydrogenation of olefins. *Journal of the American Chemical Society*. **104** (15): 4270-4272.
- Xavier, J., Dasgupta, R., Ahlawat, S., Joseph, J., Kumar Gupta.** (2012). Three dimensional optical twisters driven helically stacked multi layered micro rotors. *Applied Physics Letters*. **100** (12): 121101.

# Completing the puzzle: Another species of *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) from Colombia

Andrés F. García<sup>1,\*</sup>, Daniela Ahumada-C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Invertebrados, Museu Nacional/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Biología Descriptiva y Aplicada, Grupo de Investigación en Hidrobiología, Programa de Biología, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

## Abstract

*Rhaucus papilionaceus* (Simon, 1879) restored combination is revalidated, as previously stated by Henriksen (1932). A redescription of the species including Scanning Electron Microscopy (SEM) images and a distribution map is offered. This species represents the sixth valid species of the genus and extends its altitudinal range to lowest forests in the Colombian Andes (1500 m a.s.l.). © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Laniatores; Colombia; Taxonomy; Andes; Diversity.

**Se completa el rompecabezas: otra especie de *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida: Opiliones: Cosmetidae) de Colombia**

## Resumen

Se revalidó la combinación restaurada de *Rhaucus papilionaceus* (Simon, 1879) según lo indicado previamente por Henriksen (1932). Se ofrece una nueva descripción de la especie, incluidas imágenes tomadas con microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscopy*, SEM) y un mapa de distribución. Esta especie representa la sexta especie válida del género y extiende su rango altitudinal a los bosques bajos en los Andes colombianos (1.500 m.s.n.m.). © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Laniatores; Colombia; Taxonomía; Andes; Diversidad.

## Introduction

The Neotropical harvestmen family Cosmetidae C.L. Koch, 1839 is the second most diverse among the suborder Laniatores, with 126 genera and 719 species (Kury, 2003; 2013; Kury & Barros, 2014; Kury & García, 2016). *Rhaucus* Simon, 1879 is a harvestman genus that occurs in the Andean region of Colombia, especially in montane forests and páramos from Santander, Boyacá, and Cundinamarca departments (García & Kury, 2017).

Currently, this genus contains five species: *Rhaucus florezi* García & Kury, 2017; *Rhaucus quinquelineatus* Simon, 1879; *Rhaucus robustus* (Mello-Leitão, 1941); *Rhaucus serripes* (Simon, 1879), and *Rhaucus vulneratus* Simon, 1879 (type species) (García & Kury, 2017).

However, in a revision of harvestmen material from Colombia, we identified some specimens of *Erginus papilionaceus* Simon 1879, currently *Flirtea papilionacea* (Simon, 1879) (Kury, 2003) that match the diagnosis of *Rhaucus* given by García & Kury (2017). Thus, in this work we redescribed the species and propose the combination *Rhaucus papilionaceus* (Simon, 1879) restored combination, a combination previously stated by Henriksen (1932). Additionally, a map with the known records in Colombia is given.

## Materials and methods

We photographed specimens using a Sony Cybershot DSC-V1 camera. We integrated the multiple resultant images at different focal planes with the Combinez Suite software (Hadley, 2015). To increase the depth of field, integrated images were then edited with the Photoshop® CC 2014 software. Drawings of the species were made using Inkscape 0.91 software.

For color descriptions, we used the standard names of the 267 Color Centroids of the NBS/IBCC Color System (<http://people.csail.mit.edu/jaffer/Color/Dictionaries#nbs-iscc>) (Jaffer, 2001) as explained in Kury (2012). Scanning Electron Microscopy (SEM) was carried out with a JEOL JSM-6390LV microscope at the Center for Scanning Electron Microscopy of the Museu Nacional/UFRJ with an accelerating voltage of 10 kV after sputter-coating with gold-palladium.

### \*Corresponding autor:

Andrés F. García, [agarciarinc@gmail.com](mailto:agarciarinc@gmail.com)

Received: January 27, 2018

Accepted: April 19, 2018

Editor: Marta Ramírez Pinilla

Geographic coordinates have been transcribed verbatim from the labels and may be in different formats; when there was no indication of coordinates, these were interpolated between square brackets using Google Maps to indicate that they were estimates. The distribution map was made using SimpleMapp (Shorthouse, 2010). Colored shapes make reference to WWF world ecoregions (Olson, *et al.*, 2001).

The morphological terminology follows: Kury & Barros (2014), Kury & Medrano (2016) and García & Kury (2017) for dorsal scutum, coda, *clavi inguines* and other anatomic terms; Kury & Villarreal (2015), Medrano & Kury (2016) and Kury (2016) for macrosetae and microsetae of male genitalia. The stylus in Cosmetidae has a serrate fleshy caruncle (Kury & Ferreira, 2012), called a “wattle” (Kury & Barros, 2014; Kury & Villarreal, 2015).

The morphometric abbreviations are the following: AL = maximum abdominal scutum length, AW = maximum abdominal scutum width, BaCh = basichelicerite length, ci = *clavi inguines*, CL = carapace length, CW = carapace width; DS = dorsal scutum, Fe = femur, mca = multicapitate apophysis, MS = macrosetae of penis, Pa = patella, Ti = tibia, VP = ventral plate. All measurements are in mm unless otherwise noted. The following are the abbreviations of the repositories: ICN-AO (Instituto de Ciencias Naturales – Arachnida Opiliones, Bogotá, Colombia: curator Eduardo Flórez) and MNRJ (Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil: curator Adriano Kury).

## Results

*Rhaucus papilionaceus*. (Simon, 1879) restored combination. (Figures 1-8).

*Flirtea papilionacea* (Simon, 1879)

• *Erginus papilionaceus* Simon 1879: 205

*Flirtea papilionacea*: Roewer 1912: 77; Roewer 1923: 347; Roewer 1927: 593; Mello-Leitão 1932: 78; Kury 2003: 62

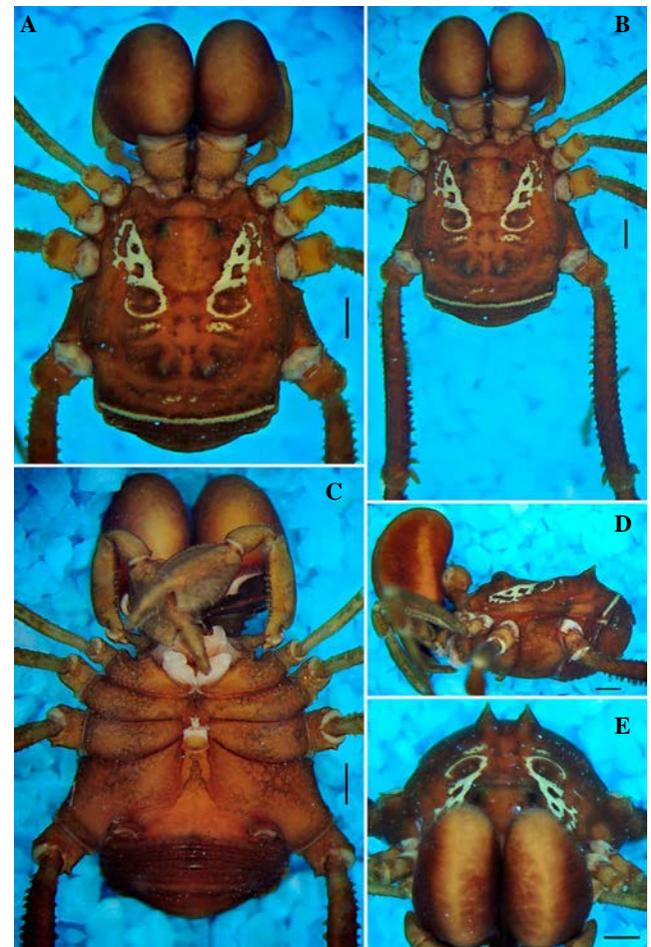
*Rhaucus (Erginus) papilionaceus*: Henriksen 1932: 352.

**Type data.** ♂ holotype (MNHN SI 2794), examined by photograph (Figure 1).

**Material examined.** COLOMBIA, Boyacá department: (ICN-AO-63) 1♀ from [Moniquirá], Togüi, finca de Pedro Ruíz, [5.936392, -73.514004], ii.1978, 1650 m, I. de Arevalo leg.; Santander department: (ICN-AO-441) 1♀ from Suaita, San José de Suaita, vereda Neftalí, [6°10'3.60"N 73°26'44.00"W], 1550 m, 5.x.1998, animal systematics students leg.; (ICN-AO-768) 1♂ from Zapatoca, [6°49'4.28" N 73°16'36.93" W], v.2008, cave, Solimary García leg.; (ICN-AO-877) 1♂ from Puente Nacional, Finca El Mirador, 5.90282N -73.694950W, 13.vi.2011, 1720 m, Lina Escobar leg.; (ICN-AO-1053) 1♀ from Zapatoca, quebrada Uchubala, 6°48'34.40"N; 73°15'54.70"W, 31.v.2012, J. Díaz leg.; (ICN-AO-1089) 1♀ from Charalá, Virolín, Cuchilla del Fara, 06°5'47.4" N 73°13'00.7" W, vi.2012, 1718 m, L. Escobar leg.; (ICN-AO-1162) 3♂ from San Gil, Vereda Resumidero, road to Mogotes, 06°32'28.25" N 73°5'28.75"

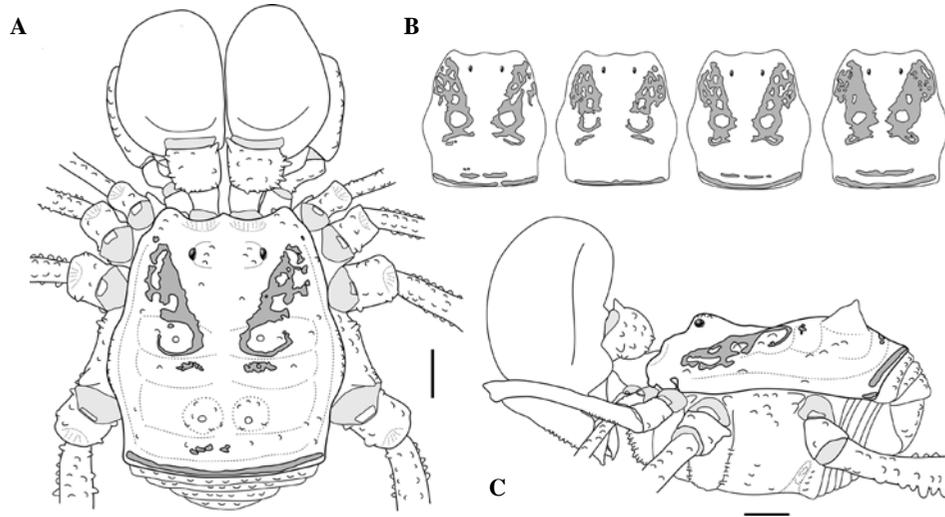


**Figure 1.** Type material of *Erginus papilionaceus* Simon, 1879 (MNHN SI 2794). A. Original labels. B. Male holotype, dorsal view. C. Same, ventral view. Photographs courtesy of Ricardo Pinto-da-Rocha.

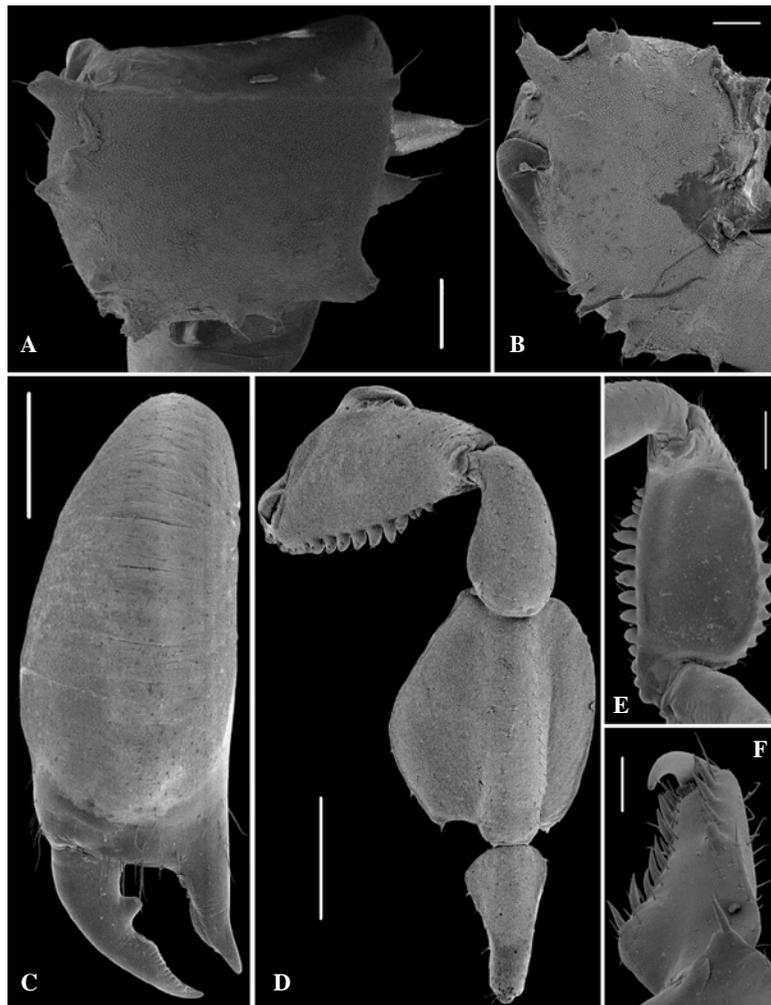


**Figure 2.** *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. (ICN-AO-1162), male habitus: A. Dorsal view. B. Panoramic view. C. Ventral view. D. Lateral view. E. Frontal view. Scale bars = 1 mm.

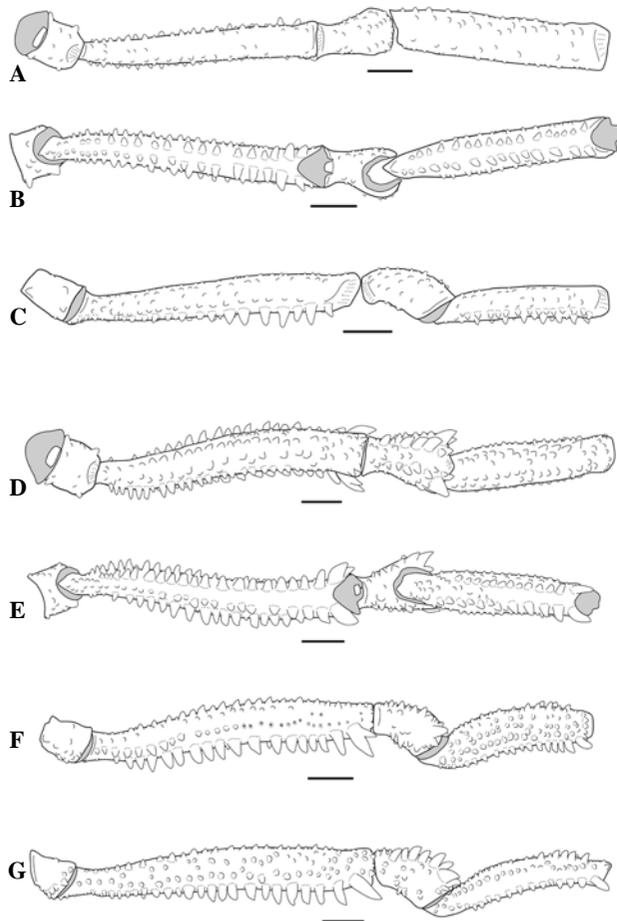
W, 1600 m, 30.iii.2013, under log, A. García leg.; (MNRJ 2676) 1♂, same data as ICN-AO-1162; (ICN-AO-1215) 1♀ from road Piedecuesta-Sevilla [vereda Sevilla] [6.981232,



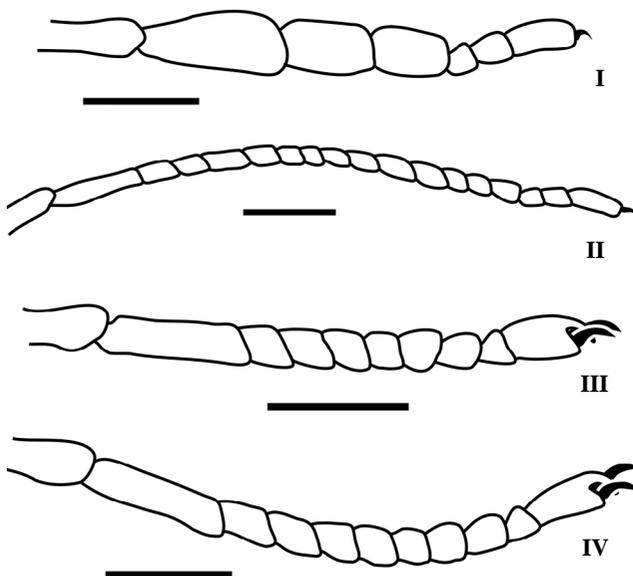
**Figure 3.** *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. (ICN-AO-1162) **A.** Dorsal view. **B.** Variations of dorsal scutum blots. **C.** Lateral view. Scale bars = 1 mm.



**Figure 4.** SEM images of *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. (ICN-AO-1162), male: Chelicera (A-C): **A.** Basichelicerite, dorsal view. **B.** Same, mesal view. **C.** Hand, frontal view. Pedipalp (D-F): **D.** Frontal view. **E.** Femur, mesal view. **F.** Tarsus, mesal view. Scale bars: A-B, F = 200 µm; C-D = 1 mm, E = 500 µm.



**Figure 5.** Legs III-IV of *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. (ICN-AO-1162), male. Leg III: **A.** Dorsal view. **B.** Ventral view. **C.** Retrolateral view. Leg IV: **D.** Dorsal view. **E.** Ventral view. **F.** Retrolateral view. **G.** Prolateral view. Scale bars = 1 mm.



**Figure 6.** Tarsomeres I-IV of *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. (ICN-AO-1162), male. Scale bars = 1 mm.

-73.025316], 5.xi.2013, C. Perafán & D. Martínez leg.; (ICN-AO-1374) 1♂ 1♀ from Suaita, Bosque Fundación San Cipriano, 6°10'24"N; 73°25'36.4"W, 2.v.2013, 1708 m, Andean forest, Catalina Romero & German Amat leg.; (ICN-AO-1381) 1♂ from Zapatoca, vereda La Cacica, Reserva La Montaña Mágica, 6°50.310N; 73°17.685W, 7.xi.2013, 1740 m, Carlos Perafán & Daniela Martínez leg.; (ICN-AO-1725) 1♂ from Suaita, San José de Suaita, Bosque Fundación San Cipriano, 1-8.vii.2014, 1780 m, Catalina Romero & Daniela Martínez leg.

**Etymology.** Eugène Simon did not explain the etymology of the species names in his works (A.B. Kury, pers. comm.). We deduced that the specific epithet comes from the Latin word *papilio* (= butterfly), referring to the shape of the paired blots on the dorsal scutum of the species, which resemble a butterfly with open wings (Figure 1).

**Redescription.** Male (ICN-AO-1162). Measurements: CL=2.1 CW=3.8, AL=2.6, AW=5, BaCh=1, Fe III=5.2, Fe IV=7.3, Ti III=3.2, Ti IV=4. Intraspecific variations of body and appendages measurements (n=10, min-max): CL=2-2.3, CW=3.3-4.1, AL=2.3-3, AW=4.3-5, BaCh=0.8-1.1, Fe III=5.1-6.3, Fe IV=7-8.8, Ti III=3-3.8, Ti IV=4-5.

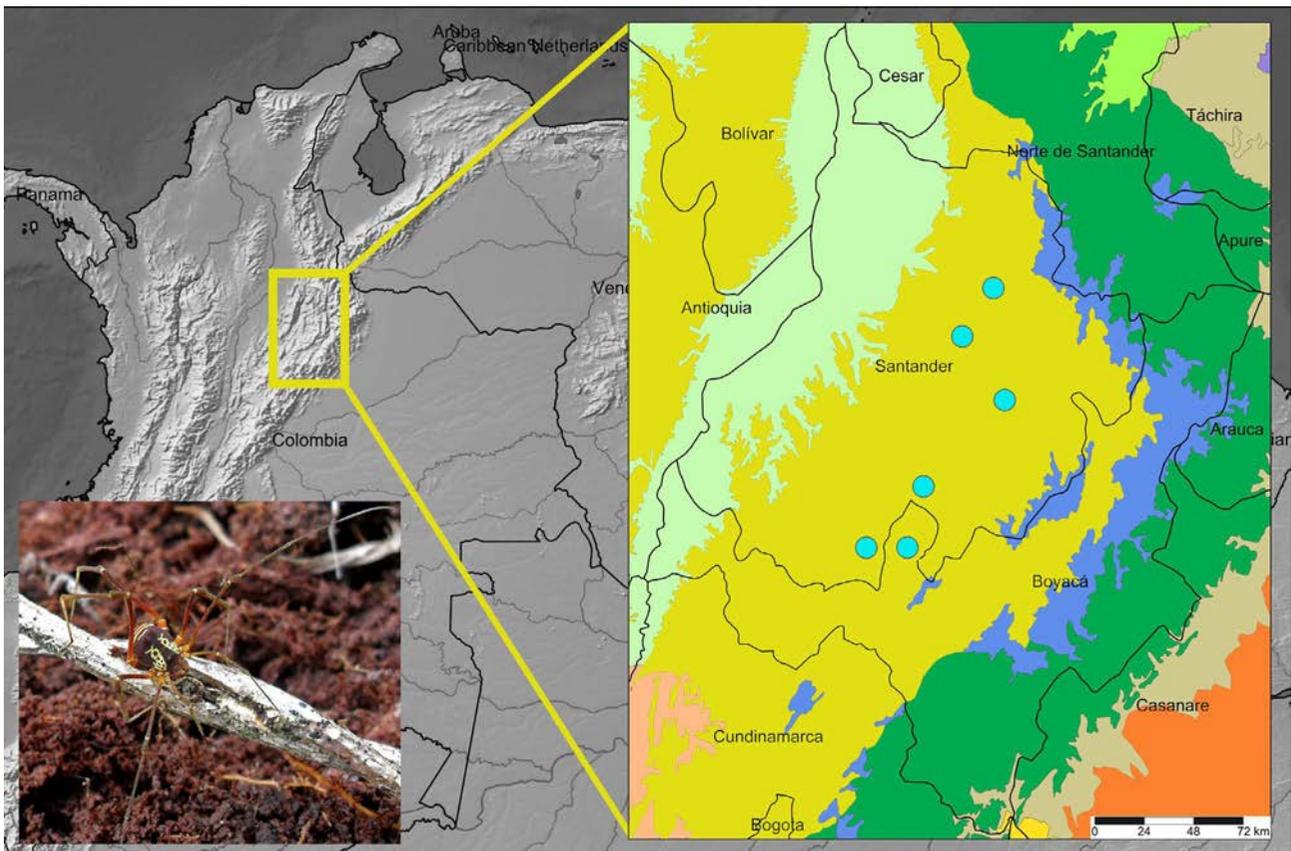
**Dorsum.** Dorsal scutum alpha type, mostly smooth (Figures 2A, 3A), with a pair of oblique triangular yellow blots on DS (Figure 2A, 3A-B). Abdominal scutum widest at groove II; areas I-IV slightly granulate. Carapace with a few granules on the anterolateral region (Figure 3A). Ocularium low without median depression, armed with a cluster of granules (Figures 3A, C). Lateral margins of DS with a few lateral pegs on the medial region (Figure 3A). Mesotergum faintly delimited and divided in four areas: Area I with a pair of medium-sized paramedian tubercles; area II and IV with few minute granules, and area III with a pair of paramedian conical, medium-sized tubercles (Figures 2D-E, 3A, C). Posterior border of scutum slightly curved and with a row of tubercles. Free tergites I-III with a row of granules (Figures 3A).

**Venter.** Stigmatic area with a few granules. Large, oval, and transverse stigmata. Coxa I with two parallel rows of tubercles increasing in size distally and with an anterior smooth space for the pedipalps to rest (Figure 2C); coxa II longer than coxa I, slightly granulate; coxa III longer than I and II, granulate, with posterior margin curved; coxa IV strongly backward, granulate (Figures 2C, 3C). Genital operculum slightly granulate.

**Chelicera.** Chelicera swollen. Basichelicerite rectangular, with dispersed granules, one group of tubercles of different sizes on the proximal border, one small and one large ectal sub-distal tubercle; one medium-sized, meso-distal tubercle and one proximal medium-sized tubercle (Figure 4A). Ventrally, there is a group of five small tubercles and, in mesal view, a big irregular tubercle on the distal portion, three in the medial portion and one little proximal tubercle are evident (Figures 4A-B). Hand with one tubercle near the joint of the movable finger. Fixed finger with the inner



**Figure 7.** Distal portion of male genitalia of *Rhaucus papilionaceus* **rest. comb.** (ICN-AO-1162). **A.** Ventral view. **B.** Detail of type 4 microsetae of ventral plate. **C.** Dorsoapical view. **D.** Lateroapical view. Scale bars: A, C-D = 50  $\mu$ m, B = 10  $\mu$ m.



**Figure 8.** Map showing the distribution of *Rhaucus papilionaceus* **rest. comb.** (blue circles) in Colombia. The yellow area corresponds to the Magdalena Valley montane forest ecoregion (NT0136).

surface finely grooved. Movable finger with one conical, sub-basal tooth and with the inner surface at distal portion dentate (Figure 4C).

**Pedipalpus.** Coxa with one meso-distal granule dorsally and ventrally. Trochanter with one dorsal short tubercle and one big ventro-distal tubercle. Femur compressed laterally, with a dorsal row of aligned triangular setiferous tubercles of different sizes –not reaching the distal portion–, ventrally with three basal, small setiferous tubercles, seven individual conical large setiferous tubercles at median portion, and three small tubercles on the distal portion (Figure 4D-E). Patella distally depressed, with minute dorsal granules. Tibia spoon-shaped, dorsally granulate, with lateral borders slightly tuberculate and some spiniferous tubercles on distal portion (Figure 4D); inner surface slightly striated. Tarsus long, conical, with some dorsal granules and ventrally with two rows of thickened setae (Figure 4F).

**Legs.** Coxa I-III dorsally and ventrally with some granules; coxa IV coarsely granulate, with an anterolateral *clavi inguines* and with a posterolateral multicapitate apophysis (Figure 2C). Trochanter I-II dorsally and ventrally with some minute granules; III-IV with some dorsal and ventral tubercles (Figures 5A-B, D-E); IV with a group of tubercles visible in retrolateral view and one prolateral row of tubercles beginning at the ventral face of the trochanter and ending in the dorsal face (Figures 5F-G). Femora I-II sub-straight; femora III-IV sigmoid, granulated, ventrally with two longitudinal rows of tubercles along the entire length. Femora III-IV with one prolateral and one retrolateral row of tubercles increasing in size distally (in Fe IV the distal-most tubercle of the retrolateral row is bifid and thicker than the others while the distal-most tubercle of the prolateral row is conical) (Figures 5B-C, E-G). Patellae I-IV dorsally granulated, curved; Pa IV with a prolateral row of prominent conical tubercles and with two median tubercles on the retrolateral-ventral side (Figures 5D-G). Tibiae I-IV granulated; tibiae III-IV ventrally with two longitudinal rows of tubercles along the entire length (in Ti IV increasing in size distally) (Figures 5B, E). Metatarsi I-IV with one ventrodistal setae. Tarsi of legs I-II with one smooth claw; tarsi of legs III-IV with two subparallel smooth claws and tarsal process (Figure 6). Tarsal counts: 6(3)–6(3)/18(3)–18(3)/10–10/12–11. Intraspecific variation of tarsomeres (n=10, min–max): Leg I = all with 6; Leg II = 13(3)–18(3); Leg III = 9–10; Leg IV = 10–12.

**Color (in ethanol).** Carapace strong brown (55), reticulated at laterals of the ocularium. Blots in carapace brilliant yellow (83). Chelicerae and coxae I-IV strong brown (55). Pedipalpus and trochanters I-IV strong yellow (84). Legs I-IV strong brown (55).

**Penis.** VP of penis subrectangular with slightly concave distal border (Figure 7A) and two lateral, elongated, dense patches of type 4 microsetae (Figure 7B). VP with two apical MS C curved and laterally inserted; two MS D, the most distal, large and straight one following the same lateral row

as MS C, and the other one, smaller, inserted dorso-laterally on the third portion of the VP; two MS A straight and laterally inserted, near to D2 (Figures 7C); two small MS E volcano-shaped in the ventral face; one small MS B volcano-shaped inserted laterally in the base of the VP (Figure 7D). Glans mostly smooth; stylus long, wattle barbels, short finger-like process rounded, enlarged (Figure 7D).

**Female.** Similar to male, but differs by having anterior part of carapace narrower and coda divergent, ocularium lower, abdominal scutum more strongly convex, free tergites and posterior area of scutum wider, tubercles of area III shorter, legs III-IV and associated rows of tubercles thinner, and chelicerae not hyperthelic.

**Diagnosis.** A pair of oblique yellow blots on DS (transverse lines in *R. florezi*, *R. quinquelineatus* and *R. vulneratus*, reticulate pattern in *R. robustus* and *R. serripes*), beginning at ozopores level and extending to area II of carapace (Figures 2A, 3A-B). Distal-most tubercle on retrolateral face of femur IV bifid bigger than the others (Figure 5F) (minuscule tubercle in *R. vulneratus*, of the same size as the others in *R. quinquelineatus*, median and not forked in *R. florezi* and *R. robustus*, two tubercles close together in *R. serripes*). Patella IV with a prolateral row of robust tubercles (Figure 5G), which is absent in the remaining species of *Rhaucus*.

**Distribution.** Colombia, Santander department: Puente Nacional, San Gil, Suaita and Zapatoca municipalities, between 1550 and 1740 m. a. s. l, in the Magdalena Valley montane forests ecoregion (Figure 8).

## Discussion

In general, *Rhaucus* exhibits a high level of endemism, distributing in the mountains of central Andes of Colombia restricted to Cundinamarca, Boyacá and Santander departments (García & Kury, 2017). *Rhaucus papilionaceus* rest. comb. shows that condition, and has been recorded in montane forests of Santander and Boyacá departments between 1500 to 1780 m.a.s.l. In fact, there were no specimens found from Bogotá (as stated in the original label), which is located at 2600 m.a.s.l., so, we think that the original label could be wrong.

On the other hand, a particularity of this species is that it occurs in lowest montane forests, almost a thousand meters below the other species of *Rhaucus* (2300 to 3600 m.a.s.l.) (García & Kury, 2017). We can now conclude that the genus may be found in montane forests and páramos (Andean highlands) of Colombia, from 1500 to 3600 m.a.s.l. in the Magdalena Valley montane forests (NT0136), the Cordillera Oriental montane forests (NT0118) and the Northern Andean páramo (NT1006) ecoregions.

Finally, the examination of type material and the comparison with freshly collected material and/or photographs are two of the main tools to detect described and new species of harvestmen. In this case, photographs of the holotype of *E. papilionaceus*, together with a photograph

of a living specimen in a field guide of harvestmen and millipedes from La Meseta Natural Reserve (Suaita, Santander department) (Martínez-Torres, *et al.*, 2016) allowed us to confirm the identity of the species, and posteriorly review the vouchers deposited in ICN and MNRJ.

### Acknowledgments

We are thankful to Eduardo Flórez (ICN-UNAL) for the loan of *Rhaucus* material. Adriano Kury (MNRJ) facilitated the laboratory work and made important comments about Simon's works. Ricardo Pinto-da-Rocha (USP) kindly shared us photographs of the holotype of *Erginus papilionaceus* from MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France). Daniela Martínez (ICN-UNAL) kindly shared us the photograph of the living specimen in figure 8. The SEM micrographs were taken in the Center for Scanning Electron Microscopy (MNRJ) with the support of Beatriz Cordeiro. The OmniPaper Project (<http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/pdfs%20opiliones.htm>) created by Adriano Kury was very helpful providing access to some papers. Finally, we thank the three referees of this manuscript for their recommendations. This study has been supported by a scholarship from the Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) to AFG.

### Contribution of the authors

A. F. García: Introduction, illustrations, photographs, re-description, discussion. D. Ahumada-C.: Redescription.

### Conflicts of interest

The authors declare that they have no competing interests.

### References

- García, A.F., Kury, A.B.** (2017). Taxonomic revision of the Andean harvestman genus *Rhaucus* Simon, 1879 (Arachnida, Opiliones, Cosmetidae). *Zootaxa*. **4338** (3): 401-440. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4338.3.1>
- Hadley, A.** (2015). CombineZP. Image stacking software. Accessed in June 2017. Available from <http://www.hadleyweb.pwp.blueyonder.co.uk/CZP/Installation.htm>
- Henriksen, K.L.** (1932). Descriptiones Laniatorum (Arachnidorum Opilium Subordinis) fecit William Sørensen. Opus posthumum recognovit et edidit Kai L. Henriksen. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs skrifter [= Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et des Lettres de Danemark], København [Copenhague], Naturvidenskabelig og Matematisk Afdeling [= Section des sciences Naturelles et mathématiques], sér. 9; **3** (4): 197-422.
- Jaffer, A.** (2001). NBS/ISCC Centroids. Color-Name Dictionaries. Accessed in September 2017. Available from <http://people.csail.mit.edu/jaffer/Color/Dictionaries#nbs-iscc>
- Kury, A.B.** (2003). Annotated catalogue of the Laniatores of the New World (Arachnida, Opiliones). *Revista Ibérica de Aracnología*. **1**: 1-337.
- Kury, A.B.** (2012). A new genus of Cranidae from Ecuador (Opiliones: Laniatores). *Zootaxa*. **3314**: 31-44.
- Kury, A.B. & Ferreira, C.P.** (2012). Two new species of *Roquettea* Mello-Leitão, 1931 from northern Brazil (Opiliones: Laniatores: Cosmetidae). *Zootaxa*. **3328**: 35-46.
- Kury, A.B.** (2013). Order Opiliones Sundevall, 1833. In: Zhang, Z.Q. (Ed.), *Animal Biodiversity: An Outline of Higher-level Classification and Survey of Taxonomic Richness* (Addenda 2013). *Zootaxa*. **3703** (1): 27-33. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3703.1.7>
- Kury, A.B. & Barros, C.M.** (2014). A new genus and eight new species of Amazonian cosmetines (Opiliones, Laniatores, Cosmetidae). *Zoological Studies*. **53**: 1-46.
- Kury, A.B. & Villarreal, M.O.** (2015). The prickly blade mapped: Establishing homologies and a chaetotaxy for macrosetae of penis ventral plate in Gonyleptoidea (Arachnida, Opiliones, Laniatores). *Zoological Journal of the Linnean Society*. **174** (1): 1-46.
- Kury, A.B.** (2016). A classification of the penial microsetae of Gonyleptoidea (Opiliones, Laniatores). *Zootaxa*. **4179** (1): 144-150.
- Kury, A.B. & García, A.F.** (2016). On the identity of *Flirtea* (Arachnida, Opiliones, Cosmetidae). *Zootaxa*. **4093** (2): 231-247.
- Kury, A.B. & Medrano, M.** (2016). Review of terminology for the outline of dorsal scutum in Laniatores (Arachnida, Opiliones). *Zootaxa*. **4097**: 130-134. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.4097.1.9>
- Martínez-Torres, D., Romero-Ortiz, C., Flórez, E.** (2016). Los arácnidos y miriápodos del bosque La Meseta (Suaita, Santander). *Serie Miniguías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales*. N° 27.
- Medrano, M. & Kury, A.B.** (2016). Characterization of *Platymessa* with redescription of the type species and a new generic synonymy (Arachnida, Opiliones, Cosmetidae). *Zootaxa*. **4085** (1): 52-62.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., Kassem, K.R.** (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. *BioSci*. **51**: 933-938.
- Shorthouse, D.P.** (2010). SimpleMapper, an online tool to produce publication-quality point maps. Accessed in September 2017. Available from <http://www.simplemapper.net>

# Propagación sexual y tolerancia a la desecación del agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) de tres fuentes semilleras localizadas en Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) y Gachetá (Cundinamarca)

Carlos Iván Suárez-Ballesteros\*, Manuela Calderón-Hernández, Carolina Mancipe-Murillo

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Subdirección científica, Línea de Investigación en especies y propagación, Sublínea de conservación de semillas, Bogotá, D.C., Colombia

## Resumen

*Vaccinium meridionale* es una especie con un alto potencial agroalimentario registrada en la región altoandina de Colombia. Actualmente no hay un proceso establecido para su producción y la cosecha de los frutos generalmente se hace en huertos silvestres mantenidos y propagados vegetativamente, lo que puede ocasionar pérdida de la diversidad genética. Por ello, se evaluó la propagación sexual en invernadero y la tolerancia a la desecación de *V. meridionale*. Se hicieron pruebas de viabilidad con tetrazolio y de tolerancia a la desecación, así como ensayos de propagación sexual en invernadero para evaluar la repuesta germinativa con dos beneficios (fermentado y sin fermentar) y cinco tratamientos pregerminativos (500 mgL<sup>-1</sup> de ácido giberélico, GA<sub>3</sub>, 500 mgL<sup>-1</sup> de nitrato de potasio, KNO<sub>3</sub>, agua de coco al 100 %, Aloe vera al 50 %, y control por “inmersión en agua”) de semillas recolectadas en tres fuentes semilleras localizadas en los municipios de Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) y Gachetá (Cundinamarca). No se registraron diferencias en los porcentajes de germinación y el tiempo medio de germinación en cuanto a las fuentes semilleras, los beneficios y los tratamientos pregerminativos utilizados, por lo cual se recomienda evaluar otro tipo de sustratos y tratamientos de ruptura de latencia. Dado el carácter ortodoxo de las semillas de *V. meridionale*, la especie es apta para su conservación *ex situ* utilizando la estrategia de bancos de semillas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Canco de semillas *ex situ*; Conservación; Propagación sexual; Semillas ortodoxas.

**Sexual propagation and desiccation tolerance of agraz (*Vaccinium meridionale* Sw) of three seed sources located in Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) and Gachetá (Cundinamarca)**

## Abstract

*Vaccinium meridionale* is a species with high agri-food potential registered in the high-Andean region of Colombia. Currently there is no established process for its production and fruit harvesting is usually done from wild orchards that are maintained and propagated vegetatively, which can cause loss of genetic diversity. Therefore, we studied its sexual propagation in a greenhouse and its desiccation tolerance. We also evaluated the viability using the tetrazolium test, as well as desiccation tolerance and sexual propagation tests in a greenhouse. The germination response was evaluated with two benefits (fermented and unfermented) and five pre-germinative treatments (500 mgL<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>, 500 mgL<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub>, coconut water 100%, Aloe vera 50%, control by “immersion in water”) of seeds collected in three seed sources located in the municipalities of Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) and Gachetá (Cundinamarca). There were no differences in the germination percentages and the mean germination time with respect to the seed sources, the benefits and the pregerminative treatments used, for which it is recommended to evaluate another type of substrata and treatments for dormancy rupture. Given the orthodox trait of the seeds of *V. meridionale*, this species is apt to be conserved *ex situ* by means of the seed bank strategy. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** *Ex situ* seed bank; Conservation; Sexual propagation; Orthodox seed.

## Introducción

La familia Ericaceae es uno de los componentes florísticos más importantes del Neotrópico; predomina en ambientes húmedos montañosos entre los 1.000 y los 3.000 metros de altitud y su riqueza aumenta a medida que se acerca a la línea ecuatorial: El mayor número de especies se ha encontrado en Colombia y Ecuador (Luteyn, 2002). En la familia hay

plantas ornamentales y frutales de consumo humano, y en Colombia se destaca *Vaccinium meridionale*, conocida con el nombre de agraz o mortiño (Ligarreto, 2009).

### \*Correspondencia:

Carlos Iván Suárez Ballesteros; [carlosivan.sb@gmail.com](mailto:carlosivan.sb@gmail.com)

**Recibido:** 6 de febrero de 2018

**Aceptado:** 26 de abril de 2018

**Editor:** Elizabeth Castañeda

*Vaccinium meridionale* crece de forma silvestre en la zona altoandina de Colombia, y según **Ligarreto** (2009), hay dos regiones en donde es más representativa: la primera comprende la zona noroccidental del departamento de Antioquia, específicamente los municipios de Santa Rosa de Osos, Don Matías, Entreríos, Belmira y San José de la Montaña, y la segunda se ubica en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, en Boyacá principalmente en los municipios de Chiquinquirá, Ráquira y Tinjacá, y en Cundinamarca en los municipios de Guachetá y Machetá.

La especie se destaca por su gran potencial para el desarrollo de actividades productivas (**Lobo**, 2006), ya que su fruto tiene un alto contenido de compuestos polifenólicos que se expresan en su alta capacidad antioxidante (**Gaviria, et al.**, 2009). Estas cualidades han determinado la creciente demanda nacional y un alto potencial de exportación, sin embargo, la comercialización del fruto se da a pequeña escala, principalmente en plazas de mercado y sitios cercanos a las zonas de recolección (**Smith, et al.**, 2009).

En el género *Vaccinium* la germinación y el desarrollo de las plántulas se ven obstaculizados por factores como la fluctuación de la humedad, la temperatura y la luz (**Castro, et al.**, 2012). Las semillas de *V. meridionale* son fotoblásticas positivas, presentan latencia fisiológica poco profunda y un comportamiento ortodoxo frente a la desecación (**Hernández, et al.**, 2009). Este comportamiento tiene implicaciones importantes en la conservación de la especie, pues la capacidad de tolerar la desecación permite el almacenamiento a largo plazo de las semillas bajo condiciones adecuadas (**Wyse & Dickie**, 2017).

En los ensayos de propagación en condiciones de laboratorio realizados en *V. meridionale* se han encontrado diferencias en los porcentajes y el tiempo de germinación por efecto del tipo de tratamiento utilizado para romper la latencia, el tiempo de monitorización, las condiciones de luz y temperatura en las cuales se hicieron los ensayos. **Valencia & Ramírez** (1993) hicieron ensayos de germinación sin utilizar tratamientos pregerminativos y obtuvieron 62 % de germinación; **Magnitskiy & Ligarreto** (2007) evaluaron el efecto promotor de tres concentraciones (100, 200 y 500 mg l<sup>-1</sup>) de nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>), ácido giberélico (GA<sub>3</sub>) y ácido indolacético (AIA): en el ensayo con 500 mg l<sup>-1</sup> de KNO<sub>3</sub> se obtuvo el mayor porcentaje de germinación (38 %); los autores destacan que el KNO<sub>3</sub> y GA<sub>3</sub> favorecen la germinación en la especie. **Hernández, et al.** (2009) evaluaron el efecto promotor de tres concentraciones (500, 1.000 y 2.000 mg l<sup>-1</sup>) de GA<sub>3</sub> en dos regímenes de temperatura (20 y 25 °C), y encontraron que en los ensayos con 500 y 1.000 mg l<sup>-1</sup> se lograron los mayores porcentajes de germinación, 97 % y 98 %, respectivamente.

Con el objetivo de contribuir al conocimiento de las especies de los ecosistemas altoandinos registradas en el Banco de Semillas del Jardín Botánico de Bogotá (BSJBB), y de promover el uso de especies nativas con potencial agroalimentario, en el presente estudio se evaluó la tolerancia a

la desecación y la germinación en invernadero de semillas de *V. meridionale* con distintos tratamientos pregerminativos con el fin de explorar su aplicación en la elaboración de protocolos de propagación para el aprovechamiento y crecimiento del mercado de este fruto.

## Materiales y métodos

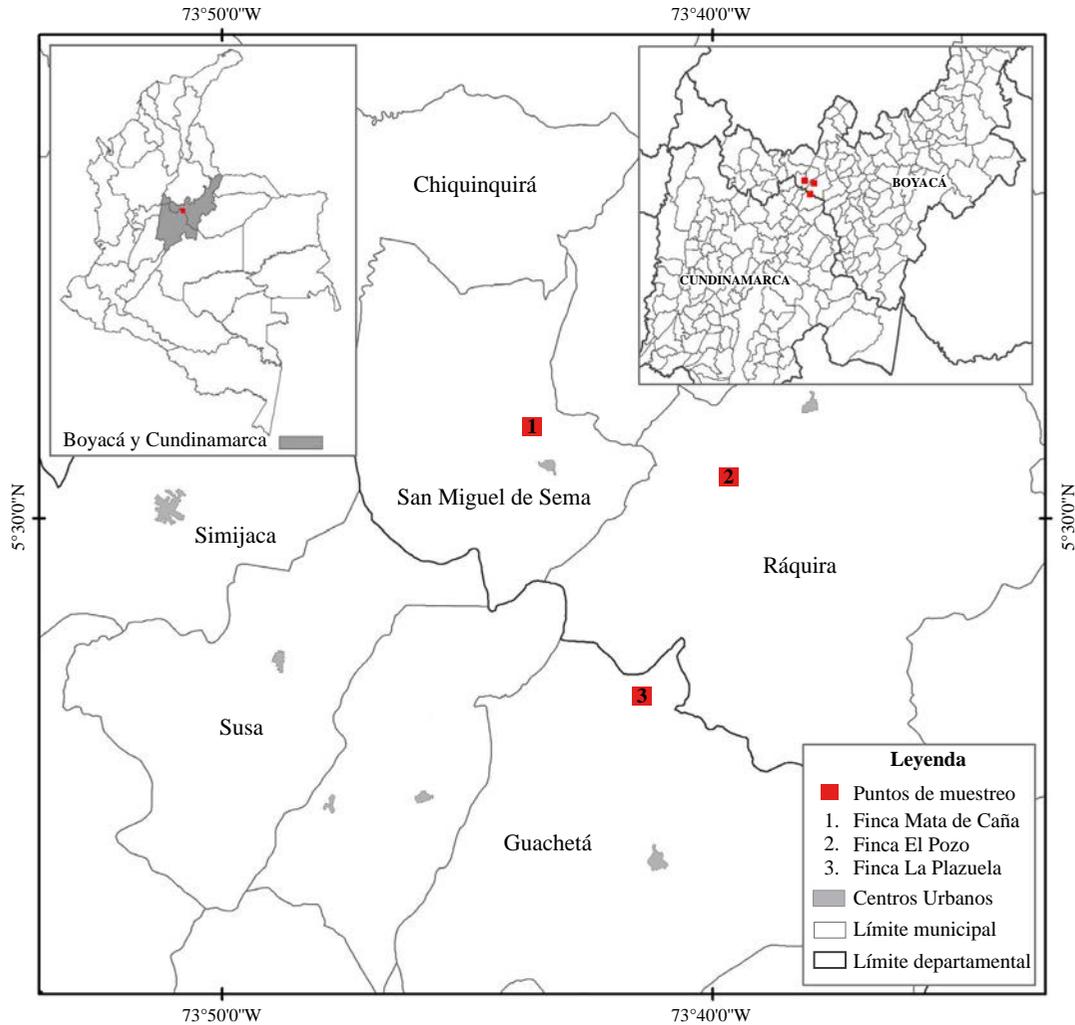
**Fuentes semilleras.** Los frutos se recolectaron en tres huertos silvestres de *V. meridionale* en los días 14, 23 y 28 de junio de 2016. Las semillas provenían de la finca El Pozo, municipio de Ráquira, Boyacá (5° 30' 49,9" - 73° 39' 39,8" O; 2.559 m de altitud), código de acceso en el Banco de Semillas del Jardín Botánico de Bogotá BSJBB-138; de la finca La Plazuela, municipio de Guachetá, Cundinamarca (5° 26' 24,4" N - 73° 41' 26,0" O; 2.874 m de altitud), código de acceso BSJBB-139, y de la finca Mata de Caña, municipio de San Miguel de Sema, Boyacá (5° 31' 52,3" N - 73° 43' 40,4" O; 2.753 m de altitud), código de acceso BSB-179 (Figura 1). La precipitación (mm), la temperatura (°C) media anual y la radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>) del entorno de las poblaciones de *V. meridionale* en el departamento de Boyacá son de 1.074-1.370 mm, 14,6-15,8 °C, y 18,4-20,9 MJ/m<sup>2</sup>, respectivamente, en tanto que en Cundinamarca son de 1.117-1.237 mm, 13,5-14,1 °C y 16,1-18,8 MJ/m<sup>2</sup> (**Muñoz, et al.**, 2009).

Se tomaron muestras para herbario de cada fuente semillera de *V. meridionale*, y se depositaron en el herbario JBB con los números de colección C. I. Suárez 376, 382 y 389, respectivamente.

**Prueba de viabilidad.** Se evaluó la viabilidad de las semillas con la prueba de tetrazolio (TZ). Para ello, se hizo un corte en la parte basal de las semillas y se sumergieron en agua destilada durante 24 horas; posteriormente, se les agregó tetrazolio al 1 % y se dejaron en un horno Binder ED 53-UL (Alemania) a una temperatura de 40 °C en condiciones de oscuridad durante 24 horas. La prueba se hizo en cada fuente semillera y se utilizaron tres réplicas de 50 semillas; durante la evaluación se registró el número de semillas viables, inviables y vacías.

Los resultados de la prueba de viabilidad con TZ se compararon con los resultados de la prueba de germinación con un contenido de humedad inicial (CHi) para determinar la diferencia en la viabilidad de las semillas en cuanto a la germinación.

**Tolerancia a la desecación.** En esta prueba se utilizó la fuente semillera que presentó la mayor viabilidad en la prueba de tetrazolio. Se determinó el contenido de humedad (CH) utilizando el analizador de humedad OHAUS® MB45 (Parsippany, Nueva Jersey) con 2 ± 0,5 g de semillas. Se evaluó la germinación de las semillas con el CH inicial (CHi), y después de desecar la semilla al 5 ± 1% de CH. La reducción del contenido de humedad se hizo en una cámara de secado con gel de sílice en una proporción de 2 a 1 (gel de sílice: semillas) con base en la fórmula  $PFS = PIS * [(100 - CHi) / (100 CHo)]$ , donde PFS corresponde al



**Figura 1.** Ubicación de las fuentes semilleras en los municipios de Boyacá y Cundinamarca, Colombia

peso final de las semillas, PIS al peso inicial de las semillas, CHi al contenido de humedad inicial y CHo al contenido de humedad objeto o reducido (Rao, *et al.*, 2007).

En las pruebas de germinación se utilizaron tres réplicas de 50 semillas para cada experimento. Las semillas fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1 % (Muñoz & Ackerman, 2011), sembradas en cajas de Petri con doble papel de filtro y colocadas bajo condiciones controladas en una cámara de germinación Thermoline (New South Wales, Australia) y fotoperíodo de 12 horas, temperatura de  $20/10 \pm 2,5$  °C y humedad de  $75 \pm 5\%$  (Pérez, *et al.*, 2014); se monitorizaron con un Data Logger EBCHQ 94150. Los experimentos de germinación se revisaron cada tercer día durante 30 días, con el fin de determinar el número de semillas en latencia (Baskin & Baskin, 2013); la germinación se definió como la emergencia de la radícula a través de la testa (Salisbury & Ross, 1992).

**Beneficio.** En los ensayos de propagación sexual se evaluaron dos tipos de beneficio: inmediato (bsf) y fermentado (bf). En el primero se extrajeron las semillas a partir

de frutos maduros y en el segundo los frutos se dejaron fermentar durante siete días antes de extraer las semillas. El criterio para evaluar la fermentación fue la reacción de detección de producción de etanol con dicromato de potasio en medio ácido. Tras el beneficio, las semillas se conservaron en un refrigerador a 4 °C durante 30 días hasta su uso.

**Ensayos de propagación sexual en invernadero.** Se utilizó un diseño experimental con tres factores: fuentes semilleras (JBB138, JBB139, JBB179), beneficio (fermentado, sin fermentar) y tratamientos pregerminativos. Se evaluaron cinco tratamientos para romper la dormancia fisiológica: 500 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> de giberelinas (GA<sub>3</sub>) y 500 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> de Nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>) siguiendo lo propuesto por Magnitskiy & Ligarreto (2007), agua de coco 100%, *Aloe vera* 50% como alternativa de fácil consecución para inducir la germinación y un tratamiento control “inmersión en agua”, en cada tratamiento se realizaron tres réplicas. Para los ensayos se tomaron 50 semillas por unidad experimental; las semillas se sumergieron en los diferentes tratamientos pregerminativos durante 24 horas, y después se sembraron

en bandejas de 30×50 cm subdivididas en 10 contenedores de 15×10 cm, en cada uno de los cuales se sembró una réplica del ensayo. El sustrato empleado contenía cuatro partes de tierra, cuatro partes de turba y dos partes de cascarilla; el invernadero tenía una temperatura promedio de 17 °C y una humedad relativa promedio de 74 %. Los ensayos se monitorizaron cada tercer día registrando la germinación, para la cual se tuvo en cuenta la emergencia de los cotiledones.

**Análisis de datos.** Se probó el supuesto de normalidad de cada conjunto de datos mediante el test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianza con el test de Levene, con un nivel de confianza del 95 %. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba a posteriori de Tukey con un nivel de confianza del 95% para evaluar si existían diferencias en: la germinación en laboratorio y la viabilidad por tetrazolio; la germinación a dos contenidos de humedad y el porcentaje de germinación, el tiempo medio de germinación respecto a las fuentes semilleras, los beneficios y los tratamientos pregerminativos.

Se calculó el porcentaje de germinación (PG) y el tiempo medio de germinación (TMG) de cada ensayo con base en las siguientes fórmulas (Ranal & Santana, 2006; Tomsett & Pritchard, 1998):

$$PG = \left( \frac{N}{Ns} \right) * 100 \quad MGT = \frac{\sum_{t=1}^k ni \cdot ti}{\sum_{t=1}^k ni},$$

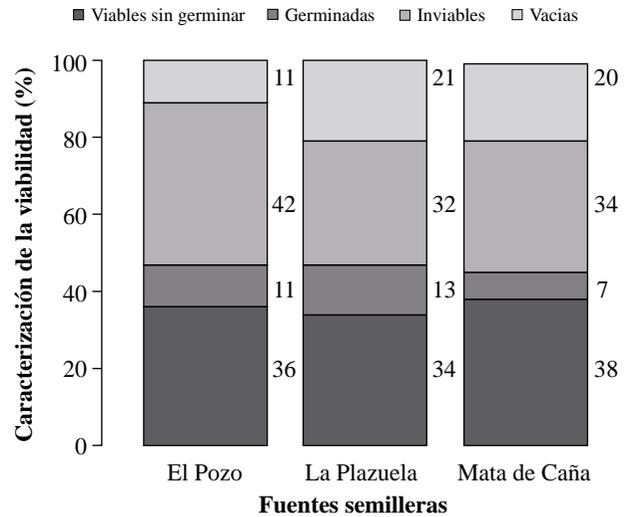
donde  $N$  es el número de semillas germinadas,  $Ns$  es el número de semillas totales,  $ni$  es el número de semillas germinadas en la  $i$ ésima toma de datos,  $ti$  es el tiempo (en días) de la  $i$ ésima toma de datos y  $k$  es el tiempo (en días) de duración de la prueba de germinación.

En la generación de gráficos y el análisis estadístico se empleó el programa RWizard, versión 2,3 (Guisande, 2014), los gráficos se realizaron con el paquete PlotsR (Guisande, 2016); para el ANOVA, el test de Shapiro-Wilk y el de Levene se empleó el paquete StatR (Guisande, et al., 2016).

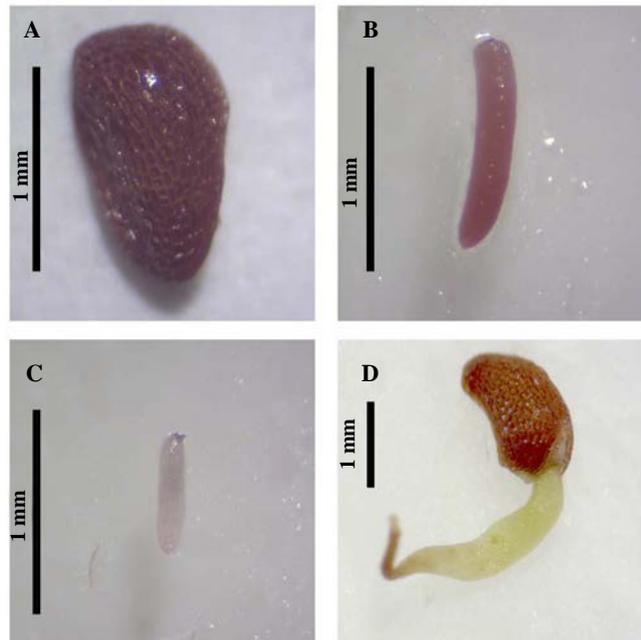
## Resultados

**Prueba de viabilidad.** La categorización de la viabilidad de las semillas de las tres fuentes semilleras arrojó valores similares, con un promedio de 46 %, distribuido en semillas germinadas, 10 %, y semillas viables no germinadas o latentes, 36 % (Figura 2). Se registró un 36 % de semillas inviables y un 17 % de semillas vacías (Figura 3). La viabilidad evaluada con la prueba de tetrazolio (TZ) presentó valores mayores a los obtenidos con la prueba de germinación en cámara con CHI. En la finca El Pozo la viabilidad evaluada mediante TZ fue de 46,6 % en tanto que el PG fue de 10,7 % ( $F_{1,4}=52,94$ ,  $p=0,001$ ); en la finca La Plazuela la viabilidad fue de 46,6 % y el PG de 12,7 % ( $F_{1,4}=41,92$ ,  $p=0,002$ ), y en la finca Mata De Caña la viabilidad fue de 45,7 % y el PG de 7,3 % ( $F_{1,4}=17,28$ ,  $p=0,014$ ).

**Tolerancia a la desecación.** El CHI de las semillas de la finca La Plazuela fue de 9,78 %. No se encontraron diferencias entre la germinación de las semillas con CHI y con CHO



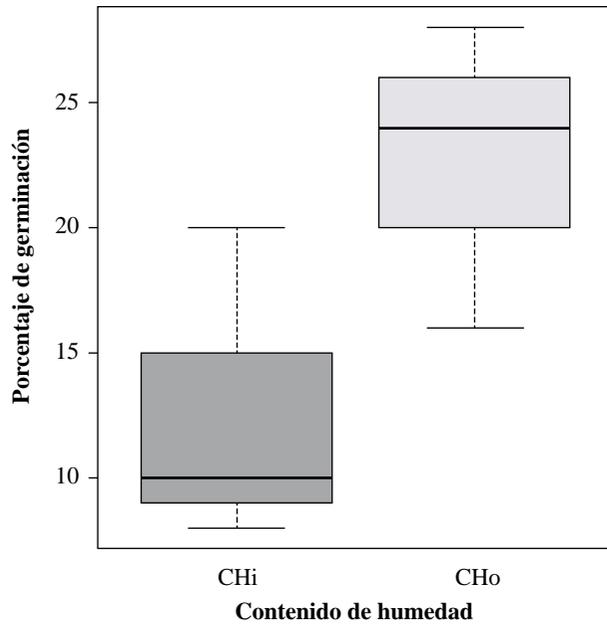
**Figura 2.** Categorización de la viabilidad de las semillas de *V. meridionale* en tres fuentes semilleras



**Figura 3.** Pruebas de viabilidad en semillas de *V. meridionale*. A. Semilla. B. Embrión viable. C. Embrión inviable. D. Semilla germinada

( $5 \pm 1$  %) ( $F_{1,4}=3,81$ ,  $p=0,12$ ), incluso se presentó una mayor germinación con un menor contenido de humedad (Figura 4), lo que confirma el carácter ortodoxo de la especie.

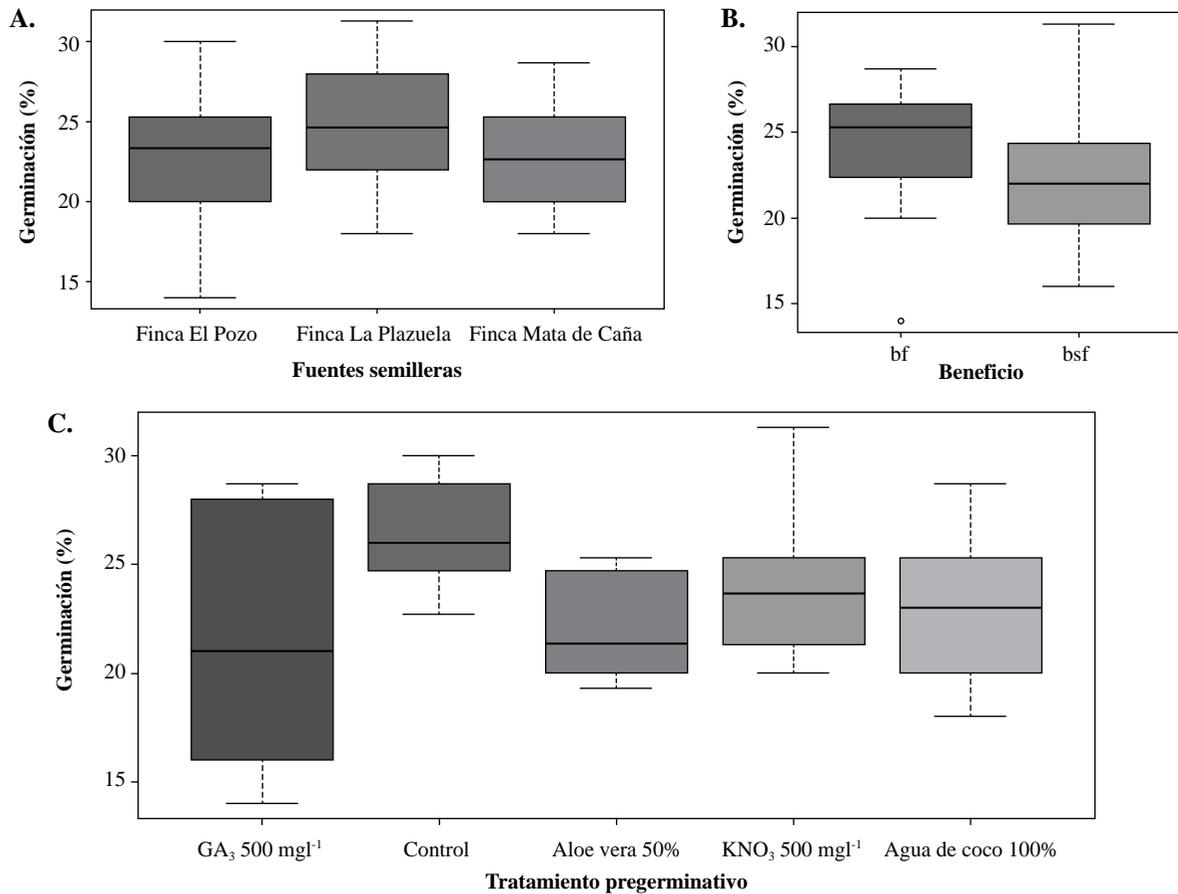
**Ensayos de propagación sexual en invernadero.** No se registraron diferencias significativas entre el PG de las fuentes semilleras ( $F_{1,27}=0,83$ ,  $p=0,44$ ), el beneficio ( $F_{1,28}=0,91$ ,  $p=0,34$ ) y los tratamientos pregerminativos utilizados ( $F_{1,25}=1,37$ ,  $p=0,27$ ). El PG presentó comportamientos particulares en las tres fuentes semilleras: la de la finca El Pozo presentó la mayor distribución de PG y el tratamiento



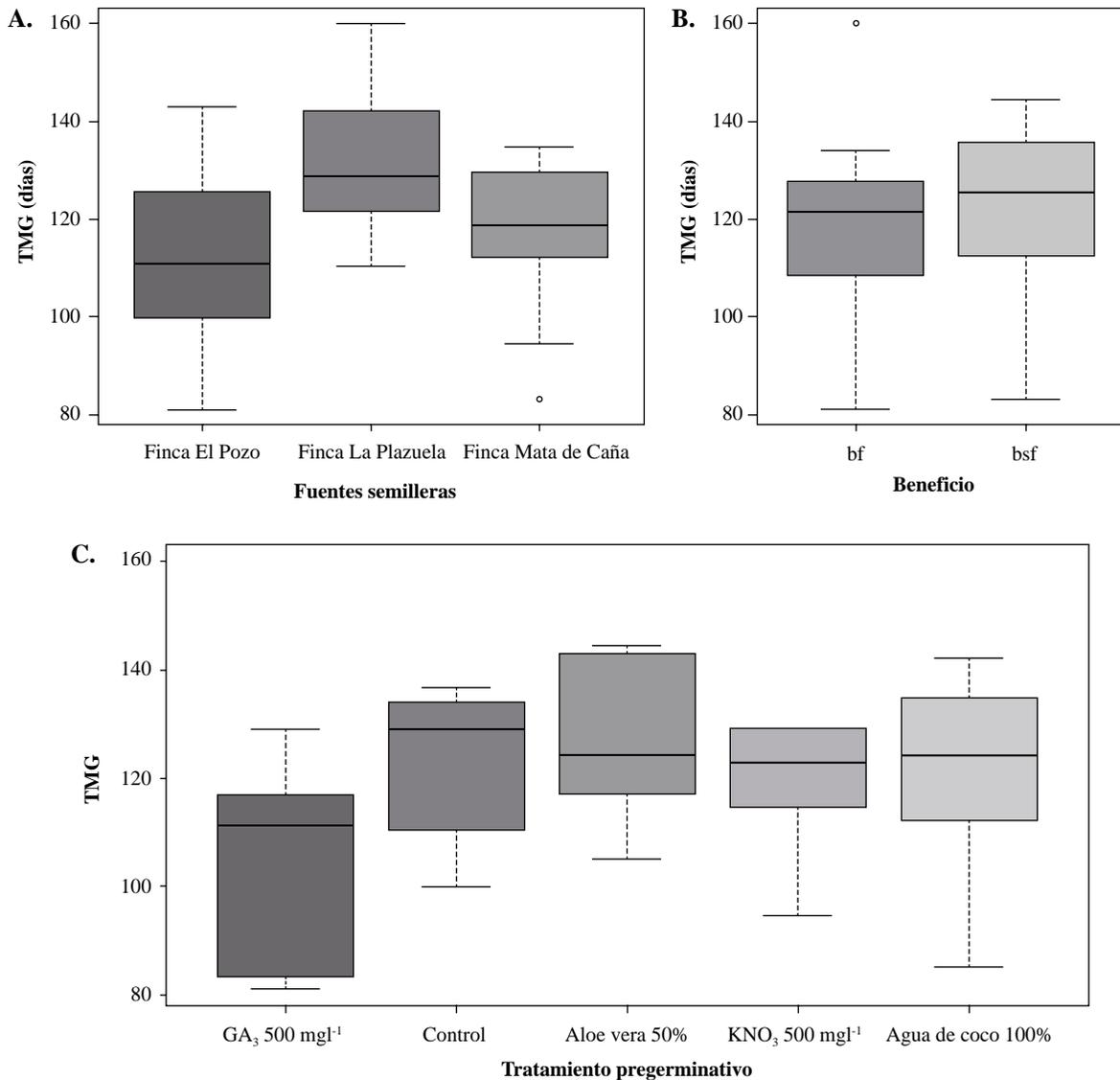
**Figura 4.** Porcentaje de germinación de las semillas de *Vaccinium meridionale* a dos contenidos de humedad: contenido de humedad inicial (9,78% Chi) y contenido de humedad objeto (5 ± 1% Cho).

(bf, GA<sub>3</sub> 500 mg l<sup>-1</sup>) tuvo el PG más bajo (14 %); la finca La Plazuela presentó el tratamiento (bsf, KNO<sub>3</sub>, 500 mg l<sup>-1</sup>) con el PG más alto (31,3 %), la finca Mata de Caña tuvo la menor dispersión de los PG (Figura 5A, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/downloadSuppFile/614/2771>). No se observaron efectos del tipo de beneficio en el PG; la mediana presentó datos similares en los diferentes beneficios y su rango osciló entre 21,3 y 25,33 % (Figura 5B, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/downloadSuppFile/614/2771>). Con respecto a los tratamientos pregerminativos se observó que el GA<sub>3</sub> no tuvo un efecto significativo en la germinación como lo indicó la amplia distribución de los datos. Los tratamientos con KNO<sub>3</sub> presentaron los mayores PG, en tanto que los ensayos de control presentaron mayor PG que aquellos en los que se agregó GA<sub>3</sub>, *Aloe vera* y agua de coco (Figura 5C, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/downloadSuppFile/614/2771>).

El TMG no presentó diferencias significativas en las fuentes semilleras ( $F_{1,27}=2,9$ ,  $p=0,07$ ). La finca El Pozo presentó los menores TMG teniendo en cuenta la mediana, seguida por las fincas Mata de Caña y La Plazuela (Figura 6A, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/>



**Figura 5.** Porcentaje de germinación (PG) con cada tratamiento de las fuentes semilleras, el beneficio y los tratamientos pregerminativos. **A.** Comportamiento del PG en cuanto a las fuentes semilleras. **B.** Comportamiento del PG en cuanto a los beneficios: fermentado (bf) y sin fermentar (bsf). **C.** Comportamiento del PG en cuanto a los tratamientos pregerminativos.



**Figura 6.** Tiempo medio de germinación (TMG) de las fuentes semilleras, los tratamientos pregerminativos y el beneficio. **A.** Comportamiento del TMG en cuanto a las fuentes semilleras. **B.** Comportamiento del TMG en cuanto a los beneficios: fermentado (bf) y sin fermentar (bsf). **C.** Comportamiento del TMG en cuanto a los tratamientos pregerminativos.

article/downloadSuppFile/614/2771). No se observó influencia del tipo de beneficio en el TMG ( $F_{1,28}=0,36$ ,  $p=0,55$ ) (Figura 6B, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/614/2771>) ni en los tratamientos pregerminativos evaluados ( $F_{1,25}=1,23$ ,  $p=0,32$ ), ya que tanto la mediana como la distribución de la mayoría de los datos presentó valores similares (Figura 6C, Anexo 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/614/2771>).

## Discusión

Las diferentes fuentes semilleras presentaron latencia en 36 % de las semillas, valor que, según **Baskin & Baskin** (2013), es equivalente al número de semillas viables sin germinar tras 30 días de evaluación. Esta latencia no uniforme de las semillas le confiere a las especies la capacidad de distribuir

la geminación en el tiempo y adaptarse a las condiciones variables del ambiente, favoreciendo la supervivencia y el establecimiento de nuevas poblaciones (**Snyder**, 2006).

El valor de la latencia, sumado al alto número de semillas vacías e inviables, refleja los bajos valores de germinación obtenidos en el laboratorio, lo cual indica que para aumentar el número de semillas germinadas es necesario aumentar el tiempo de evaluación de los experimentos, así como probar diferentes tratamientos pregerminativos que permitan romper la latencia (**Baskin & Baskin**, 2004). Además, estos resultados también pueden explicar por qué la viabilidad de las semillas de las fuentes semilleras evaluadas fue más baja que lo reportado para la especie por otros autores (**Hernández, et al.**, 2009; **Magnitskiy & Ligarreto**, 2007; **Valencia & Ramírez**, 1993)

Los resultados de tolerancia a la desecación confirman que las semillas de *V. meridionale* presentan un comportamiento ortodoxo (Figura 4), lo cual concuerda con lo encontrado por diferentes autores para las especies y el género (Gutiérrez & Camacho, 2011; Hernández, *et al.*, 2009; International Board for Plant Genetic Resources - IBPGR, 1985). El comportamiento ortodoxo le confiere a la semilla la capacidad de tolerar la deshidratación hasta el 5 % del contenido de humedad (Magnitskiy & Plaza, 2007; Rao, *et al.*, 2007), una característica que permite que la longevidad de las semillas aumente al disminuir el contenido de humedad (Nkang, *et al.*, 2003) y les confiere un alto potencial de ser almacenadas y conservadas *ex situ* en los bancos de germoplasma a bajas temperaturas y bajos contenidos de humedad (Gold, *et al.*, 2004; Hong & Ellis, 1995).

No se observó influencia de las fuentes semilleras, los beneficios y los tratamientos pregerminativos en el PG y el TMG; la propagación sexual de la especie puede verse afectada por diferentes factores, como el tamaño de las semillas, que las hace más frágiles y susceptibles al daño, la latencia, la fluctuación de la humedad, la temperatura y la luz (Castro, *et al.*, 2012; García & Ligarreto, 2014; Hernández, *et al.*, 2009; Valencia & Ramírez, 1993). Diversos autores resaltan un efecto positivo del GA<sub>3</sub> y el KNO<sub>3</sub> en la germinación de las semillas de *V. meridionale* en cámara de germinación (Hernández, *et al.*, 2009; Magnitskiy & Ligarreto, 2007). Dicho efecto promotor no se evidenció en los ensayos realizados, probablemente debido al sustrato utilizado, el cual es poroso y facilitó el hundimiento de las semillas impidiendo, en alguna medida, la incidencia de la luz, la cual es un factor relevante en la germinación de *V. meridionale*, pues las semillas son fotoblásticas positivas (Hernández, *et al.*, 2009).

Las especies de la familia Ericácea presentan un sistema radical formado por finas raicillas con un desarrollo superficial caracterizado por la ausencia de pelos absorbentes, lo que las hace susceptibles al déficit hídrico y explica las asociaciones simbióticas obligadas con micorrizas del tipo ericoide, asociación que es vital para el crecimiento de las plantas en suelos altamente orgánicos y pobres de nutrientes, favoreciendo la asimilación del fósforo y el nitrógeno en forma de nitrato y amonio, así como de aminoácidos libres (Bautista, *et al.*, 2017; Camarena-Gutiérrez, 2012; Lancho, 2012; Pérez, 2012). Así pues, el sustrato juega un papel importante, ya que debe tener la capacidad de retener el agua y poseer materia orgánica que mantenga la acidez requerida por la especie y permita la asociación simbiótica (Gutiérrez & Camacho, 2011). Para la propagación de *V. meridionale*, Valencia & Ramírez (1993) recomiendan usar suelo proveniente del medio natural donde crece la especie por la presencia de micorrizas que favorecen su establecimiento.

Otro factor a tener en cuenta es el tiempo de almacenamiento de las semillas hasta el uso, pues los principales factores que influyen en la calidad y supervivencia de las

semillas son la temperatura y el contenido de humedad (Roberts, 1972). Hernández, *et al.* (2009) y Valencia & Ramírez (1993) registraron porcentajes de germinación en laboratorio de 98 % (1.000 mg l<sup>-1</sup> de GA<sub>3</sub>) y 62 % (agua), respectivamente; las semillas utilizadas en estas investigaciones fueron evaluadas después de la cosecha, en tanto que en el estudio de Magnitskiy & Ligarreto (2007) y en el presente trabajo las semillas se conservaron durante 30 días a 5 °C hasta el montaje de los ensayos, en los cuales se obtuvieron porcentajes de germinación menores de 38 % (500 mg l<sup>-1</sup> de KNO<sub>3</sub>) y 31,3 % (500 mg l<sup>-1</sup> de KNO<sub>3</sub>), respectivamente. Es relevante mencionar que no se puede concluir si las condiciones de germinación fueron las adecuadas, pues estas no se han establecido para la especie (Magnitskiy & Ligarreto, 2007).

No se observaron diferencias en el PG entre los beneficios utilizados, lo cual indica que en el presente estudio la fermentación de los frutos no influyó en el poder germinativo de las semillas de *V. meridionale* (Figura 5B). Esto contrasta con lo sugerido por Magnitskiy & Ligarreto (2009) cuando señalan que la fermentación de los frutos está asociada con la disminución del poder germinativo.

## Conclusiones

Dado el carácter ortodoxo de las semillas, estas son aptas para conservarse *ex situ*, por lo cual se almacenaron en el Banco de Semillas del Jardín Botánico de Bogotá, donde periódicamente se verificará su viabilidad, con el fin de determinar la longevidad y el tiempo máximo de almacenamiento.

No se registraron diferencias significativas en el porcentaje de germinación en cuanto a las fuentes semilleras evaluadas, los beneficios y los tratamientos pregerminativos utilizados, y estos no influyeron en el inicio de la germinación de las semillas de *V. meridionale*. La fermentación de las semillas tampoco influyó en su germinación.

## Agradecimientos

A la Subdirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, a Colciencias y al proyecto “Biodiversidad Andina al Plato de Todos” por la financiación de la investigación. Al equipo profesional y de apoyo de la línea de investigación en especies y propagación. A Sandra Castañeda y Mónica Álvarez por los valiosos aportes al documento. Queremos agradecer especialmente a Elizabeth Aguilera, Julio Casas, Nidia Castellanos y Parmenio Buitrago por su apoyo en la consecución del material vegetal para el desarrollo de este trabajo.

---

## Información suplementaria

---

**Anexo 1.** Porcentajes de germinación y tiempo medio de germinación de *Vaccinium meridionale* en tres fuentes semilleras localizadas en los municipios de Ráquira, San Miguel de Sema (Boyacá) y Gachetá (Cundinamarca). Vea el anexo 1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/614/2771>

---

## Contribución de los autores

Todos los autores participaron en los diferentes aspectos del documento.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Referencias

- Baskin, C. & Baskin, J.** (2013). Seeds Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. Journal of Chemical Information and Modeling (Second Ed). Lexington, Kentucky, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Baskin, J. & Baskin, C.** (2004). A classification system for seed dormancy. Seed Science Research. **14** (1), 1-16. <https://doi.org/10.1079/SSR2003150>
- Bautista, J., Posadas, L., Urbina, J., Larsen, J., Segura, S.** (2017). Colonización por micorrizas en la producción de plántulas en vivero de arándano (*Vaccinium* spp.) cv Biloxi. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. **8** (3): 695-703.
- Camarena-Gutiérrez, G.** (2012). Interacción planta-hongos micorrizicos arbusculares. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente. **18** (3): 409-421. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.093>
- Castro, C., Olarte, Y., Rache, L., Pacheco, J.** (2012). Development of a germination protocol for blueberry seeds (*Vaccinium meridionale* Swartz). Agronomía Colombiana. **30** (2): 196-203.
- García, C., & Ligarreto, G.** (2014). Effect of fruit size on the growth and development of Andean blueberry (*Vaccinium meridionale* Swartz) seedlings from four locations in the Colombian Andes. Agronomía Colombiana. **32** (1): 14-21. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n1.38714>
- Gaviria, C., Ochoa, C., Sánchez, N., Medina, C., Lobo, M., Galeano, P., Mosquera, A., Tamayo, A., Lopera, Y., Rojano, B.** (2009). Propiedades antioxidantes de los frutos de agraz o mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz). En G. Ligarreto (Ed.), Perspectivas del cultivo de agraz o mortiño en la zona altoandina de Colombia (p. 93-109). Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Gold, K., León-Lobos, P., Way, M.** (2004). Manual de recolección de semillas de especies de plantas Silvestres para la conservación a largo plazo y restauración ecológica. La Serena, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación INTIHUASI.
- Guisande, C.** (2014). RWizard Software, Version 2.3. Vigo: University of Vigo. Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.ipez.es/Rwizard/>
- Guisande, C.** (2016). PlotsR: Plots with R. R Package Version 1.6. Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.ipez.es/Rwizard/>
- Guisande, C., Vaamonde, L., Barreiro, A.** (2016). StatR: Estadística con R. R Package Version 1.3. Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.ipez.es/Rwizard/>
- Gutiérrez, V., & Camacho, D.** (2011). Evaluación de las estrategias de propagación de la especie *Vaccinium floribundum* (familia Ericaceae) presente en el paramo cruz verde. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.
- Hernández, M., Lobo, M., Medina, C., Cartagena, J., Delgado, O.** (2009). Comportamiento de la germinación y categorización de la latencia en semillas de mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz). Agronomía Colombiana. **27** (1): 15-23.
- Hong, T. D. & Ellis, R. H.** (1995). A protocol to determine seed storage behaviour. IPGRI Technical Bulletin. Roma.
- International Board for Plant Genetic Resources - IBPGR.** (1985). ERICACEAE. En Handbook of seed technology for genebanks, Compendium of specific germination information and test recommendations (p. 178-183). Roma: International board for plant genetic resources.
- Lancheros, H.** (2012). Caracterización de las micorrizas nativas en agraz *Vaccinium meridionale* Swartz y evaluación de su efecto sobre el crecimiento plantular. Bogotá, Colombia; Universidad Nacional de Colombia.
- Ligarreto, G.** (2009). Descripción del género *Vaccinium*, estudio de caso: agraz o mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz). In G. A. Ligarreto (Ed.), Perspectivas de cultivo de agraz o mortiño: *vaccinium meridionale* Swartz en la zona altoandina de Colombia (p. 13-27). Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Lobo, M.** (2006). Recursos genéticos y mejoramiento de frutales andinos: una visión conceptual. Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria Agropecuaria. **7** (2): 40-54.
- Luteyn, J.** (2002). Diversity, Adaptation, and Endemism in Neotropical Ericaceae: Biogeographical Patterns in the Vaccinieae. Botanical Review. **68** (1): 55-87.
- Magnitskiy, S. & Ligarreto, G.** (2007). El efecto del nitrato de potasio, del ácido giberélico y del ácido indolacético sobre la germinación de semillas de agraz (*Vaccinium meridionale* Swartz). Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas. **1** (2): 137-141. [http://virtual.upte.edu.co/revistas2013f/index.php/ciencias\\_hortícolas/article/view/1155](http://virtual.upte.edu.co/revistas2013f/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1155)
- Magnitskiy, S. & Ligarreto, G.** (2009). Plantas de agraz o mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz): potencial de propagación sexual. In G. A. Ligarreto (Ed.), Perspectivas de cultivo de agraz o mortiño: *Vaccinium meridionale* Swartz en la zona altoandina de Colombia (p. 75-88). Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Magnitskiy, S. & Plaza, G.** (2007). Fisiología de semillas recalcitrantes de árboles. Agronomía Colombiana. **25** (1): 96-103.
- Muñoz, J., Martínez, L., Ligarreto, G.** (2009). Caracterización de los ambientes agroecológicos del agraz o mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz), en la zona altoandina de Colombia. En G. A. Ligarreto (Ed.), Perspectivas de cultivo de agraz o mortiño: *Vaccinium meridionale* Swartz en la zona altoandina de Colombia (Universidad, p. 29-55). Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Muñoz, M. C. & Ackerman, J. D.** (2011). Spatial distribution and performance of native and invasive *Ardisia* (Myrsinaceae) species in Puerto Rico: The anatomy of an invasion. Biological Invasions. **13** (7): 1543-1558. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9912-7>
- Nkang, A., Omokaro, D., Egbe, A., Amanke, G.** (2003). Variations in fatty acid proportions during desiccation of *Telfairia occidentalis* seeds harvested at physiological and agronomic maturity. African Journal of Biotechnology. **2**: 33-39.
- Pérez, J.** (2012). Estudio del transporte y metabolismo del nitrógeno en micorrizas arbusculares. Granada, España: Universidad de Granada.

- Pérez, L. V., Rodríguez, N. A., Melgarejo, L. M., Vargas, O.** (2014). Propagación por semilla de 13 especies de páramo. En O. Vargas R & L. V. Pérez-Martínez (Eds.), Semillas de plantas de páramo: ecología y métodos de germinación aplicados a la restauración ecológica (p. 116-174). Bogotá, D.C Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ranal, M. A., & Santana, D.** (2006). How and why to measure the germination process. *Revista Brasileira de Botânica*. **29** (1): 1-11. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100002>
- Rao, N. K., Hanson, J., Dulloo, M. E., Ghosh, K., Nowell, D., Larinde, M.** (2007). Manual para el manejo de semillas en bancos de germoplasma. Manuales para Bancos de Germoplasma No. 8. Roma: Biodiversity International.
- Roberts, E.** (1972). Storage environment and the control of viability. In E. Roberts (Ed.), *Viability of Seeds* (Chapman AN, p. 14-58). London.
- Salisbury, F. B. & Ross, C. W.** (1992). *Plant physiology*. Belmont: Wadsworth Pub. Co.
- Smith, W., Montoya, I., Ligarreto, G. A.** (2009). Aspectos sociales y económicos de la producción de agraz o mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz). En G. Ligarreto (Ed.), *Perspectivas de cultivo de agraz o mortiño: Vaccinium meridionale Swartz en la zona altoandina de Colombia* (pp. 113-134). Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Snyder, R. E.** (2006). Multiple risk reduction mechanisms: Can dormancy substitute for dispersal?. *Ecology Letters*. **9**: 1106-1114. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00962.x>
- Tompsett, P. B. & Pritchard, H. W.** (1998). The Effect of Chilling and Moisture Status on the Germination, Desiccation Tolerance and Longevity of *Aesculus hippocastanum* L. Seed. *Annals of Botany*. **82** (2): 249-261. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0676>
- Valencia, M. & Ramírez, F.** (1993). Notas sobre la morfología, anatomía y germinación del agraz (*Vaccinium meridionale* Swartz.). *Agronomía Colombiana*. **10** (2): 151-159.
- Wyse, S. V. & Dickie, J. B.** (2017). Predicting the global incidence of seed desiccation sensitivity. *Journal of Ecology*. **105** (4): 1082-1093. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12725>

# Efecto de la cobertura vegetal de ribera en las comunidades ícticas en el bosque húmedo premontano y muy húmedo premontano del Alto Magdalena, Colombia

José Luis Poveda Cuellar<sup>1,\*</sup>, Edwin Orlando López-Delgado<sup>1,2</sup>, Francisco A. Villa-Navarro<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

<sup>2</sup> Estudiante Ph.D. Wildlife and Fisheries Science, Texas A&M University, Winemiller Aquatic Lab, Texas, Estados Unidos

<sup>3</sup> Laboratorio de Socioecosistemas, Departamento de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, España

## Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar la influencia de la cobertura vegetal en la composición, la estructura y la diversidad de la ictiofauna en las quebradas de las zonas de vida de los bosques húmedo premontano (bh-PM) y muy húmedo premontano (bmh-PM) del Alto Magdalena, Colombia. Para esto, se muestrearon 23 estaciones distribuidas en las coberturas vegetales de pastos, mosaico de cultivos, arbustos y bosques en las diferentes zonas de vida. En cada estación se establecieron transectos longitudinales (100 m/ancho variable); los peces se capturaron con un equipo de pesca eléctrica y una red de arrastre (5 m x 1,5 m, ojo de malla de 0,05 m), y se evaluaron paralelamente algunas variables ambientales. La estructura y la diversidad de la ictiofauna se calcularon mediante el uso de modelos estándar. En cuanto a la diversidad, medida con números de Hill, no hubo diferencias significativas entre las coberturas vegetales en el bh-PM. Sin embargo, en el bmh-PM la cobertura de pastos fue la más diversa. En el análisis de escalamiento multidimensional no métrico, no se evidenciaron diferencias en la estructura del ensamblaje de peces en los tipos de cobertura vegetal, sin embargo, en el análisis canónico de correspondencias se evidenció que la cobertura de dosel, la calidad de la vegetación de ribera y la elevación influyeron de manera significativa en la composición y la distribución de la ictiofauna. Si bien la cobertura de pastos presentó la mayor diversidad íctica, es un hábitat con degradación del bosque de ribera y cambios en la temperatura, idóneo para el establecimiento de especies tolerantes e invasoras. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Números de Hill; Zonas de vida; Comunidades; Cobertura vegetal; Neotrópico.

**Effect of the riparian vegetation cover on fish communities in the humid premontane and very humid premontane forest in the Upper Magdalena, Colombia**

## Abstract

The aim of this study was to determine the influence of the vegetation cover on the composition, structure and diversity of the ichthyofauna in streams of the life zones of humid premontane (bh-PM) and very humid premontane (bmh-PM) forests in the Upper Magdalena, Colombia. To do this, 23 sampling sites were distributed in the vegetal covers of pastures, mosaic of crops, shrubs and forests in the different life zones. At each location, longitudinal transects were established (100 m/variable width), fish were captured with an electro-fishing equipment and a seine net (5 m long x 1.5 height m, mesh eye 0.05 m), and, simultaneously, some environmental variables were measured. The structure and diversity of fish were calculated by using standard models. As regards diversity measured with Hill numbers, there was no significant differences between vegetal cover in the bh-PM. However, in the bmh-PM, the grass cover was the most diverse. In the Non-Metric Multidimensional Scaling Analysis, no differences were found in the structure of the fish assemblage in the types of vegetal cover, however, the Canonical Correspondence Analysis showed that the canopy cover, the quality of the riparian vegetation and the altitude significantly influence the composition and distribution of the ichthyofauna. Although grass coverage presented the greatest fish diversity, this is an ideal habitat for the establishment of tolerant and invasive species due to the degradation of the riparian forest and changes in temperature suitable for the establishment of tolerant and invasive species. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Hill numbers; Life zone; Communities; Vegetal cover; Neotropic.

## \*Correspondencia:

José Luis Poveda Cuellar, [josepovedaut@gmail.com](mailto:josepovedaut@gmail.com), **Recibido:** 12 de febrero de 2018, **Aceptado:** 7 de mayo de 2018, **Editor:** Gabriel Roldán

## Introducción

La vegetación de ribera es aquella que se encuentra en los márgenes de los cuerpos de agua y permite la interacción entre los ecosistemas terrestre y acuático (Granados, 2006). Algunos tipos de cobertura, definidos como bosques, vegetación natural arbustiva, pastos y mosaicos de cultivos, entre otros, generan cambios físicos y químicos debido a su composición vegetal, los cuales tienen un efecto final sobre la distribución, la abundancia y la composición de especies acuáticas y otras asociadas a ellos (Biowest, 2008; Pérez, 2015).

La vegetación de ribera permite la formación de hábitats para el desove, el cuidado parental, la alimentación y la migración (Greer, et al., 2012), factores todos favorables para la colonización de peces. A pesar de su importancia, la vegetación de ribera se encuentra amenazada por la deforestación causada por prácticas agrícolas o modificaciones físicas para el uso intensivo del recurso hídrico (Sweeney, et al., 2004), lo cual afecta negativamente los ensamblajes de peces.

Dichas afectaciones se han examinado principalmente desde una perspectiva taxonómica (Bojsen & Barriga, 2002; Pérez, 2015), ya que en estos análisis se evidencian las interacciones bióticas y abióticas presentes, así como la funcionalidad y la estabilidad de los ecosistemas (Chase, 2003), lo cual permite entender los efectos de las actividades humanas sobre la ictiofauna.

En la región del Alto Magdalena la mayoría de los estudios sobre las comunidades ícticas se ha centrado en los análisis de la diversidad y la ecología trófica y reproductiva (Bríñez, 2005; García-Melo, 2005; Zúñiga-Upegui, 2005; Castro-Roa, et al., 2007; Lozano-Zárate, et al., 2008; Albornoz & Conde, 2014; Pareja-Carmona, et al., 2014; Montoya, 2014; Zúñiga-Upegui, et al., 2014; López-Delgado, 2015), principalmente en la zona de vida del bosque seco tropical (bs-T); se han hecho, asimismo, algunos estudios enfocados en la taxonomía y la sistemática (Villa-Navarro, et al., 2006; Taphorn, et al., 2013; García-Alzate, et al., 2015; García-Melo, 2016; Provenzano & Villa-Navarro, 2017). Sin embargo, el único estudio sobre zonas de ribera, realizado por López-Delgado (2013) en ríos del bs-T, se sugiere que la degradación de los bosques de ribera afectan negativamente la estructura y la composición de los ensamblajes ícticos al disminuir su diversidad y riqueza, y favorecer el establecimiento de especies dominantes.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de las coberturas vegetales en la ictiofauna en quebradas de los bosques húmedo premontano (bh-PM) y muy húmedo premontano (bmh-PM) en los valles interandinos del Alto Magdalena en Colombia. En el estudio se plantea que las coberturas vegetales degradadas, como los pastos y los mosaicos de cultivos, afectan negativamente la composición, la estructura y la diversidad de la ictiofauna y favorecen la presencia de especies oportunistas y resistentes a ambientes hostiles.

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** El término zona de vida hace referencia al tipo de vegetación dominante, estrechamente relacionada con el medio físico que determina su composición y comportamiento (Holdridge, 1996). El presente estudio se desarrolló en los bosques húmedo premontano (bh-PM) y bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del Alto Magdalena, Colombia. Ambas zonas de vida se encuentran en la zona cafetera del departamento del Tolima y se distribuyen entre los 900 y los 2.000 msnm, con una temperatura media anual de 18 a 24 °C. El bh-PM presenta una pluviosidad anual promedio de 1.000 a 2.000 mm y el bmh-PM, de 2.000 a 4.000 mm, y se le considera una prolongación muy húmeda del bh-PM (Espinal, 1977). En el departamento del Tolima estas zonas de vida han sido deforestadas para el establecimiento de cultivos agrícolas y de ganadería.

**Fase de campo.** Los muestreos se realizaron durante el periodo de pocas lluvias (febrero, 2017) en quebradas del municipio de Ibagué, Tolima. La clasificación de los tipos de cobertura vegetal se hizo con la ayuda de imágenes satelitales y el programa ArcGIS, con lo cual se establecieron cuatro tipos de cobertura vegetal: pastos, mosaico de cultivos, bosques y arbustos, en cada zona de vida (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/623/2755>). Además, mediante un diseño aleatorio estratificado se seleccionaron 23 estaciones de muestreo. En el bh-PM se ubicaron ocho estaciones distribuidas en las coberturas vegetales de arbustos (2), mosaico de cultivos (3) y pastos (3) y en el bmh-PM, 16 en las coberturas vegetales de arbustos (1), bosques (4), mosaico de cultivos (5) y pastos (6) (Tabla 1, Figura 1).

Los peces se recolectaron empleando un equipo de pesca eléctrica (SAMUS, modelo 725M) en dirección aguas arriba y en distintos tipos de hábitats (rápidos, remansos) y sustratos (roca, grava, arena, lodo y hojarasca), a lo largo de un transecto longitudinal de 100 m de largo y ancho variable, con un esfuerzo de muestreo de una hora. Además, la pesca eléctrica se complementó con tres bloqueos utilizando una red de arrastre (5 m x 1,5 m con ojo de malla de 0,05 m) en cada uno de los puntos de muestreo.

Una vez capturados, los ejemplares fueron anestesiados con eugenol, y posteriormente se fijaron en una solución de formol al 10 % para su determinación taxonómica empleando diferentes claves y descripciones (Eigenman, 1912, 1922; de Pina, 1992; Buitrago, 1995; Villa-Navarro, et al., 2004; Maldonado-Ocampo, et al., 2005), trabajos de grado (Bríñez, 2004; García-Melo, 2005, 2009; Zúñiga-Upegui, 2005) y distribuciones geográficas (DoNascimento, et al., 2017) en el Laboratorio de Investigación en Zoolo-gía (LABINZO) de la Universidad del Tolima. Es importante mencionar que se determinaron cinco morfotipos de *Astroblepus*: *Astroblepus* sp.1, *Astroblepus* sp.2 (Bríñez, 2004), *Astroblepus* sp.3 (*sensu* A. *chotae*, Bríñez, 2004), *Astroblepus* sp.4 (*sensu* A. *trifasciatus*, Bríñez, 2004) y *Astroblepus* sp.5 (*sensu* A. *unifasciatus*, Bríñez, 2004),

**Tabla 1.** Estaciones de muestreo en el bosque húmedo premontano (bh-PM) y el bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del Alto Magdalena, Colombia. Arb=arbustos; Bpt=bosques; Mc=mosaico de cultivos; Pas=pastos.

Zona de vida	Estación	Sigla	Cobertura vegetal	Elevación (msnm)	Coordenadas		
					N	W	
bh-PM	E1	Chembe	QCHE	Bpt	1300	4° 28' 45.5"	75° 10' 03.8"
bh-PM	E2	Chembe	QCHE	Mc	975	4° 27' 29.3"	75° 08' 46.1"
bh-PM	E3	Chembe	QCHE	Mc	1133	4° 28' 10.8"	75° 09' 26.3"
bh-PM	E4	Potrero grande	QPG	Mc	1150	4° 23' 26.6"	75° 12' 38.0"
bh-PM	E5	Cocare	QCC	Arb	1035	4° 28' 25.9"	75° 08' 13.3"
bh-PM	E6	Cocare	QCC	Arb	1241	4° 29' 29.1"	75° 08' 26.6"
bh-PM	E7	Potrero grande	QPG	Pas	1003	4° 23' 08.6"	75° 11' 58.9"
bh-PM	E8	Chumba	QCHU	Pas	975	4° 48' 55.9"	75° 05' 36.9"
bh-PM	E9	Chumba	QCHU	Pas	1125	4° 29' 06.2"	75° 05' 48.6"
bmh-PM	E10	Los Caballos	QLC	Bpt	1434	4° 22' 57.3"	75° 19' 56.6"
bmh-PM	E11	San Rafael	QSR	Bpt	1394	4° 22' 49.4"	75° 19' 48.8"
bmh-PM	E12	Gonzales	QGO	Bpt	1680	4° 31' 11.2"	75° 18' 41.1"
bmh-PM	E13	Potrero grande	QPG	Mc	1431	4° 23' 32.6"	75° 12' 44.0"
bmh-PM	E14	Ambalá	QAM	Mc	1502	4° 28' 48.5"	75° 12' 38.6"
bmh-PM	E15	Río La China	RLC	Mc	1590	4° 32' 30.4"	75° 07' 50.3"
bmh-PM	E16	Río La China	RLC	Mc	1750	4° 32' 36.4"	75° 07' 56.3"
bmh-PM	E17	Aguacates	QAG	Mc	1765	4° 32' 05.6"	75° 09' 38.3"
bmh-PM	E18	Montebonito	QMB	Arb	1677	4° 22' 39.0"	75° 21' 20.4"
bmh-PM	E19	Cay	QCY	Pas	1445	4° 28' 01.0"	75° 15' 27.9"
bmh-PM	E20	El Gallo	QGL	Pas	1445	4° 27' 19.6"	75° 16' 11.2"
bmh-PM	E21	Cay	QCY	Pas	1592	4° 28' 53.5"	75° 14' 59.5"
bmh-PM	E22	El Gallo	QGL	Pas	1645	4° 26' 32.1"	75° 16' 54.1"
bmh-PM	E23	El Cajón	QCJ	Pas	1743	4° 31' 01.0"	75° 17' 20.4"

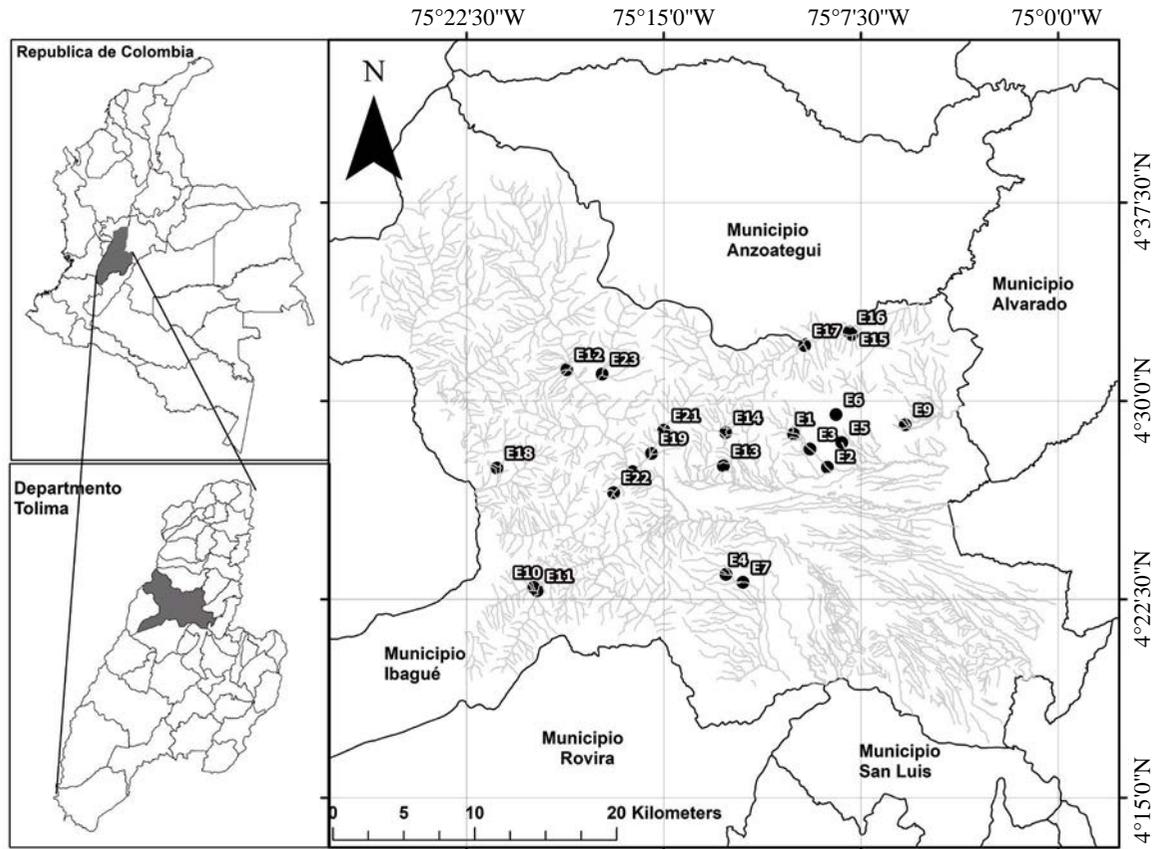
según DoNascimento, *et al.* (2017), ya que la distribución de *A. chotae*, *A. trifasciatus* y *A. unifasciatus* se restringe a las cuencas del Pacífico colombiano. Una vez determinados y contados, los ejemplares fueron incorporados a la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima, en la sección de ictiología (CZUT-IC).

Simultáneamente, se registraron *in situ* algunas variables ambientales, tales como la temperatura del agua (°C), la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH (unidades de pH) y los sólidos totales (ppm) empleando un equipo multiparámetro (SCHOTT® handylab multi12/Set), en tanto que la velocidad del agua (m/s) se midió con un flujómetro (General Oceanics© - modelo 2030R y 2030R6), así como la profundidad (m) y el ancho (m) del cauce. Como variables asociadas a la zona de ribera se calculó el índice de calidad del bosque de ribera (QBR) con la metodología propuesta por López-Delgado, *et al.* (2015) y, por último, la cobertura del dosel se estimó utilizando un densiómetro cóncavo (Modelo C, Forestry Suppliers Inc.), siguiendo la metodología de Braun-Blaquet (1979).

#### Análisis de datos

**Estructura y composición.** La abundancia relativa (AR%) se determinó a partir del número de individuos de cada especie recolectados y su relación con el número total de individuos de la muestra. Con el fin de determinar diferencias significativas entre las abundancias de los distintos tipos de cobertura vegetal por zona de vida, se hizo un análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ), usando la función `kruskal.test` en el paquete `vegan` del programa R (R Development Core Team, 2017).

La diversidad de la fauna íctica se evaluó utilizando el número efectivo de especies o números de Hill (Hill, 1973; Jost, 2006) mediante la función `diversity` del paquete `vegan` del programa R (R Development Core Team, 2017). La diversidad, medida en números de Hill, se calculó como el parámetro descriptivo de las relaciones especie-abundancia, con el fin de observar variaciones a nivel espacial en la estructura de los ensamblajes. Además, se emplearon curvas de estimación (interpolación y extrapolación) para comparar los tipos de cobertura vegetal y establecer diferencias



**Figura 1.** Estaciones de muestreo en las zonas de vida del bosque húmedo premontano (bh-PM) y el bosque húmedo muy premontano (bmh-PM) de Ibagué, Tolima

significativas por zona de vida. Estos análisis se hicieron utilizando la función `iNEXT` del paquete `iNEXT` del programa R (**R Development Core Team, 2017**).

Para determinar la presencia de especies indicadoras de los tipos de cobertura vegetal en cada zona de vida, se utilizó el análisis indicador de especies propuesto por **Dufrêne & Legendre (1997)**, utilizando la función `indval` del paquete `indicspecies` del programa R (**R Development Core Team, 2017**).

Por último, con el fin de determinar diferencias significativas en la estructura del ensamblaje de peces entre los tipos de cobertura vegetal por zona de vida, se hizo un análisis de escalamiento no métrico multidimensional (ENMM), acompañado de un análisis de similitud (ANOSIM) (**Chapman & Underwood, 1999**), con la ayuda de la función `metaMDS` del paquete `vegan` del programa R (**R Development Core Team, 2017**).

**Relación entre las variables ambientales y la fauna íctica.** Para determinar la relación entre el ensamblaje de peces y las variables ambientales en los distintos tipos de cobertura vegetal, se hizo un análisis canónico de correspondencias (ACC), utilizando dos grupos de matrices (especies por cobertura vegetal y variables ambientales por cobertura vegetal). Las variables que influyeron significativamente

( $p < 0,05$ ) en la estructura del ensamblaje de especies, se determinaron mediante la prueba de Monte Carlo con 999 permutaciones. Se determinaron los factores de inflación de la variancia (FIV) para reducir la multicolinealidad de las variables ambientales, y solo las variables con un factor de inflación menor de diez ( $< 10$ ) se utilizaron en el CCA (**Ter Braak & Smilauer, 2002**). Estos análisis se hicieron con el programa estadístico Canoco para Windows 4.5 (**Braak & Smilauer, 2002**).

## Resultados

**Composición y estructura de la ictiofauna.** Se recolectaron 1.636 individuos pertenecientes a 12 especies, siete géneros, cinco familias y tres órdenes. En el bh-PM se registraron 911 individuos, distribuidos en tres tipos de cobertura vegetal (pastos, mosaico de cultivos y arbustos), pertenecientes a tres órdenes, cinco familias y 12 especies, las cuales representan aproximadamente el 10 % de las reportadas para el Alto Magdalena (**Villa-Navarro, et al., 2006**), el 25 % de las reportadas para la cuenca del río Coello (**Villa-Navarro, et al., 2004**) y el 27 % de las informadas para la cuenca del río Totare (**Villa-Navarro, et al., 2007**), estas dos últimas en el mismo rango altitudinal del área estudiada (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SupFile/623/2756>).

En cuanto a la distribución espacial de las especies, *Astroblepus grixalvi*, *Astroblepus homodon*, *Creagrutus* aff. *paralacus* y *Trichomycterus* sp.1 fueron frecuentes en los tres tipos de coberturas vegetal. *Astroblepus* sp.1, *Astroblepus* sp.3 y *Astroblepus* sp.4 fueron especies exclusivas de la cobertura de arbustos, y *Chaetostoma* cf. *fisheri* y *Poecilia caucana*, exclusivas de la cobertura de pastos (Figura 2-A). El ANOVA de Kruskal-Wallis ( $p=0,076$ ) indicó que, con relación a la abundancia, no existen diferencias estadísticas entre los distintos tipos de cobertura vegetal del bh-PM.

Por otra parte, en el bmh-PM se registraron 725 individuos distribuidos en cuatro tipos de cobertura vegetal (pastos, bosques, mosaico de cultivos y arbustos), pertenecientes a dos órdenes, tres familias y 14 especies, las cuales representan aproximadamente el 10 % de las reportadas para el Alto Magdalena (Villa-Navarro, et al., 2006), el 29 % de las informadas para la cuenca del río Coello (Villa-Navarro, et al., 2004) y el 31 % de las reportadas para la cuenca del río Totare (Villa-Navarro, et al., 2007), estas dos últimas en el mismo rango altitudinal del área estudiada (Tabla 3S, https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/623/2757).

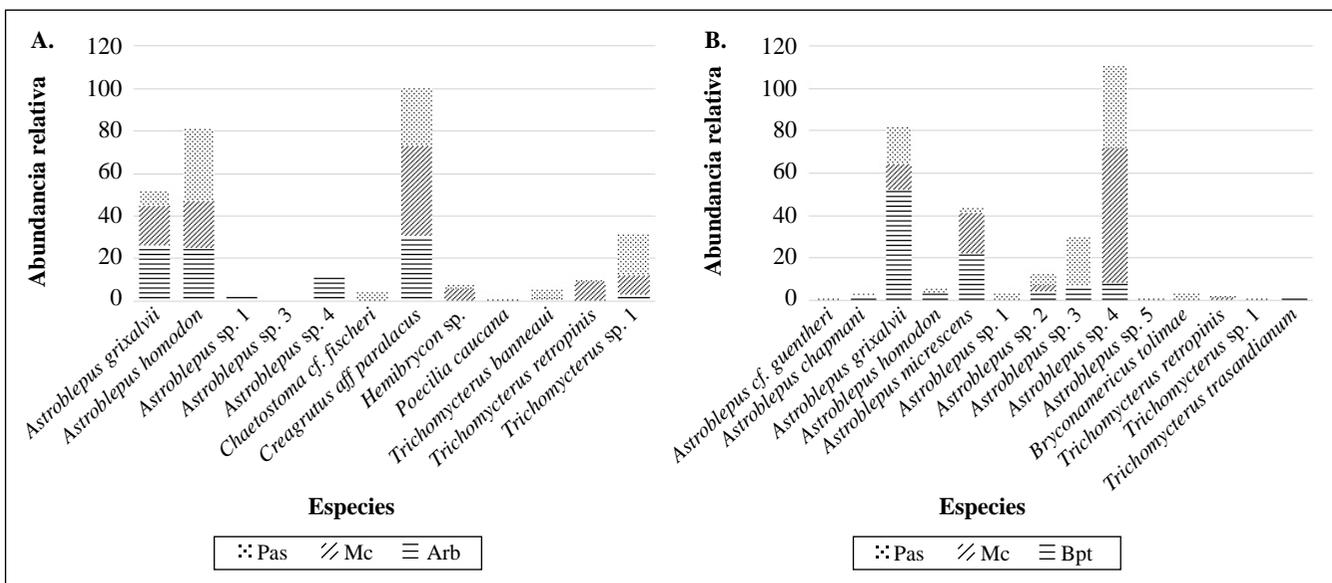
En cuanto a la distribución espacial de las especies en los diferentes tipos de cobertura, *Astroblepus chapmani*, *A. grixalvi*, *A. homodon*, *Astroblepus* sp.2, *Astroblepus* sp.3 y *Astroblepus* sp.4, se registraron en dos o más tipos de cobertura vegetal. Por otra parte, *Bryconamericus tolimae*, *Astroblepus* sp.1 y *Trichomycterus* sp.1 fueron exclusivas de la cobertura de pastos, *Astroblepus guentheri*, *Astroblepus* sp.5 y *Trichomycterus retropinis* de la cobertura de mosaico de cultivos, *Trichomycterus transandianus* de la cobertura de bosques y *Astroblepus micrecens* de la cobertura de arbustos (Figura 2-B). El ANOVA de Kruskal-Wallis

( $p=0,089$ ) indicó que, con relación a la abundancia, no existen diferencias estadísticas entre los distintos tipos de cobertura vegetal del bmh-PM.

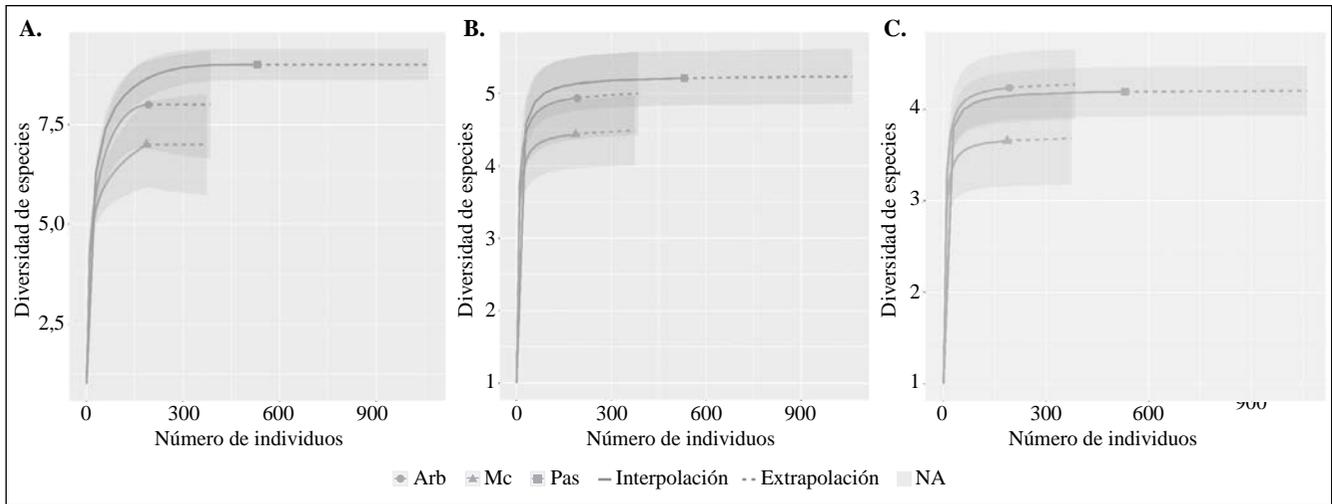
El análisis ENMM en el bh-PM y el bmh-PM reveló que no existen diferencias entre la composición y la estructura de los distintos tipos de cobertura vegetal evaluados, lo cual fue corroborado por el ANOSIM en el bh-PM ( $R=0,075$ ,  $p=0,32$ ) (Figura 1S-A, https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/623/2754) y en el bmh-PM ( $R=0,12$ ,  $p=0,13$ ) (Figura 1S-B, https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/623/2754). Por último, en el bh-PM la cobertura de pastos se caracterizó por la presencia de especies indicadoras como *C. cf. fisheri* ( $VI=1,0$ ,  $p<0,05$ ) y *Trichomycterus* sp.1 ( $VI=0,8$ ,  $P<0,05$ ) y la de arbustos por la presencia de *Astroblepus* sp.1 ( $VI=1,0$ ,  $p<0,05$ ). En el bmh-PM no se registraron especies indicadoras para ningún tipo de cobertura.

**Diversidad.** En la zona de vida del bh-PM el tipo de cobertura con el mayor número efectivo de especies en los tres órdenes evaluados fue el de pastos, seguido por el de arbustos y el mosaico de cultivos. Sin embargo, según los resultados de los intervalos de confianza de las curvas de rarefacción e interpolación, no se observaron diferencias significativas en la diversidad de las coberturas evaluadas (Figura 3)

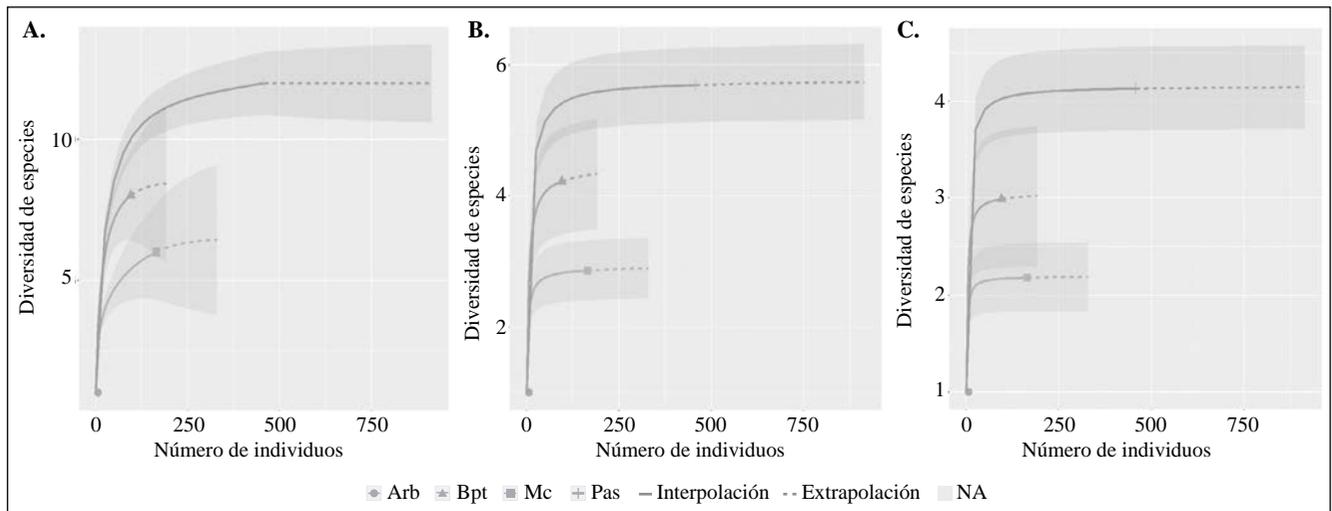
De forma similar, en la zona de vida de bmh-PM el número efectivo de especies más alto en los tres órdenes evaluados se registró en la cobertura de pastos, seguida por la de bosques, mosaico de cultivos y arbustos. Los intervalos de confianza de las curvas de interpolación y extrapolación mostraron diferencias en la diversidad en las coberturas evaluadas, principalmente entre la de pastos y la de mosaico de cultivos (Figura 4).



**Figura 2.** Abundancia relativa de las especies registradas en las coberturas vegetales de pastos, mosaico de cultivos, bosques y arbustos. **A.** Bosque húmedo premontano (bh-PM). **B.** Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del municipio de Ibagué.



**Figura 3.** Diversidad de especies de peces en los distintos tipos de cobertura vegetal del bosque húmedo premontano (bh-PM) del municipio de Ibagué. **A.** Riqueza de especies (diversidad de orden  $q = 0$ ). **B.** Diversidad de orden  $q = 1$ . **C.** Diversidad de orden:  $q = 2$ .



**Figura 4.** Diversidad de especies de peces en los distintos tipos de cobertura vegetal del bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del municipio de Ibagué. **A.** Riqueza de especies (diversidad de orden:  $q = 0$ ). **B.** Diversidad de orden:  $q = 1$ . **C.** Diversidad de orden:  $q = 2$ .

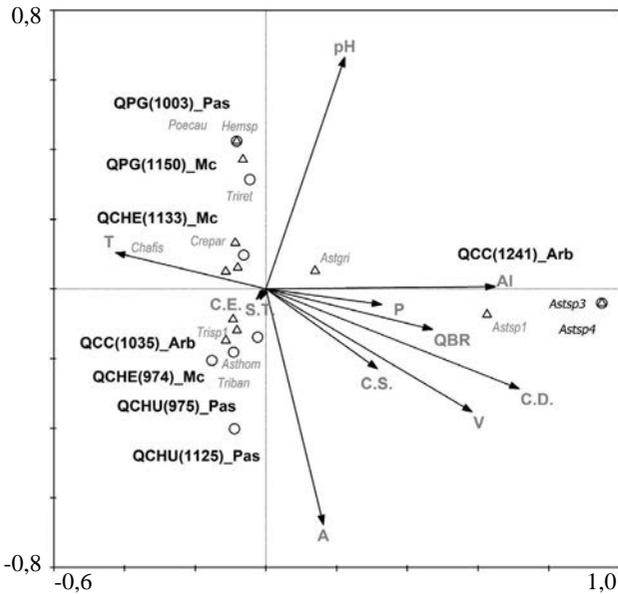
**Ensamblaje de peces y tipos de cobertura vegetal.** En el ACC del bh-PM los dos primeros ejes explicaron el 72 % de la variación de los datos, la única variable que influyó de forma significativa en la composición y la estructura de la ictiofauna fue la cobertura del dosel ( $p < 0,05$ ). Esta variable se asoció positivamente con la estación QCC (1.241 msnm) en la cobertura de arbustos y con *Astroblepus* sp.1, *Astroblepus* sp.3 y *Astroblepus* sp.4, y negativamente con las estaciones QPG (1.003 msnm) en la cobertura de pastos, con la QPG (1.150 msnm) y la QCHE (1.133 msnm) en la cobertura de mosaico de cultivos y con *C. cf. fisheri*, *C. aff. paralacus*, *Hemibrycon* sp., *P. caucana* y *T. retropinis* (Figura 5).

Por último, en el ACC del bmh-PM los dos primeros ejes explicaron el 56 % de la variación, y las variables que influyeron significativamente en la composición y la

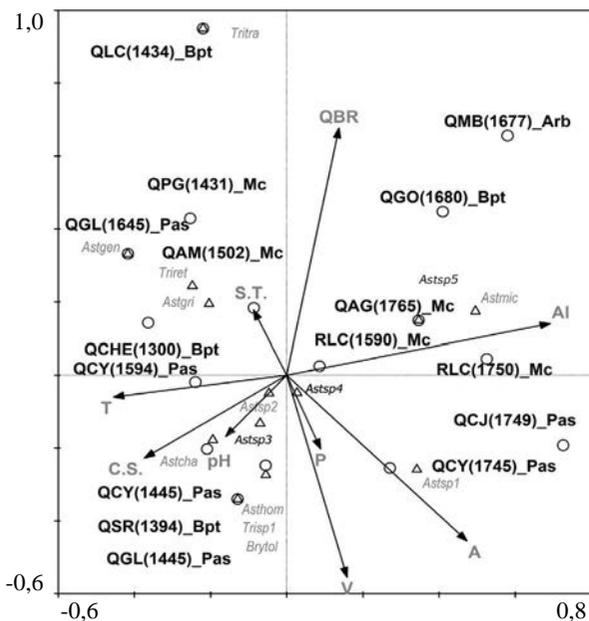
estructura de la ictiofauna fueron la elevación y la calidad de la vegetación de la ribera (QBR) ( $p < 0,05$ ). En el eje 1, la variable de elevación se asoció positivamente con las estaciones QMB (1.677 msnm) en la cobertura de arbustos, QGO (1.680 msnm) en la cobertura de bosques, QAG (1.765 msnm), RLC (1.590 msnm), y con la RLC (1.750 msnm) en la cobertura de mosaico de cultivos, QCJ (1.749 msnm) y la QCY (1.745 msnm) en la cobertura de pastos y *A. micrecens* y *Astroblepus* sp.5. Las estaciones QCY (1.445 msnm) y QGL (1.445 msnm) en la cobertura de pastos, y QSR (1.394 msnm) en la cobertura de bosques, se asociaron negativamente con la elevación, al igual que con *A. homodon*, *Astroblepus* sp.2, *Astroblepus* sp.3, *B. tolimae* y *Trichomycterus* sp.1 (Figura 6).

Asimismo, en el eje 1 el QBR se asoció positivamente con las estaciones QLC (1.434 msnm) y QGO (1.680 msnm)

en la cobertura de bosques, y con la QMB (1.677 msnm) en la cobertura de arbustos, y con *T. transandianus*, y negativamente con la QCY (1445 m snm) y la QGL (1445 m snm) en la cobertura de pastos y la QSR (1394 m snm) con la cobertura de bosques y con *A. homodon*, *Astroblepus* sp.2, *Astroblepus* sp.3, *B. tolimae* y *Trichomycterus* sp.1 (Figura 6).



**Figura 5.** Diagrama trilineal (tripplot) del análisis canónico de correspondencias (ACC) de los distintos tipos de cobertura vegetal, las variables ambientales y el ensamblaje de peces del bosque húmedo premontano (bh-PM) en el municipio de Ibagué



**Figura 6.** Diagrama trilineal (tripplot) del análisis canónico de correspondencias de los distintos tipos de cobertura vegetal, las variables ambientales y el ensamblaje de peces del bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) en el municipio de Ibagué

## Discusión

**Estructura y composición.** La ausencia de diferencias en la estructura y composición de los ensamblajes de peces entre los tipos de cobertura vegetal, tanto en el bh-PM como en el bmh-PM, puede atribuirse al hecho de que las especies halladas son generalistas o toleran amplios márgenes de variación en la oferta de recursos en los distintos hábitats. En el bh-PM, *C. aff. paralacus* registró los valores más altos de abundancia en las estaciones ubicadas en coberturas de pastos y arbustos, algunas de las cuales (QCHU y QPG) estaban rodeadas por arbustos y árboles que, probablemente, ofertaron semillas e insectos, recursos usualmente aprovechados por esta especie (Lozano-Zárate, 2008).

La cobertura de pastos se considera un ecosistema terrestre dinámico expuesto a diferentes perturbaciones (quema, herbivoría y sequía) (Velázquez & Gómez, 2009), que limita el aporte de recursos a los ecosistemas acuáticos que rodea, favoreciendo la presencia de especies resistentes y de amplia dispersión, como es el caso de *P. caucana*, la cual, por sus rasgos de historia de vida (ovoviparidad, tolerancia a bajos niveles de oxígeno disuelto y a altas temperaturas), soporta las presiones de ambientes fluctuantes (Casatti, et al., 2009; Gordon, et al., 2009; Martínez, et al., 2016). Esto también ocurriría con *C. cf. fisheri*, ya que algunas especies de la familia Loricariidae presentan tolerancia a variaciones e impactos ambientales como la disminución del oxígeno, y presentan hábitos alimenticios relacionados con el consumo de algas perifíticas, las cuales se ven favorecidas por el incremento de la intensidad lumínica y de la temperatura causado por la disminución de la vegetación de ribera (Kennard, et al., 2005; Vieira & Shibatta, 2007).

En el bmh-PM al parecer sucede lo mismo con *Astroblepus* sp.4, la cual registró su mayor abundancia en la estación QCY (pastos) caracterizada por su fondo de arena y sus recursos autóctonos. Los macroinvertebrados acuáticos (Ephemeroptera y Diptera) son consumidos frecuentemente por esta especie (Bríñez, 2004).

**Diversidad.** La ausencia de diferencias significativas en los valores de riqueza ( $q=0$ ), diversidad ( $q=1$ ) y dominancia ( $q=2$ ) en los tres tipos de cobertura vegetal del bh-PM podría indicar que éstas proporcionaron un número similar de microhábitats (rocas, guijarro, arena, hojarasca y lodo), fuentes alimenticias (macroinvertebrados acuáticos y perifiton) y condiciones ambientales similares en las coberturas, lo que permite la formación de ensamblajes similares.

La variación en los valores de los órdenes de diversidad en los distintos tipos coberturas del bmh-PM, especialmente la diferencia en la riqueza en las coberturas conservadas (arbustos y bosques) y las degradadas (mosaico de cultivos y pastos), podría indicar que algunos ensamblajes estarían dominados por especies con capacidad de explotar recursos autóctonos, como en el caso de los mosaicos de cultivos y los pastos, y en otros donde serían frecuentes especies insectívoras y omnívoras que requieren recursos alóctonos, como en el caso de los arbustos y los bosques (Bojsen & Barriga,

2002), situación que se observa en arroyos del Neotrópico de zonas degradadas por la deforestación donde se registran valores altos de riqueza (**Lorion & Kennedy, 2009**).

El hecho de que los pastos y los bosques registraran los valores más altos en los órdenes  $q=1$  y  $q=2$ , en tanto que en los mosaicos de cultivos se obtuvieran valores menores, podría deberse a que la diversidad varía según las condiciones ambientales (**Thioulouse & Chessel, 1992**) y la complejidad del hábitat (**Gregory, et al., 1991**). Al parecer en los pastos y los bosques se presenta una zona de amortiguación de vegetación de ribera boscosa que ofrece un ambiente menos hostil y una mayor diversidad de material alóctono, lo cual favorece una mayor oferta de microhábitats potenciales (**Pusey & Arthington, 2003**), cuya gran diversidad se asocia con la presencia de vegetación de ribera y a una gran diversidad de especies (**Gregory, et al., 1991**).

Por el contrario, la poca diversidad en los mosaicos de cultivos se debe a la inestabilidad de los microclimas (**Correa, et al. 2015; Shimano & Juen, 2016**), a lo que habría que sumar los procesos de erosión que llevan a la sedimentación (**Mercer, et al. 2014**), la disminución de la cobertura de dosel (**Fitzherbert, et al., 2008**) y sus efectos negativos sobre el suelo y los ecosistemas acuáticos (**Allan, 2004**). Asimismo, los plaguicidas y fertilizantes asociados a las distintas prácticas agrícolas también están relacionados con los cambios en la concentración de nutrientes y la pérdida de diversidad (**Beltrão, et al., 2009**).

**Ensamblaje de peces y tipos de cobertura vegetal.** En la cobertura de arbustos del bh-PM las variables de cobertura del dosel, calidad de la vegetación de ribera (índice QBR), baja temperatura y mayor velocidad del agua, características de ecosistemas conservados, influyeron en la distribución de las especies (**Casatti, et al., 2012**). Esto podría explicar la presencia de *Astroblepus* sp.3 (*sensu A. chotae*) y *Astroblepus* sp.4 (*sensu A. trifasciatus*), las cuales dependen de recursos alóctonos como la hojarasca, las ramas y los insectos que son proporcionados por ambientes más estables (**Lorion & Kennedy, 2009; Ferreira, 2010**).

Las coberturas de pastos y mosaicos de cultivos se caracterizaron por una baja cobertura de dosel, mayor temperatura, y menor velocidad y profundidad del agua, condiciones propias de ambientes degradados (**Casatti, et al., 2012**), lo que favorece la presencia de *C. cf. fisheri* y *P. caucana*. La baja cobertura de dosel permite una mayor entrada de la luz en el cuerpo de agua, lo que lleva a un incremento de la diversidad y la abundancia del perifiton (**Burcham, 1988; Posada, et al., 2000**), recurso alimenticio requerido al menos por *C. cf. fisheri* (**Zúñiga-Upegui, 2005**).

En el bmh-PM la elevación sobre el nivel del mar influyó significativamente en la distribución de las especies. La geomorfología y el clima tienen efectos sobre las dinámicas de los ensamblajes de peces. Los cuerpos de agua ubicados en zonas altas se caracterizan por presentar corrientes rápidas, sustratos de roca y grava, y poca o ninguna macrófita acuática, lo que induce la presencia de

especies con adaptaciones que les permitan mantenerse en estos ecosistemas (**Winemiller, 2007**). Esto explicaría la presencia de *A. micrecens* en estaciones del bmh-PM ubicadas en elevaciones superiores a los 1.700 msnm; esta especie ha sido reportada hasta los 2.000 msnm, aproximadamente (**Cortolima, 1996; Bríñez, 2004**), y se caracteriza por poseer un disco oral ventral, mandíbulas especializadas para la fijación en aguas rápidas y una región pélvica que le permite escalar rocas y cascadas, facilitando la colonización de diferentes ambientes y la exploración de una gran diversidad de recursos alimenticios y físicos (**Lujan & Armbruster, 2012; De Crop, et al., 2013; Zuluaga, et al., 2016**).

## Conclusiones

La ausencia de diferencias en la composición, la estructura y la diversidad entre las coberturas vegetales del bh-PM, se deben a una oferta similar de los tipos de microhábitats, de las fuentes de alimentación y de las condiciones fisicoquímicas. A pesar de esto, las coberturas vegetales degradadas, como los pastos, se caracterizan por la presencia de *P. caucana*, especie introducida en el área de estudio tolerante a los aumentos en la temperatura del agua y común en hábitats degradados.

En el bmh-PM los cambios de composición y diversidad entre las coberturas vegetales se deben al efecto de la elevación en la ictiofauna. Es importante mencionar que las zonas conservadas, como las de bosque, se caracterizaron por la presencia de especies exclusivas como *T. transandianum*, debido a que proveen los recursos físicos requeridos (fondos de arena) y un microclima más estable.

---

## Información suplementaria

---

**Tabla 1S.** Caracterización de los tipos de cobertura vegetal en el bosque húmedo premontano (bh-PM) y el bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del Alto Magdalena, Colombia. Arb=arbustos; Bpt=bosques; Mc=mosaico de cultivos; Pas=pastos (**Cortolima, 2012**). Vea la tabla 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/623/2755>

**Tabla 2S.** Composición y estructura de la fauna íctica registrada en las estaciones evaluadas en el bosque húmedo premontano (bh-PM) del municipio de Ibagué. Arb=arbustos; Bpt=bosques; Mc=mosaico de cultivos; Pas=pastos; AR: abundancia relativa. Vea la tabla 2S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/623/2756>

**Tabla 3S.** Composición y estructura de la fauna íctica registrada en las estaciones evaluadas en el bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del municipio de Ibagué. Arb=arbustos; Bpt=bosques; Mc=mosaico de cultivos; Pas=pastos; AR: abundancia relativa. Vea la tabla 3S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/623/2757>

**Figura 1S.** Diagrama de ordenación ENMM basado en las abundancias de las especies de peces registradas en los tipos de cobertura vegetal de Ibagué. **A.** Bosque húmedo premontano (bh-PM). **B.** Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) del municipio de Ibagué. Vea la figura 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/623/2754>

---

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero del Grupo de Investigación en Zoología de la Universidad del Tolima.

## Contribución de los autores

Los datos usados para la elaboración de este manuscrito, hacen parte del proyecto de grado para optar al título de biólogo de José Luis Poveda Cuellar en la Universidad del Tolima, el cual fue dirigido por Francisco Antonio Villa Navarro y co-dirigido por Edwin Orlando López Delgado.

José Luis Poveda Cuellar: Fase de campo, colecta, determinación taxonómica, y redacción del manuscrito. Francisco Antonio Villa Navarro: Diseño del muestreo, Fase de campo, Ajustes estadísticos, redacción y diseño. Edwin Orlando López Delgado: Fase de campo, Análisis de datos y ajustes de redacción en discusión y resultados.

## Conflicto de intereses

Los autores del presente manuscrito declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Albornoz, J., Conde, C.** (2014). Diversidad y relaciones ecomorfológicas de la comunidad íctica de la cuenca del río Alvarado. (Tesis de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- Allan, J.D.** (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. **35**: 257-284.
- Beltrão, G. B., Medeiros, E.S., Ramos, R.T.** (2009). Effects of riparian vegetation on the structure of the marginal aquatic habitat and the associated fish assemblage in a tropical Brazilian reservoir. *Biota Neotropica*, **9** (4): 37-43. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.biotaneotropica.org.br/v9n4/en/abstract?article+bn00709042009>
- Bio-west, Inc.** (2009). Diamond Fork and Sixth Water Creeks Riparian Vegetation and Ladies'-tresses. North Logan, Utah, Utah Reclamation Mitigation and Conservation Commission. USA.
- Bojsen, B. H., Barriga, R.** (2002). Effects of deforestation on fish community structure in Ecuadorian Amazon streams. *Freshwater Biology*. **4**: 2246-2260.
- Buitrago-Suárez, U.** (1995). Sistemática de las especies colombianas del género *Astrobalepus* Humboldt, 1805 (Pisces: Siluroidei: Astrobalepidae). (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá, D.C.
- Braak, C. J., Smilauer, P.** (2002). CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Ithaca, Microcomputer Power, p. 500.
- Braun-Blanquet, J.** (1979). Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. Barcelona, Blume, p. 16-500.
- Briñez, G.N.** (2004). Distribución altitudinal, diversidad y algunos aspectos ecológicos de la familia Astrobalepidae (Pisces: Siluriformes) en la cuenca del río Coello (Tolima). (Trabajo de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- Burcham, J.** (1988). Fish communities and environmental characteristics of two lowland streams in Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. **36**: 273-285.
- Casatti, L., Barreto, T., Gonçalves-Souza, T., Bessa, E., Manzotti, A., Silva, C., Oliveira, O.** (2012). From forests to cattail: How does the riparian zone influence stream fish? *Neotropical Ichthyology*. **10** (1): 205-214.
- Casatti, L., Ferreira, C., Carvalho, F.** (2009). Grass dominated stream sites exhibit low fish species diversity and dominance by guppies: An assessment of two tropical pasture river basins. *Hydrobiologia*. **632** (1): 273-283.
- Castro-Roa, D.** (2006). Composición y estructura de la comunidad de Characiformes en la cuenca del río Prado. (Trabajo de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- Chase, J. M.** (2003). Community assembly: When should history matter? *Oecologia*. **136** (4): 489-498.
- Correa, F., Juen, L., Rodrigues, L., Silva-Filho, H., Santos-Costa, M.** (2015). Effects of oil palm plantations on anuran diversity in the eastern Amazon. *Animal Biology*. **65**: 321-335.
- Cortolima.** (1996). Inventario de la fauna silvestre en las cuencas de los ríos Combeima, Toche y Tochecito del municipio de Ibagué, Tolima. Corporación Autónoma del Tolima, Ibagué. p. 57.
- De Crop, W., Pauwels, E., Van Hoorebeke, L., Geerinckx, T.** (2013). Functional morphology of the Andean climbing catfishes (Astrobalepidae, Siluriformes): Alternative ways of respiration, adhesion, and locomotion using the mouth. *Journal of Morphology*. **274** (10): 1164-1179.
- de Pinna, M. C.** (1992). A new subfamily of Trichomycteridae (Teleostei, Siluriformes), lower loricarioid relationships and a discussion on the impact of additional taxa for phylogenetic analysis. *Zoological Journal of the Linnean Society*. **106**: 175-229.
- DoNascimento, C., Herrera-Collazos, E., Herrera-R, G., Ortega-Lara, A., Villa-Navarro, F., Usma, J., Maldonado-Ocampo, J.** (2017). Checklist of the freshwater fishes of Colombia: A Darwin Core alternative to the updating problem. *ZooKeys*. **708**: 25-138
- Dufrêne, M., Legendre, P.** (1997). Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol. Monogr.* **67**: 345-366.
- Eigenmann, C. H.** (1912). Some results from an ichthyological reconnaissance of Colombia, South America. *Indiana University Studies*. **8**: 1-2.
- Eigenmann, C. H.** (1922). The fishes of the Northwestern South America, part I. The fresh-water fishes of Northwestern South America, including Colombia, Panamá, and Pacific slopes of Ecuador y Peru, together with an appendix upon the fishes of the river Meta in Colombia. *Mem. Carnegie Mus.* **9** (1): 1-346.
- Espinal, S.** (1977). Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 238.
- Ferreira, C., Casatti, L.** (2006). Influência da estrutura do hábitat sobre a ictiofauna de um riacho em uma micro-bacia de pastagem, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*. **23** (3): 642-651.
- Fitzherbert, E., Struebig, M., Morel, A., Danielsen, F., Brühl, C., Donald, P., Phalan, B.** (2008). How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*. **23** (10): 538-545.

- García-Melo, L.** (2005). Distribución, diversidad y ecología básica de la familia Trichomycteridae (Ostariophysi: Siluriformes) en la cuenca del río Coello departamento del Tolima. (Tesis de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- García-Melo, L.** (2009). Relaciones filogenéticas de *Trichomycterus* (siluriformes: trichomycteridae) en el Alto Magdalena. (Trabajo de Maestría). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- García-Melo, L., Villa-Navarro, F., Donascimento, C.** (2016). A new species of *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae) from the upper río Magdalena basin, Colombia. *Zootaxa*. **4117**: 226-40.
- García-Alzate, C., Taphorn, D., Roman-Valencia, C., Villa-Navarro, F.** (2015). *Hyphessobrycon natagaima* (Characiformes: Characidae), una nueva especie para Colombia, con clave para las especies de *Hyphessobrycon* de la Cuenca del Magdalena. *Caldasia*. **37**: 221-232.
- Gordon S.P., Reznick, D.N., Kinnison, M.T., Bryant, M.J., Weese, D.J., Räsänen, K., Millar, N.P., Hendry, A.P.** (2009). Adaptive Changes in Life History and Survival following a New Guppy Introduction. *The American Naturalist*. **174** (1): 34-45.
- Granados, D., Hernández-García, M., López-Ríos, G.** (2006). Las zonas ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. **12** (1): 55-69.
- Greer, M., Closs, G.P., Crow, S., Hicks, A.** (2012). Complete versus partial macrophyte removal: The impacts of two drain management strategies on freshwater fish in lowland New Zealand streams. *Ecology Freshwater Fish*. **21**: 510-520.
- Gregory, S.V., Swanson, F. J., McKee, W. A., Cummins, K. W.** (1991). An Ecosystem Perspective of Riparian Zones. *Bioscience*. **41**: 540-551.
- Hill, M.** (1973). Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology*. **54** (2): 427-432.
- Holdridge, L.** (1996). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. San José de Costa Rica.
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. **113** (2): 363-375.
- Kennard, M., Arthington, A., Pusey, B., Harch, B.** (2005). Are alien fish a reliable indicator of river health? *Freshwater Biology*. **50** (1): 174-193.
- López-Delgado, E., Vásquez-Ramos, F., Villa-Navarro, F., Reinoso, G.** (2015). Evaluación de la calidad del bosque de ribera utilizando un método simple y rápido en dos ríos de bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista Tumbaga*. **1** (10): 6-29.
- Lorion, C., Kennedy, B.** (2009). Riparian forest buffers mitigate the effects of deforestation on fish assemblages in tropical headwater streams. *Ecological Society of America*. **19**(2): 468-479.
- Lozano- Zárate, Y.** (2008). Diversidad, distribución, abundancia y ecología de la familia Characidae (Ostariophysi: Characiformes) en la cuenca del río Totare (Tolima-Colombia). (Tesis de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Ibagué.
- Lujan, N., Armbruster, J.** (2012). Morphological and functional diversity of the mandible in suckermouth armored catfishes (Siluriformes: Loricariidae). *Journal of Morphology*. **273** (1): 24-39.
- Maldonado-Ocampo, J.A., Ortega-Lara, A., Usma, J., Galvis, G., Villa-Navarro, F., Vásquez, L., Prada-Predreros, S., Ardila, C.** (2005). Peces de los Andes de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC, Colombia. p. 346.
- Martínez, J., Cadena, D., Torres, M.** (2016). Critical thermal limits of *Poecilia caucana* (Steindachner, 1880) (Cyprinodontiformes: Poeciliidae). *Neotropical Ichthyology*. **14** (1): 150-171.
- Mercer, E., Mercer, T., Sayok, A.** (2014). Effects of forest conversions to oil palm plantations on freshwater macro-invertebrates: A case study from Sarawak, Malaysia. *Journal of Land Use Science*. **9** (3): 260-277.
- Montoya, D.** (2014). Diversidad, estructura y relaciones ecomorfológicas de la ictiofauna en ecosistemas lóticos del Bosque Seco Tropical, Tolima, Colombia. (Trabajo de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- Pareja-Cardona, M., Jiménez-Segura, L., Villa-Navarro, F., Reinoso-Flórez, G., Gualtero-Lea, D., Ángel-Rojas, V.** (2014). Áreas de reproducción de peces migratorios en la cuenca alta del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*. **15** (2): 40-53.
- Pérez, M., Prada-Pedreros, S.** (2015). Relationship between fish community and riparian vegetation cover in hydrological periods (Coffee-growing region, Colombia). *Universitas Scientiarum*. **16** (2): 119-139.
- Posada, J., Roldán, G., Ramírez, J.** (2000). Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **48** (1), 59-70.
- Pusey, B., Arthington, A.** (2003). Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: A review. *Marine and Freshwater Research*. **54**: 1-16.
- Provenzano, F.R., Villa-Navarro, F.A.** (2017). A new species of the catfish genus *Cordylancistrus* (Siluriformes, Loricariidae) from the Magdalena River, Tolima, Colombia. *Zootaxa*. **4294** (5): 522-530.
- Shimano, Y., Juen, L.** (2016). How oil palm cultivation is affecting mayfly assemblages in Amazon streams? *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*. **52**: 35-45.
- Sweeney, B., Bott, T., Jackson, J., Kaplan, L., Newbold, J., Standley, L., Hession, W., Horwitz, R.** (2004). Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **101** (39): 14132-14137.
- Taphorn, D., Armbruster, J., Villa-Navarro, F., Keith, C.** 2013. Trans-Andean *Ancistrus* (Siluriformes: Loricariidae). *Zootaxa*. **3641** (4): 343-370
- Thioulouse J, Chessel, D.** (1992). A Method for Reciprocal Scaling of Species Tolerance and Sample Diversity. *Ecology*. **73** (2): 670-80.
- Velázquez E, Gómez-Sal, A.** (2009). Changes in the Herbaceous Communities on the Landslide of the Casita Volcano, Nicaragua, during Early Succession. *Folia Geobotanica*. **44**: 1-18.
- Villa-Navarro, F., García, L., Bríñez, N., Zúñiga, P.** (2004). Biodiversidad de la cuenca del río Coello. Biodiversidad Regional Fase I. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.cortolima.gov.co>

- Villa-Navarro, F.A., Zúñiga-Upegui, P., Castro-Roa, D., García, J., García, L., Herrada-Yara, M.** (2006). Peces del alto Magdalena, cuenca del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*. **7** (1): 3-22.
- Villa-Navarro, F.A., García, L., Herrada, M., Lozano, Y.** (2007). Biodiversidad de la cuenca del río Totare. Biodiversidad Regional Fase III. Fecha de consulta: 5 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.cortolima.gov>
- Vieira, D., Shibatta, O.** (2007). Peixes como indicadores da qualidade ambiental do ribeirão Esperança, município de Londrina, Paraná, Brasil. *Biota Neotropica*. **7** (1): 57-65.
- Winemiller, K., Agostinho, A., Caramaschi, E.** (2007). Fish ecology in tropical stream. En: Dudgeon, D., *Tropical Stream Ecology* (270). Elsevier Inc. p.107-146.
- Zúñiga-Upegui, P., Villa-Navarro, F.A., Reinoso-Flórez, G., Ortega-Lara, A.** (2005). Relación longitud-peso y frecuencia de tallas para los peces del género *Chaetostoma* (Siluriformes, Loricariidae), de la cuenca del río Coello, Colombia. *Dahlia*. **8**: 47-52.
- Zúñiga-Upegui, P., Villa-Navarro, F. A., García-Melo, L., García-Melo, J., Reinoso-Flórez, G., Gualtero-Leal, D. y Ángel-Rojas, V.** (2014). Aspectos ecológicos de *Chaetostoma* sp. (Siluriformes: Loricariidae) en el alto río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*. **15** (2): 81-94.
- Zúñiga-Upegui, P.** (2005). Diversidad, distribución y algunos aspectos ecológicos de la familia Loricariidae (Pisces, Siluroidei) en la Cuenca del río Coello-Tolima (Colombia). (Trabajo de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Ibagué.
- Zuluaga, M., Fitzgerald, D., Giarrizzo, T., Winemiller, K.** (2016). Morphologic and trophic diversity of fish assemblages in rapids of the Xingú River, a major Amazon tributary and region of endemism. *Environmental Biology of Fishes*. **99** (8-9): 647-658.

# Estructura y composición de ensamblajes de anfibios en tres tipos de hábitat en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, Cordillera Central de Colombia

Sebastián Duarte-Marín<sup>1,2,\*</sup>, Cristian González-Acosta<sup>1,2</sup>, Fernando Vargas-Salinas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo Evolución, Ecología y Conservación (EECO), Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Herpetología de la Universidad del Quindío (GHUQ), Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

## Resumen

Los Andes colombianos, especialmente entre los 1000 y 3000 msnm, presentan la mayor diversidad de anfibios anuros para el país. Sin embargo, históricamente esta región ha tenido altos niveles de deforestación y cambios en el uso del suelo. Ante este escenario, el establecimiento de áreas protegidas es una importante estrategia de conservación de diversidad biológica en los Andes de Colombia. El Parque Nacional Natural (PNN) Selva de Florencia, está ubicado en la cordillera Central y es considerado el PNN con mayor diversidad de anfibios endémicos por área en el país; sin embargo, no se ha cuantificado la estructura y composición de los ensamblajes de anfibios ahí presentes de tal forma que, se establezca una línea base sólida para su monitoreo en espacio y tiempo. En este estudio cuantificamos la estructura y composición de los ensamblajes de anfibios en tres tipos de hábitat (bosque, pinera y pastizal), realizando muestreos diurnos y nocturnos entre junio y septiembre del 2017. Se registraron 338 individuos pertenecientes a 24 especies, 21 de ellas en bosque, 11 en pineras y 3 en pastizales. La diversidad de anfibios fue mayor en bosque que en pinera y potrero. La composición de especies en bosque tendió a ser diferente de aquella en pineras y potreros; sin embargo, en algunas pineras no sujetas a explotación comercial por más de 20 años, se observaron especies típicas de bosque. Nuestros resultados contribuyen con datos cuantitativos útiles para la monitorización de la diversidad de anfibios en los Andes centrales de Colombia, utilizando el PNN Selva de Florencia como modelo. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Anfibios; Ensamblajes; Endemismo; Selva de Florencia.

## Structure and composition of amphibian assemblages in three types of habitat in the National Natural Park Selva de Florencia, Colombian Central Cordillera

### Abstract

The Colombian Andes, especially between 1000 and 3000 masl, exhibit the greatest diversity of anuran amphibians for the whole country. However, historically this region has high levels of deforestation and changes in land use. Given this scenario, the establishment of protected areas is an important strategy for biological conservation in the Andes of Colombia. The National Natural Park (NNP) *Selva de Florencia* located in the Colombian Central Cordillera is considered the NNP with the greatest diversity of endemic amphibians per area in the country; however, the structure and composition of amphibian assemblages has not been quantified in such a way that a solid baseline data could be established for their monitoring both in space and time. In this study, the structure and composition of amphibian assemblages were quantified in three types of habitat (forest, pine crops and pasturelands), through diurnal and nocturnal samplings conducted between June and September 2017. A total of 338 individuals belonging to 24 species were registered, 21 of them in forest, 11 in pine crops, and 3 in pasturelands with the diversity of amphibians being greater in forest than in pine crops and pasturelands. The forest species composition differed from that in pine crops and pasturelands; nevertheless, in some pine crops with no commercial exploitation during the last 20 years, species common to the forest were recorded. Our results contribute with useful quantitative data for the monitoring of the amphibian diversity in the Colombian Central Cordillera using the NNP *Selva de Florencia* as a reference model. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Amphibian; Assemblages; Endemism; *Selva de Florencia*.

### \*Correspondencia:

Sebastián Duarte-Marín, [sdm950811@gmail.com](mailto:sdm950811@gmail.com), **Recibido:** 12 de marzo de 2018, **Aceptado:** 11 de mayo de 2018, **Editor:** Marta Ramírez Pinilla

## Introducción

Colombia está catalogada como uno de los países más ricos y diversos en fauna y flora (Myers, *et al.*, 2000). Con respecto a los anfibios, en territorio colombiano se han registrado más de 800 especies (>10% de las especies existentes a nivel global), lo que ubica a dicho país como el segundo más diverso en estos vertebrados después de Brasil (Acosta-Galvis, 2018; Frost, 2018). Esta diversidad no se encuentra uniformemente distribuida en Colombia; la región andina, especialmente aquella ubicada entre los 1000 y 3000 m, es la que exhibe la mayor diversidad de especies, muchas de ellas con rangos de distribución restringidos (Lynch, *et al.*, 1997; Bernal & Lynch, 2008; Hutter, *et al.*, 2017). Lo anterior resalta la importancia de implementar estrategias de conservación de anfibios en la región andina de Colombia, región en la cual se concentra más del 66% de la población humana del país y que, por lo tanto, exhibe un alto nivel de deforestación y cambios en el uso del suelo (Rueda-Almonacid, 1999; Armenteras, *et al.*, 2011).

Las áreas protegidas (parques o reservas naturales) son una estrategia útil para la conservación de ecosistemas naturales y de la biodiversidad en ellos existente (Rangel-Churio, 2006); dichas áreas pueden favorecer la persistencia de las poblaciones de anfibios al restringir actividades de origen antropogénico que afectarían negativamente la sobrevivencia y reproducción de los individuos (Lannoo, 2005). El Parque Nacional Natural (PNN) *Selva de Florencia*, ubicado en la cordillera Central de Colombia, es el PNN con mayor diversidad de especies de anfibios por área en todo el país; ya que con base en material colectado en este se han descrito más de 20 especies (Lynch & Rueda-Almonacid, 1997, 1998a, 1998b, 1999; Rueda-Almonacid, *et al.*, 2006; Ruiz-Carranza & Lynch, 1997), muchas de ellas presentes solo en dicho lugar (Rueda-Almonacid, 2000; Ballesteros, *et al.*, 2009). Sin embargo, los estudios con anfibios en el PNN *Selva de Florencia* no han hecho énfasis en la cuantificación de la estructura ni en la composición de los ensamblajes allí presentes, como tampoco han tratado su posible variación espacial de acuerdo con los tipos de hábitat (e.g. bosques, áreas de cultivo, potreros). Estudios que hacen esta cuantificación son frecuentes en la cordillera Occidental y Oriental (e.g. Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona, 2009; Cortés, *et al.*, 2008; Cubides & Urbina-Cardona, 2011; Cortés-Gómez, *et al.*, 2013; Gutiérrez-Lamus, *et al.*, 2004; Méndez-Narváez & Bolívar, 2016), pero son casi ausentes en la cordillera Central de Colombia (salvo por el informe de Hoyos-Hoyos, *et al.*, 2012). Dado que los anfibios en los Andes colombianos exhiben rangos de distribución restringidos y, por lo tanto, presentan un alto nivel de endemismo y recambio espacial de especies (Bernal & Lynch, 2008; Meza-Joya & Torres, 2016), es necesario estudiar directamente la respuesta de los ensamblajes de anfibios a perturbaciones antropogénicas en la cordillera Central, dado que las especies allí presentes

no necesariamente exhiben los mismos niveles de susceptibilidad a cambios en su hábitat como las presentes en las otras dos cordilleras.

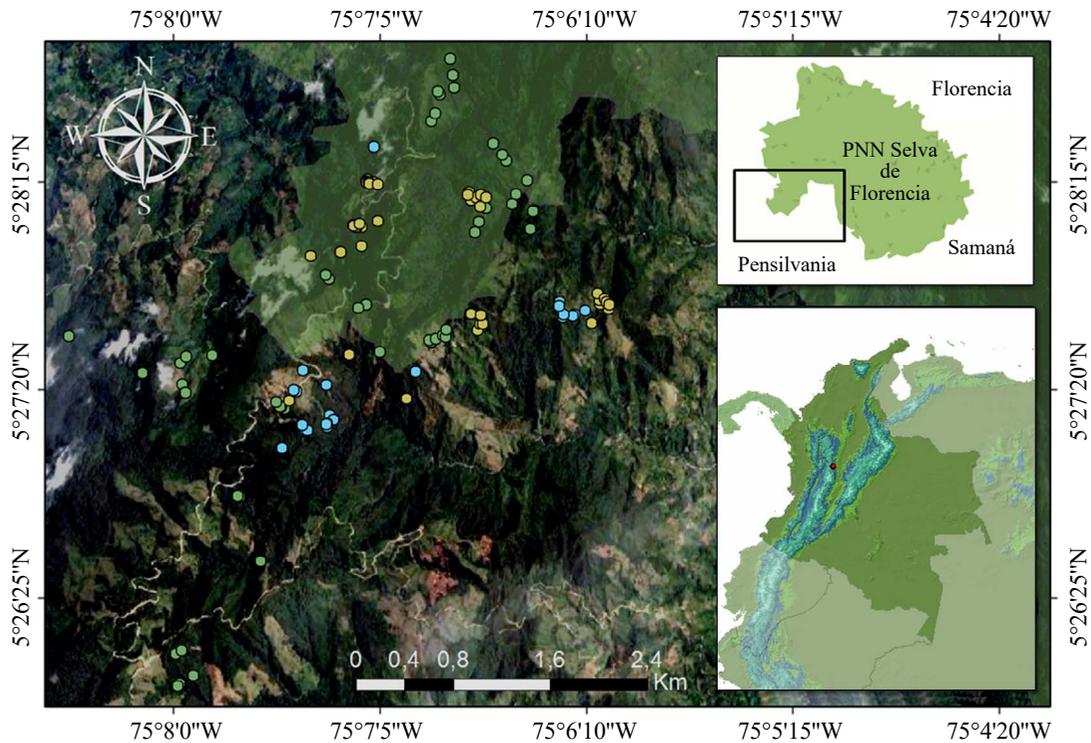
En este estudio se cuantificó la estructura y composición del ensamblaje de anfibios en tres tipos de hábitat (bosque, pinera y pastizales) presentes en el PNN *Selva de Florencia*. Para ello, utilizamos metodologías basadas en medidas de diversidad verdadera (*sensu* Jost, 2007) y análisis de cobertura de muestreo (Chao & Jost, 2012), las cuales permiten comparar la diversidad de especies en espacio o tiempo sin incurrir en los sesgos presentes en metodologías tradicionalmente utilizadas para tal objetivo (Chao & Jost, 2012). Por lo tanto, con el presente estudio esperamos contribuir con un análisis cuantitativo para la monitorización de la diversidad de anfibios en los Andes centrales de Colombia, utilizando como modelo el PNN *Selva de Florencia*.

## Materiales y métodos

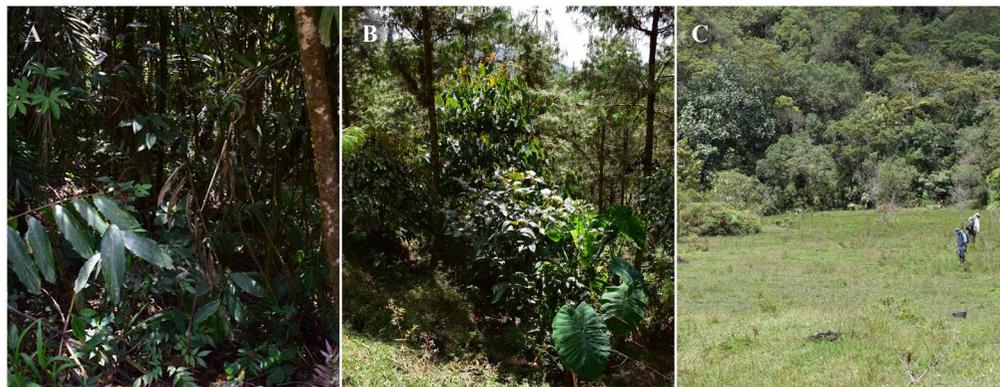
**Área de estudio.** El PNN *Selva de Florencia* está ubicado en el departamento de Caldas, específicamente en la vertiente oriental de la cordillera Central de Colombia. Este PNN tiene una extensión territorial de 10.019 hectáreas y está ubicado entre los 850 y 2400 m, exhibe una temperatura media anual que oscila entre los 17 y 22°C y una precipitación mayor a los 8000mm/año (Ballesteros, *et al.*, 2009). Nuestra área específica de estudio está ubicada en áreas dentro de la jurisdicción del PNN *Selva de Florencia* y su zona de amortiguamiento en la vereda Las Colonias, Sector de Montebello (Ballesteros, *et al.*, 2009) (Figura 1). Esta área se caracteriza por presentar ecosistemas de bosque húmedo altoandino y subandino con hábitats naturales bien conservados y otros de origen antropogénico, que acorde con su localización dentro o fuera de los límites del PNN *Selva de Florencia*, son utilizadas para aprovechamiento forestal y ganadero o han sido asignadas para permitir procesos de sucesión ecológica, respectivamente (Ballesteros *et al.*, 2009).

Este estudio se realizó en tres tipos de hábitat (Figura 2). El hábitat bosque (BOS) se caracteriza por poseer numerosos árboles robustos (DAP > 50 cm) que forman un dosel de aproximadamente 30 metros de altura en los sitios menos perturbados, los árboles que exhiben poco epifitismo, el sotobosque es denso y con una capa delgada de hojarasca. El hábitat cultivos de pino (PIN) corresponde a sistemas de monocultivo para aprovechamiento forestal que forman un dosel de aproximadamente 20 metros de altura; predominan allí árboles de eucalipto y algunas plantas epifitas. El hábitat pastizales (PAS) corresponde a zonas de potrero utilizadas para cría de ganado, donde se encuentran charcas y cañadas temporales o permanentes con poca vegetación emergente y algunos márgenes de vegetación arbustiva y herbácea; los árboles robustos son dispersos y escasos.

**Metodología.** Entre junio y septiembre de 2017 se realizaron tres salidas de campo, cada una con duración de 12 días (Tabla 1). En cada una de ellas se muestrearon los tres tipos de hábitat seleccionados para este estudio,



**Figura 1.** Imagen del PNN *Selva de Florencia* donde se señala el área de estudio y la ubicación de transectos en el hábitat de Bosque (puntos verdes), en Pineras (puntos azules) y Pastizal (puntos amarillos). Algunos puntos pueden estar sobrepuestos debido a la escala de la imagen.



**Figura 2.** Tipos de hábitat muestreados en el PNN *Selva de Florencia*, Departamento de Caldas, Colombia. Bosque (A), Pinera (B) y Pastizal (C).

**Tabla 1.** Distribución y cantidad de transectos no permanentes establecidos en el Parque Nacional Natural *Selva de Florencia*. El número de transectos establecidos cerca de los cuerpos de agua se señalan con asterisco (\*). Bosque (BOS), Pinera (PIN), Pastizal (PAS).

Fecha	Hábitat		
	BOS	PIN	PAS
19-30 de junio	19*/30	3*/30	5*/31
1-12 de agosto	13*/25	0/19	7*/20
8-19 de septiembre	10*/18	2*/14	1*/9
Total	42*/73	5*/63	13*/60

utilizando transectos no permanentes de 100 x 2 metros. Los muestreos en cada transecto fueron llevados a cabo por tres personas tanto en el día (8 am - 11 am) como en la noche (7 pm - 1 am).

A cada individuo observado le fueron registrados los aspectos sugeridos por **Heyer, et al., (1994)** para caracterización de microhábitat, a saber, actividad en el momento de observación, tipo de sustrato (i.e. hoja, tronco, rama, suelo), altura de percha, y ubicación con respecto a cuerpos de agua (cerca, lejos). Además, se registró hora y fecha de encuentro, y se obtuvo la correspondiente georreferencia con un GPS Garmin Oregon 550. Para la identificación de

especies se hizo un registro fotográfico de cada individuo (vista dorsal, ventral y lateral) con una cámara Nikon digital D5300. Algunos individuos que fueron colectados como vouchers fueron eutanizados con lidocaína al 2%, se fijaron en formol al 10% y se preservaron en etanol al 70% (Angulo, *et al.*, 2006). A cada individuo colectado se le retiró un trozo de tejido (corte de extremidad posterior derecha), el cual se conservó en etanol al 96% como muestra para futuros análisis genéticos acorde con los lineamientos sugeridos por Gonzalez & Arenas-Castro (2017). Los individuos colectados y su respectiva muestra de tejido fueron depositados en la colección de Anfibios y Reptiles del Programa de Biología de la Universidad del Quindío, en Armenia, Colombia (Tabla 2). La clasificación taxonómica empleada en este estudio fue acorde con Frost (2018).

**Análisis de datos.** Para establecer y comparar la diversidad de especies entre BOS, PIN y PAS se realizó un análisis de cobertura de muestreo (Chao & Jost, 2012) en la plataforma R v. 3.2.5 (R Core Team, 2016) por medio del paquete iNEXT (Hsieh, *et al.*, 2013). La cobertura de muestreo varía entre 0 y 1, para indicar la probabilidad de que un próximo individuo capturado al azar perteneciera a una de las especies ya registradas en el muestreo. Además, extensiones de este análisis elaboradas por Colwell, *et al.*, (2012) y Chao, *et al.*, (2014) permitieron comparar la diversidad de especies (*sensu* Jost, 2007) entre hábitats, a la vez que se controló por sesgos existentes cada vez que las comparaciones se hacían por tamaño de muestra (principio de duplicidad *sensu* Chao & Jost, 2012).

Los análisis de diversidad utilizan diferentes niveles de sensibilidad a la abundancia relativa de las especies ( $q=0$ ,  $q=1$ ,  $q=2$ ). Cuando  $q=0$ , los cálculos no tienen en cuenta las diferencias en la abundancia de individuos y el resultado es equivalente al número de especies (i.e. riqueza). Cuando  $q=1$ , se ponderan las especies acorde con su abundancia relativa y se obtiene un cálculo correspondiente al exponencial del índice de Shannon-Wiener. Cuando  $q=2$ , el resultado es influenciado principalmente por las especies más abundantes por lo que el cálculo corresponde al inverso del índice de Simpson (Jost, 2007; Jost & González-Oreja, 2012).

Para comparar el nivel de similitud en la composición de especies entre hábitats, se utilizó el índice de Chao-Jaccard (Chao, *et al.*, 2005, 2006) el cual, se calculó en Estimates v. 9.0 (Colwell, 2013) y se graficó en un dendrograma utilizando PAST 3.0 (Hammer, *et al.*, 2001). Este índice es una modificación del índice de similitud de Jaccard que es utilizado tradicionalmente en ecología de comunidades pero que permite corregir sesgos creados por tamaño de muestra y ausencia de registros de especies raras. Además, se calculó la diversidad beta por medio del índice propuesto por Jost (2007), el cual varía entre 1, cuando los ensamblajes a comparar son idénticos, y N (número de ensamblajes) cuando ellos son totalmente diferentes. Dado que la diversidad beta puede reflejar dos procesos diferentes

y antitéticos (Anidamiento: especies de áreas con menor riqueza son subconjuntos de las especies de áreas con mayor riqueza [ $\beta_{NES}$ ], o recambio espacial: remplazo de algunas especies por otras [ $\beta_{SIM}$ ]) (Baselga, 2010), calculamos los índices  $\beta_{NES}$  y  $\beta_{SIM}$  en el paquete estadístico betapart (Baselga & Orme, 2012).

## Resultados

Se registraron 24 especies de anfibios pertenecientes a dos órdenes y seis familias (Tabla 2; Figura 2S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/631/2752>). Cinco especies son endémicas para el PNN *Selva de Florencia*: *Nymphargus spilotos*, *Andinobates daleswansonii*, *Pristimantis fetosus*, *P. tribulosus* y *P. veletis*. Ocho especies se encuentran en alguna categoría de amenaza según la IUCN (2017); dos como Vulnerable (*N. rosada*, *A. daleswansonii*), cuatro En Peligro (*Pristimantis actinolaimus*, *P. dorsopictus*, *P. fetosus*, *P. suetus*), dos en Peligro Crítico (*P. tribulosus*, *P. veletis*) y una con Datos Deficientes (*N. spilotos*). En estos registros y en los análisis cuantitativos de diversidad no fueron incluidos siete individuos de la rana marsupial *Gastrotheca nicefori* dado que fueron registrados con base en cantos y en áreas fuera de los transectos establecidos para nuestros muestreos.

Las características de microhábitat difirieron entre especies (Figura 3). Todas las especies, excepto *P. w-nigrum* y *A. daleswansonii*, fueron arbóreas, sin embargo, se registraron a diferentes rangos de altura y en diversos sustratos asociados al sotobosque. Los sustratos comúnmente utilizado por los individuos fueron hojas de herbáceas, arbustos o helechos. Otra característica del microhábitat en la cual se observó variación entre especies fue en la ubicación con respecto a cuerpos de agua. Diez especies fueron exclusivas de áreas aledañas a quebradas (e.g. *Centrolene antioquiense*, *N. rosada*, *P. actinolaimus*), siete especies fueron exclusivas de áreas alejadas de quebradas (e.g. *A. daleswansonii*, *Bolitoglossa valleculea*, *P. uranobates*), mientras que otras siete habitaron sitios tanto cerca como lejos de ellas (e.g. *P. factiosus*, *P. suetus*, *P. tribulosus*).

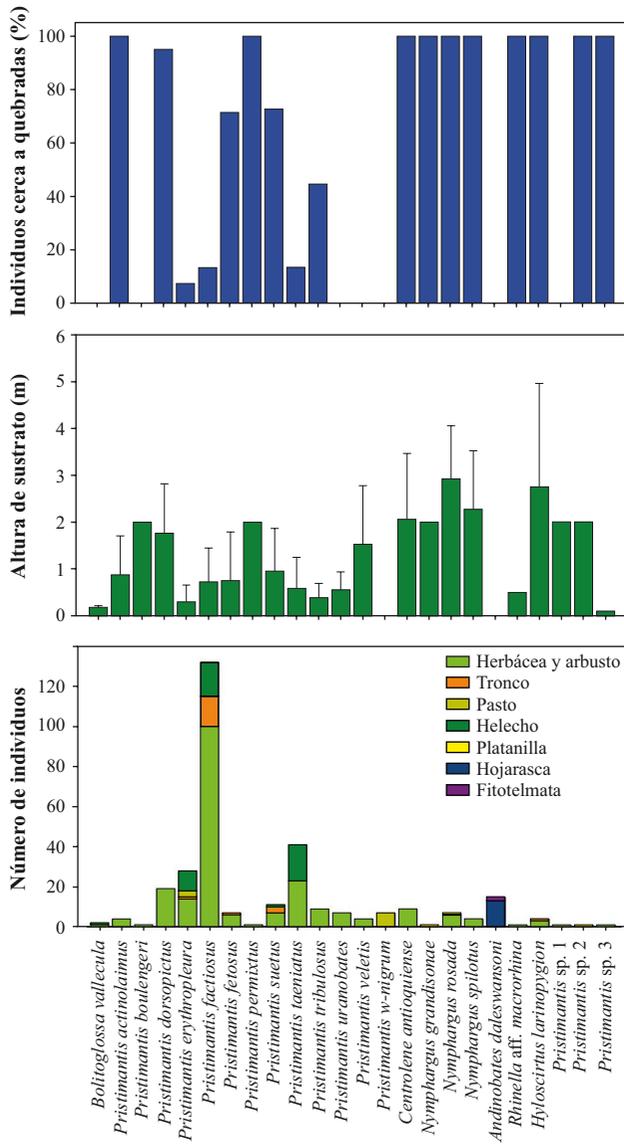
La cobertura de muestreo fue  $\geq 0.95$  para cada uno de los tres tipos de hábitat (Figura 4). Respecto a la diversidad de orden  $q=0$ , esta fue estadísticamente mayor en BOS, intermedia en PIN y más baja en PAS. Sin embargo, para los estimados de diversidad de orden  $q=1$  y  $q=2$ , la diversidad entre PIN y PAS no difirió; BOS siguió siendo significativamente más diversa que PIN y PAS. La estructura del ensamblaje de anfibios en BOS fue menos heterogénea con respecto a la abundancia relativa de las especies que la estructura en PIN y PAS, puesto que en cada una predominó una especie muy abundante (*P. factiosus* y *P. erythropleura*, respectivamente) (Figura 5).

Respecto al recambio de especies entre hábitats, el índice de diversidad beta (= 2.20) y los resultados obtenidos con el análisis de agrupamiento (Figura 1S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/631/2751>),

**Tabla 2.** Riqueza, hábitat, estado de conservación y número de colección de los anfibios registrados en el PNN *Selva de Florencia*, Pensilvania, Departamento de Caldas, Colombia. Arb= arbórea, Terr= terrestre, Diur= diurna, = Noct= nocturna, BOS= bosque, PIN= Pinera, PAS= pastizal. Las especies endémicas para el PNN *Selva de Florencia* se señalan con asterisco (\*). Nivel de amenaza nacional (NAL) acorde a la Resolución No. 1912 del 2017 y el internacional (INT) acorde a la IUCN (<http://www.iucnredlist.org>). Imagen de las especies observadas en este estudio son presentadas en la figura 2S. ARUQ se refiere al código del espécimen (*vouchers*) en la colección de anfibios y reptiles de la Universidad del Quindío, Colombia.

TAXA	Actividad	Hábitat			Nivel de amenaza <sup>1</sup>		Voucher** ARUQ
		BOS	PIN	PAS	NAL	INT	
<b>Orden Caudata</b>							
<b>Plethodontidae</b>							
<i>Bolitoglossa valleculea</i> Brame & Wake, 1963	Arb-Noct		2			LC	785
<b>Orden Anura</b>							
<b>Bufonidae</b>							
<i>Rhinella</i> aff. <i>macrorrhina</i>	Terr-Noct	1					762
<b>Centrolenidae</b>							
<i>Centrolene antioquiense</i> Noble, 1920	Arb-Noct	8	1			NT	789,807,808
<i>Nymphargus grandisonae</i> Cochran & Goin, 1970	Arb-Noct	2				LC	
<i>Nymphargus rosada</i> Ruiz-Carranza & Lynch, 1997	Arb-Noct	6				VU	805,806
<i>Nymphargus spilotus</i> Ruiz-Carranza & Lynch, 1997*	Arb-Noct	4				DD	794,795,796,797
<b>Dendrobatidae</b>							
<i>Andinobates daleswansonii</i> Rueda-Almonacid, et al., 2006*	Terr-Diur	13	2			VU	767,768,775
<b>Hylidae</b>							
<i>Hyloscirtus larinopygion</i> Duellman, 1973	Arb-Noct	4				NT	769,773
<b>Strabomantidae</b>							
<i>Pristimantis actinolaimus</i> Lynch & Rueda-Almonacid, 1998	Arb-Noct	4				VU EN	771
<i>Pristimantis boulengeri</i> Lynch, 1981	Arb-Noct	1					800,801,802,803,804
<i>Pristimantis dorsopictus</i> Rivero & Serna, 1988	Arb-Noct	19	1			EN	759,760,811
<i>Pristimantis erythropleura</i> Boulenger, 1986	Arb/Terr-Noct	2	3	22		LC	778
<i>Pristimantis factiosus</i> Lynch & Rueda-Almonacid, 1998	Arb-Noct	38	98			LC	772,784
<i>Pristimantis fetusus</i> Lynch & Rueda-Almonacid, 1998 *	Arb-Noct	6				VU EN	788,798,799
<i>Pristimantis suetus</i> Lynch & Rueda-Almonacid, 1998	Arb-Noct	10	1			VU EN	763,813
<i>Pristimantis taeniatus</i> Boulenger, 1912	Arb-Noct	6	22	9		LC	780,781,790,809,810
<i>Pristimantis tribulosus</i> Lynch & Rueda-Almonacid, 1997 *	Arb-Noct	5	4			EN CR	761,776,822
<i>Pristimantis</i> cf. <i>permixtus</i> Lynch, Ruiz-Carranza & Ardila-Robayo, 1994	Terr-Noct	1				LC	812
<i>Pristimantis uranobates</i> Lynch, 1991	Arb-Noct	8				LC	777
<i>Pristimantis veletis</i> Ruiz-Carranza & Lynch, 1997 *	Arb-Noct		4			EN CR	779,791
<i>Pristimantis w-nigrum</i> Boettger 1892	Terr-Noct			7		LC	786,787
<i>Pristimantis</i> sp.1	Arb-Noct	1					764
<i>Pristimantis</i> sp.2	Arb-Noct	1					765
<i>Pristimantis</i> sp.3	Arb-Noct	3	3				814,815,816,817,818,819
<b>Número de individuos por hábitat</b>		159	141	38			

1 CR= Peligro crítico, VU= Vulnerable, LC= preocupación menor, NT= casi amenazado, DD= Datos deficientes.



**Figura 3.** Características de microhábitat de los anfibios registrados en el PNN Selva de Florencia. Gráfica superior: ubicación de individuos por especie respecto a cuerpos de agua (quebradas); gráfica intermedia: altura promedio del sustrato en que se observaron los individuos (rangos indican desviación estándar); gráfica inferior: tipo de sustrato en que se encontraron los individuos.

mostraron dos entidades o grupos diferenciados, uno conformado por el ensamblaje de anfibios en PAS y el otro representado por el ensamblaje en PIN y BOS. Un resultado de  $\beta_{NES} = 0.4$  y de  $\beta_{SIM} = 0.27$ , sugiere que las diferencias en composición de especies entre hábitats eran debidas más a un proceso de anidamiento que a un proceso de reemplazo espacial de especies.

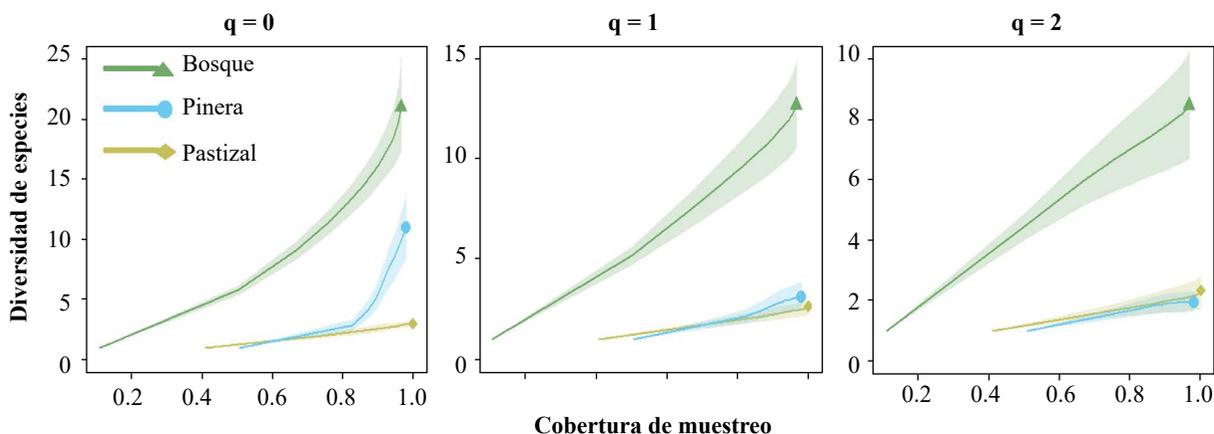
**Discusión**

Reportamos 24 especies de anfibios, 20 de ellas registradas previamente para el área de estudio (Rueda-Almonacid, 2000); entre las cuatro especies adicionales están tres de

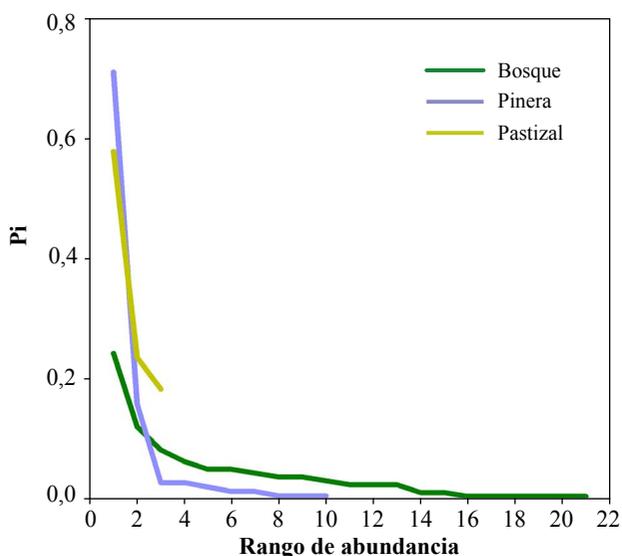
la familia Strabomantidae y una de Centrolenidae. Las tres especies de Strabomantidae no han podido ser asociadas con ningún taxón en particular ya que ellas exhiben variaciones morfológicas importantes que podrían implicar nuevos reportes para la fauna de anfibios del PNN Selva de Florencia o incluso, especies aun no descritas. La especie de Centrolenidae corresponde a *N. spilotos*, rana de cristal endémica del PNN Selva de Florencia, la que solo se había registrado en su localidad tipo (“El Estadero”, corregimiento de Florencia, municipio de Samaná) localizado a 10.2 Km lineales de nuestra área de estudio (Ruíz-Carranza & Lynch, 1997). Otras once especies conocidas en el sector de Montebello no fueron registradas en nuestro estudio (*Centrolene geckoideum*, *C. robledo*, *Hemiphractus johnsoni*, *Hyloscirtus* aff. *simmons*, *Atelopus* sp. nov., *Pristimantis* cf. *cabrerai*, *P. lichenoides*, *P. maculosus*, *P. parvatus*, *P. torrenticola*, *Strabomantis necopinus*). Tres de estas especies (*Atelopus* sp. nov., *P. lichenoides* y *P. torrenticola*) no han sido observadas desde 1994 (Rueda-Almonacid, 2000), lo que genera especial preocupación ya que son endémicas del PNN Selva de Florencia. La ausencia del registro de las otras ocho especies puede deberse a varias razones no excluyentes entre sí, por ejemplo, que sus poblaciones aparentemente exhiben baja densidad de individuos y han sido registradas en localidades específicas no abarcadas en este estudio (Rueda-Almonacid, 2000).

Aunque la cobertura de muestreo fue alta para cada hábitat ( $\geq 0.95$ ), el análisis sugiere que la diversidad de especies en el área de estudio puede aún incrementarse. Además, basados en la relación área – riqueza de especies (Rosenzweig, 1995), es muy probable que estudios futuros en zonas poco muestreadas y de difícil acceso, incrementen la diversidad de anfibios en el PNN Selva de Florencia. Dicha diversidad pudiera incluir especies no descritas formalmente para la ciencia, o especies registradas en sitios cercanos, por ejemplo, *Atopophrynus syntomopus* (Lynch & Ruiz-Carranza, 1982), *Colostethus thorntoni* (Cochran & Goin, 1970), *Hyloscirtus antioquia* (Rivera-Correa & Faivovich, 2013) o *Pristimantis scoloblepharus* (Lynch, 1991).

La mayor diversidad de anfibios en BOS que en PIN y PAS, se atribuye a una mayor complejidad vegetal y cobertura de dosel en BOS. Lo anterior se traduciría en mayor disponibilidad de microhábitats húmedos a nivel del sotobosque, lo cual, es particularmente importante para especies de anfibios con ovoposición fuera del agua, como lo son aquellas presentes en el área de estudio. De hecho, las especies en PAS estuvieron principalmente asociadas a vegetación herbácea y arbustiva, que incluso en zonas sin cobertura de dosel alta, podrían ayudar a mantener una capa de hojarasca y microhábitats húmedos a nivel del suelo. Un patrón similar de incremento en la diversidad de especies de anfibios hacia coberturas boscosas y con mayor complejidad vegetal se ha reportado en otros estudios realizados tanto en la cordillera Occidental (Cortés-Gómez, et al., 2013; Cubides & Urbina-Cardona, 2011; García-R, et al., 2005;



**Figura 4.** Relación entre cobertura de muestreo y diversidad de especies de anfibios en Bosque, Pinera y Pastizal. Los valores de “q” indican el nivel de sensibilidad de los cálculos de diversidad a la abundancia relativa de las especies (ver texto en **Metodología** para detalles). Las áreas sombreadas señalan los intervalos de confianza del 95% correspondiente a cada tipo de hábitat.



**Figura 5.** Gráfica de rango de abundancia que señala diferencias en la estructura de los ensamblajes de anfibios en los tres hábitats incluidos en este estudio.  $P_i$  = Número de individuos especie  $i$  / Número de individuos de todas las especies.

Méndez-Narváez & Bolívar, 2016) como en la cordillera Oriental de Colombia (Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona, 2009; Gutiérrez-Lamus, et al., 2004; Cortés et al., 2008).

Los análisis de composición de especies estuvieron acordes con el patrón que reportamos respecto a la estructura de ensamblajes. Por un lado, las especies de BOS requieren coberturas vegetales densas, algunas de ellas claramente asociadas con cuerpos de agua lóticos; por ejemplo, *N. spilotus*, *N. grandisonae*, *N. rosada*, *C. antioquensis*, *Hyloscirtus larinopygion* y *Pristimantis dorsopictus* (Rivera-Correa & Faivovich, 2013; Rada, et al., 2017). Por otro lado, las especies registradas en PAS y PIN (i.e. *P. erythropleura*, *P. taeniatum* y *P. w-nigrum*) pueden soportar

perturbación en su hábitat, aunque en estos hábitats deben estar presentes microhábitats lo suficientemente húmedos para su reproducción, y para ofrecer refugio e ítems alimenticios (Montes, et al., 2004). Un aspecto a resaltar es el registro en PIN de especies habitualmente consideradas como anfibios de zonas de bosque conservado: *A. daleswansonii*, *B. valleculea*, *P. tribulosus* y *P. veletis*. Además, algunas de estas especies son categorizadas como amenazadas (IUCN, 2017). Lo anterior es acorde con nuestros resultados de  $\beta_{NES}$  y sugiere que PIN provee los recursos suficientes para la subsistencia de un subconjunto de las especies típicas de bosque. Por el contrario, en hábitats cuya cobertura de dosel y heterogeneidad vegetal es altamente reducida (e.g. PAS), empieza a darse un reemplazo de especies de áreas boscosas por especies típicas de áreas abiertas; este proceso es reflejado cuantitativamente en nuestro resultado de  $\beta_{SIM}$ .

Actualmente, se resalta el valor que, en conservación de anfibios, podrían estar jugando bosques secundarios o hábitats perturbados donde se ha permitido que avancen procesos de sucesión ecológica (Herrera-Montes & Brokaw, 2010; Hernández-Ordoñez, et al., 2015; Hilje & Aide, 2012; Russildi, et al., 2016; Zermeño-Hernández, et al., 2016). Sin embargo, algunos estudios no han arrojado resultados que respalden esta hipótesis (Gardner, et al., 2007a, 2007b; Vallan, 2002). La disposición espacial entre hábitats en sucesión y bosques bien conservados que sirvan de fuente de especies ha sido una explicación factible para argumentar por qué la evidencia a este respecto ha sido contradictoria (Pough, et al., 2016). En el caso particular del PNN Selva de Florencia, algunas pineras (PIN) han estado sin aprovechamiento forestal durante casi 20 años (Ballesteros, et al., 2009) permitiendo un incremento en densidad de sotobosque y complejidad de la estructura vegetal (observación personal) que iría acompañada de la recuperación paulatina de los ensamblajes de anfibios, y quizás de otros grupos animales (Johnston & Odun, 1956; Ríos-López, 2007; Cortés-Gómez, et al., 2013). Las áreas

de PIN donde se registraron las especies típicas de bosque están adyacentes o rodeadas por bosque, mientras que en áreas de PIN bordeadas por pastizales solo se observaron especies típicas de áreas abiertas y perturbadas (e.g. *P. w-nigrum*, *P. erythropleura*, *P. taeniatus*).

Un aspecto importante a resaltar es que en nuestros muestreos, tres especies endémicas al PNN *Selva de Florencia* (*P. actinolaimus*, *P. fetosus* y *P. veletis*) fueron registradas exclusivamente en transectos localizados fuera de los límites legales del PNN. Aunque esto no significa que estas especies no sigan estando presentes dentro del PNN *Selva de Florencia* (Lynch & Rueda-Almonacid, 1997, 1998a; Rueda-Almonacid, 2000) si resalta la importancia de implementar planes de manejo en su área de amortiguamiento con el objetivo de fortalecer las estrategias de conservación de los anfibios en la región. Más aún, en dichas áreas de amortiguamiento también se registraron otras especies de anfibios endémicas para el PNN *Selva de Florencia*: *P. tribulosus* y *A. daleswansonii*.

Actualmente, Colombia experimenta una significativa reducción en los tamaños poblacionales de anfibios (Rueda-Almonacid, et al., 2005; Flechas, et al., 2017), lo que se atribuye principalmente a deforestación, cambio climático y enfermedades emergentes (Becker, et al., 2007; Ruiz & Rueda-Almonacid, 2008; Urbina-Cardona, 2016). La presencia del PNN *Selva de Florencia* ayuda a controlar lo que tradicionalmente se ha considerado la causa más importante de pérdida de biodiversidad (i.e. deforestación); sin embargo, los ensamblajes de anfibios ahí presentes no están exentos de los efectos atribuidos a cambio climático y a la presencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis*. Por lo tanto, estudios futuros deberían abarcar la monitorización de poblaciones y ensamblajes de anfibios para evaluar el potencial efecto de estos dos factores. Nuestro estudio ofrece información cuantitativa que servirá de base para dichos monitoreos y los efectos de regeneración natural que actualmente se permiten en el PNN *Selva de Florencia*.

## Conclusiones

La estructura y composición de los ensamblajes de anfibios en bosque (BOS) difiere de aquella en pineras (PIN) y pastizales (PAS). La presencia de especies tradicionalmente asignadas a hábitats boscosos y catalogados con algún grado de amenaza en el hábitat de PIN, sugiere que si los procesos de sucesión ecológica siguen avanzando en este hábitat, ahí se podrían encontrar ensamblajes cada vez más diversos y similares a los presentes en BOS. Por el contrario, en ambientes muy perturbados y cuya heterogeneidad vegetal es altamente reducida, empieza a darse un reemplazo de especies de áreas boscosas por aquellas típicas de áreas abiertas.

## Agradecimientos

Gracias a Parques Nacionales Naturales de Colombia y a Wildlife Conservation Society WCS (bajo el Fondo de Investigación Mono Hernández) por el apoyo financiero y logístico para la realización de este estudio. Igualmente,

gracias a Hugo Ballesteros, Catherine Rodríguez Hurtado, Amilvia Acosta Castañeda, Andrés Felipe Toro Cardona, Johan A. Giraldo Romero, Ricardo A. García Arango, Milton Pineda Duque, José Alzate Henao y Paula A. Navarro-Salcedo, por su invaluable ayuda en el trabajo de campo. Finalmente, agradecemos a Gustavo González-Duran por su ayuda en la determinación taxonómica de las especies, a Martha Patricia Ramírez-Pinilla y a dos evaluadores anónimos por sus comentarios y sugerencias para mejorar este manuscrito.

## Contribución de los autores

Sebastián Duarte-Marín concibió el estudio. Sebastián Duarte-Marín y Fernando Vargas-Salinas establecieron el diseño de muestreo y los análisis de datos. Sebastián Duarte-Marín y Cristian González-Acosta realizaron la toma de datos en campo. Todos los autores participaron en la escritura del manuscrito.

---

## Información suplementaria

---

**Figura 1S.** Nivel de similitud entre tres tipos de hábitat en el PNN *Selva de Florencia* con base en la composición de anfibios presentes en ellos. Medida de distancia basada en el índice de Chao-Jaccard. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/631/2751>

**Figura 2S.** Imagen de los anfibios registrados en el PNN *Selva de Florencia*, Departamento de Caldas. Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/631/2752>

---

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses con respecto al contenido del artículo.

## Referencias

- Acosta-Galvis, A. R. (2018). Lista de los Anfibios de Colombia. Batrachia, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. Disponible en: <http://www.batrachia.com>, accedida entre enero y marzo de 2018.
- Angulo, A., Rueda-Almonacid, J. V. Rodríguez-Mahecha, J. V., La Marca E. (2006). Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la región tropical andina. Conservación Internacional. Serie Manuales de Campo N° 2. Bogotá, Colombia: Panamericana Formas e Impresos S.A. 300 pp.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J., Morales, M. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11: 693-705.
- Ballesteros, H., Arroyave, J. F., Walker, R., Echeverry, L., Acosta, H., Betancourt, A. F., Diaz-Mesa, J., Lopez, M. P., Moreno-Ortiz, E., Villegas, H., Hincapié, W., Lancheros, R., Patiño, M. (2009). Plan de manejo 2008 – 2012 Parque Nacional Natural Selva de Florencia. Corregimiento de Florencia - Samaná (Caldas): Parques Nacionales Naturales de Colombia, 141 pp.

- Baselga, A.** (2010). Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*. **19** (1): 134-143.
- Baselga, A., Orme, C. D. L.** (2012). betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*. **3** (5): 808-812.
- Becker, C., Fonseca, C., Baptista, C., Baptista, R., Prado, P.** (2007). Habitat split and the global decline of amphibians. *Science*. **318**: 1775-1777.
- Bernal, M. H., Lynch, J. D.** (2008). Review and analysis of altitudinal distribution of the Andean anurans in Colombia. *Zootaxa*. **1826** (1): 1-25.
- Cáceres-Andrade, S. P., Urbina-Cardona, J. N.** (2009). Ensamblajes de anuros de sistemas productivos y bosques en el piedemonte llanero, Departamento del Meta, Colombia. *Caldasia*. **31** (1): 175-194.
- Chao, A., Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*. **93**: 2533-2547.
- Chao, A., Gotelli, N., Hsieh, T., Sander, E., Ma, K., Colwell, R., Ellison, A.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. **84**: 45-67.
- Cochran, D. M., Goin, C. J.** (1970). Frogs of Colombia. *Bulletin of the United States National Museum*. **288**: 1-655.
- Colwell, R., Chao, A., Gotelli, N., Lin, S., Mao, C., Chazdon, R., Longino, J.** (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal of Plant Ecology*. **5**: 3-21.
- Colwell, R.** (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1. User's Guide and application. Disponible en: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>, accedida entre enero y junio de 2018.
- Cortés, A. M., Ramírez-Pinilla, M. P., Suárez, H. A., & Tovar, E.** (2008). Edge effects on richness, abundance and diversity of frogs in Andean cloud forest fragments. *South American Journal of Herpetology*, **3** (3): 213-222.
- Cortés-Gómez, A. M., Castro-Herrera, F., Urbina-Cardona, J. N.** (2013). Small changes in vegetation structure create great changes in amphibian ensembles in the Colombian Pacific rainforest. *Tropical Conservation Science*. **6** (6): 749-769.
- Cubides, P. I., Urbina-Cardona, J.** (2011). Anthropogenic disturbance and edge effects on anuran assemblages inhabiting cloud forest fragments in Colombia. *Natureza & Conservacao*. **9**: 39-46.
- Flechas, S. V., Paz, A., Crawford, A. J., Sarmiento, C., Acevedo, A. A., Arboleda, A., Bolívar-García, W., Echeverry-Sandoval, C. L., Franco, R., Mojica, C., Muñoz, A., Palacios-Rodríguez, P., Posso-Terranova, A. M., Quintero-Marín, P., Rueda-Solano, L. A., Castro-Herrera, F., Amézquita, A.** (2017). Current and predicted distribution of the pathogenic fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in Colombia, a hotspot of amphibian biodiversity. *Biotropica*. **49** (5): 685-694.
- Frost, D. R.** (2018). Amphibian Species of the World: an Online Reference. Version 6.0, American Museum of Natural History, New York, USA. Disponible en: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>, accedida entre enero y junio de 2018.
- García-R, J. C., Castro-H, F., Cárdenas-H, H.** (2005). Relación entre la distribución de anuros y variables del hábitat en el sector La Romelia del Parque Nacional Natural Munchique (Cauca, Colombia). *Caldasia*. **27** (2): 299-310.
- Gardner, T. A., Barlow, J., Peres, C. A.** (2007a). Paradox, presumption and pitfalls in conservation biology: the importance of habitat change for amphibians and reptiles. *Biological Conservation*. **138** (1-2): 166-179.
- Gardner, T. A., Ribiciero-Júnior, M. A., Barlow, J. O. S., Ávila Pires, T. C. S., Hoogmoed, M. S., Peres, C. A.** (2007b). The value of primary, secondary, and plantation forests for a neotropical herpetofauna. *Conservation biology*. **21** (3): 775-787.
- Gonzalez M. A., Arenas-Castro, H.** (2017). Recolección de tejidos biológicos para análisis genéticos. Bogotá, Colombia.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 33 pp.
- Gutiérrez-Lamus, D. L., Serrano, V. H., Ramírez-Pinilla, M. P.** (2004). Composición y abundancia de anuros en dos tipos de bosque (natural y cultivado) en la Cordillera Oriental colombiana. *Caldasia*. **26** (1): 245-264.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*. **4**: 1-9.
- Hernández-Ordóñez, O., Urbina-Cardona, N., Martínez-Ramos, M.** (2015). Recovery of amphibian and reptile assemblages during old-field succession of tropical rain forests. *Biotropica*. **47** (3): 377-388.
- Herrera-Montes, A., Brokaw, N.** (2010). Conservation value of tropical secondary forest: a herpetofaunal perspective. *Biological Conservation*. **143** (6): 1414-1422.
- Heyer, W. R., Donnelly, M. A., Mc Diarmid, R. W., Hayek, L. C., Foster, M. S.** (1994). Measuring and monitoring biological diversity: standard methods for amphibians. Washington, USA: Smithsonian Institution Press, 364 pp.
- Hilje, B., Aide, T. M.** (2012). Recovery of amphibian species richness and composition in a chronosequence of secondary forests, northeastern Costa Rica. *Biological Conservation*. **146** (1): 170-176.
- Hoyos-Hoyos, J. M., Isaacs-Cubides, P., Devia, N., Galindo-Urbe, D. M., Acosta-Galvis, A. R.** (2012). An approach to the ecology of the herpetofauna in agroecosystems of the Colombian coffee zone. *South American Journal of Herpetology*. **7** (1): 25-34.
- Hsieh, T., K. Ma., Chao, A.** (2013). iNEXT online: interpolation and extrapolation. Version 1.3.0. Disponible en: <http://glimmer.rstudio.com/tchsieh/inext/>, accedida entre enero y junio de 2018.
- Hutter, C. R., Lambert, S. M., Wiens, J. J.** (2017). Rapid diversification and time explain amphibian richness at different scales in the Tropical Andes, Earth's most biodiverse hotspot. *The American Naturalist*. **190** (6): 828-843.
- IUCN.** (2017). The IUCN Red List of Threatened Species. Versión 2017-3. Disponible en: <http://www.iucnredlist.org>, accedida entre enero y junio de 2018.
- Johnston, W. D., Odum, E. P.** (1956). Breeding bird populations in relation to plant succession on the piedmont of Georgia. *Ecology*. **37**: 50-62.
- Jost, L.** (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*. **88**: 2427-2439.

- Jost, L., González-Oreja, J. A.** (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta Zoológica Lilloana*. **56**: 3-14.
- Lannoo, M. J.** (2005). Amphibian declines: the conservation status of United States species. California, USA: University of California Press, 1115 pp.
- Lynch, J. D.** (1991). New diminutive *Eleutherodactylus* from the cordillera Central of Colombia (Amphibia: Leptodactylidae). *Journal of Herpetology*. **25**: 344-352.
- Lynch, J. D., Rueda-Almonacid, J. V.** (1997). Tres nuevas especies de *Eleutherodactylus*: (Leptodactylidae) de los bosques nublados del este del Departamento de Caldas, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **21** (79): 131-142.
- Lynch, J. D., Rueda-Almonacid, J. V.** (1998a). Especies adicionales de ranas (género *Eleutherodactylus*) de los bosques nublados del Oriente del departamento de Caldas, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **22** (83): 287-298.
- Lynch, J. D., Rueda-Almonacid, J. V.** (1998b). Nuevas ranas del género *Eleutherodactylus* de la vertiente oriental del norte de la Cordillera Central, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **22** (85): 561-570.
- Lynch, J. D., Rueda-Almonacid, J. V.** (1999). Nuevas especies de ranas de altitudes baja y media en un perfil en el flanco oriental de la cordillera Central del Departamento de Caldas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **23** (87): 307-314.
- Lynch, J. D., Ruiz-Carranza, P. M.** (1982). A new genus and species of poison dart frog (Amphibia: Dendrobatidae) from the Andes of northern Colombia. *Proceedings of the Biological Society of Washington*. **95**: 557-562.
- Lynch, J. D., Ruiz-Carranza, P. M., Ardila-Robayo, M. C.** (1997). Patrones biogeográficos de las ranas y sapos de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **21** (80): 237-248.
- Méndez-Narváez, J., Bolívar-G, W.** (2016). Complementary ecological approaches to understand decreases in frog diversity in altered Andean ecosystems. *South American Journal of Herpetology*. **11** (1): 1-11.
- Meza-Joya, F. L., Torres, M.** (2016). Spatial diversity patterns of *Pristimantis* frogs in the Tropical Andes. *Ecology and Evolution*. **6** (7): 1901-1913.
- Montes, A. H., Olaya-M, L. A., Castro-H, F.** (2004). Incidencia de la perturbación antrópica en la diversidad, la riqueza y la distribución de *Eleutherodactylus* (Anura: Leptodactylidae) en un bosque nublado del suroccidente Colombiano. *Caldasia*. **26** (1): 265-274.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., Kent, J.** (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. **403** (6772): 853-858.
- Pough, F. H., Andrews, R. M., Crump, M. L., Savitzky, A. H., Wells, K. D., Brandley, M. C.** (2016). *Herpetology*. 4th edition. Massachusetts, USA: Sinauer Associates, Inc. 591 pp.
- Rada, M., Ospina-Sarria, J. J., Guayasamin, J. M.** (2017). A taxonomic review of Tan-Brown Glassfrogs (Anura: Centrolenidae), with the description of a new species from southwestern Colombia. *South American Journal of Herpetology*. **12** (2): 136-156.
- Rangel-Churio, O. J.** (2006). La biodiversidad de Colombia. Ibagué, Colombia: Universidad del Tolima, 292 pp.
- R Core Team.** (2016). R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>, accedida entre enero y junio de 2018.
- Rios-López, N., Aide, M.** (2007). Herpetofaunal dynamics during secondary succession. *Herpetologica*. **63**: 35-50.
- Rivera-Correa, M., Faivovich, J.** (2013). A new species of *Hyloscirtus* (Anura: Hylidae) from Colombia, with a rediagnosis of *Hyloscirtus larinopygion* (Duellman, 1973). *Herpetologica*. **69**: 298-313.
- Rosenzweig, M. L.** (1995). Species diversity in space and time. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 436 pp.
- Rueda-Almonacid, J. V., Rada, M., Pacheco, Á. A. V. Á., Quevedo, A.** (2006). Two new and exceptional poison dart frogs of the genus *Dendrobates* (Anura: Dendrobatidae) from the Northeastern Flank of the cordillera Central of Colombia. *Zootaxa*. **1259**: 39-54.
- Rueda-Almonacid, J.V.** (1999). Anfibios y reptiles amenazados de extinción en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **23** (Suplemento Especial): 475-497
- Rueda-Almonacid, J.V.** (2000). La herpetofauna de los "Bosques de Florencia", Caldas: una aproximación a su composición, diversidad y relaciones ecológicas. Corporación Autónoma Regional de Caldas. Bogotá, Colombia: CORPOCALDAS.
- Rueda-Almonacid, J. V., Rodríguez-Mahecha, J. V., La Marca, E., Lötters, E., Kahn, T., Angulo, A.** (2005). Ranas arlequines. Bogotá, Colombia: Panamericana Formas e impresos S. A. 200 pp.
- Ruiz, A., Rueda-Almonacid, J. V.** (2008). *Batrachochytrium dendrobatidis* and chytridiomycosis in anuran amphibians of Colombia. *EcoHealth*. **5** (1): 27-33.
- Ruiz-Carranza, P. M., Lynch, J. D.** (1997). Ranas Centrolenidae de Colombia X. Los centrolénidos de un perfil del flanco oriental de la cordillera Central en el Departamento de Caldas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **21** (81): 541-553.
- Russildi, G., Arroyo-Rodríguez, V., Hernández-Ordóñez, O., Pineda, E., Reynoso, V. H.** (2016). Species-and community-level responses to habitat spatial changes in fragmented rainforests: assessing compensatory dynamics in amphibians and reptiles. *Biodiversity and Conservation*. **25** (2): 375-392.
- Urbina-Cardona, J. N.** (2016). Gradientes andinos en la diversidad y patrones de endemismo en anfibios y reptiles de Colombia: Posibles respuestas al cambio climático. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. **7** (1): 74-91.
- Vallan, D.** (2002). Effects of anthropogenic environmental changes on amphibian diversity in the rain forests of eastern Madagascar. *Journal of Tropical Ecology*. **18** (5): 725-742.
- Zermeño-Hernández, I., Pingarroni, A., Martínez-Ramos, M.** (2016). Agricultural land-use diversity and forest regeneration potential in human-modified tropical landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **230**: 210-220.

## Sesión solemne

Durante la sesión solemne especial de celebración del 82 aniversario del establecimiento de la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales**, realizada el miércoles 23 de mayo de 2018, se entregaron las siguientes condecoraciones: Medalla “Luis Eduardo Mora Osejo” a Don Paolo Lugari y la Medalla “General Francisco de Paula Santander” a Don José Félix Patiño y a Don Fernando Sánchez Torres.

Palabras del doctor Enrique Forero  
Presidente de la Academia Colombiana de  
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Las condecoraciones “Medalla Francisco de Paula Santander” y “Medalla Luis Eduardo Mora Osejo” de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

La Junta Directiva de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en uso de sus atribuciones y, en especial, de las contenidas en el literal l) del Artículo 17° de los Estatutos, consideró apropiado exaltar los méritos de aquellos servidores que se han distinguido por su aporte y contribuciones importantes al progreso y desarrollo de la institución. En consecuencia, instituyó la condecoración Medalla Luis Eduardo Mora Osejo.

Así mismo, la Junta Directiva consideró apropiado exaltar los méritos de aquellas personalidades que se han distinguido por sus contribuciones importantes al desarrollo de la ciencia y la educación en Colombia. En consecuencia, instituyó la condecoración Medalla General Francisco de Paula Santander.

La Resolución No. 01 de 2018 indica que la Condecoración **Medalla Luis Eduardo Mora Osejo** “será otorgada a personas naturales que hayan hecho aportes importantes en el ámbito de las ciencias naturales y el medio ambiente, en consonancia con los objetivos y propósitos de la Academia, a través de su vinculación a proyectos de carácter docente, investigativo, de innovación y de desarrollo sostenible a nivel nacional o internacional”. En esta forma se honra la memoria de un ilustre científico colombiano y ex – presidente de la Academia.

El **Doctor Luis Eduardo Mora Osejo** nació en Túquerres el 7 de diciembre de 1931 y falleció en Bogotá, D.C. el 10 de marzo de 2004. Entre 1950 y 1952 adelantó estudios de Botánica Sistemática y Geología en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia. Posteriormente viajó a Alemania donde recibió el título de Doctor en Ciencias Naturales con la distinción Magna cum Laude de la Universidad Johannes Gutenberg, en Maguncia, en 1959. El Dr. Mora Osejo se distinguió por el impulso que siempre dio al estudio de las ciencias naturales y afines en el país. Fue promotor, co-fundador y organizador de la carrera

de Ciencias Naturales en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia en 1959; promotor de la carrera de Agronomía en la Universidad Nacional de Colombia entre 1960 y 1961; fundador y organizador del Instituto Tecnológico Agrícola de la Universidad de Nariño entre los años 1961 y 1965; promotor, fundador y organizador del departamento de Biología y de la carrera de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, durante el periodo 1965 -1970. Así mismo fue autor del programa “Flora de Colombia”, el cual dirigió entre 1978 y 1980.

El Dr. Luis Eduardo Mora Osejo ocupó importantes cargos directivos que incluyen el haber sido Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño (1961-1965), Director del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (1965-1970), Rector de la Universidad de Nariño (1971-1972), Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia (1974-1977) y Director del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia (1980 – 1982).

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales lo recibió como Miembro Correspondiente en 1966 y lo promovió a Miembro de Número en 1972. En el año 1982 fue elegido Presidente de la corporación, cargo que ocupó hasta el año 2002. Durante ese periodo logró la modernización de la Academia, regularizó la publicación de la Revista con el apoyo del Académico Santiago Díaz Piedrahita, creó cuatro colecciones de libros, organizó la comisión de estudios sobre cambio climático y gases de efecto invernadero, y estableció un programa de construcción de la capacidad científica con dos comisiones, una de educación y una de investigación. En uno de sus discursos ante la Academia, el Dr. Mora Osejo hizo énfasis en que “*para crear capacidad es necesario pasar del saber informativo y memorístico al saber inteligente y creativo*”. “*Estamos en esa gran empresa porque en el próximo siglo el conocimiento científico será el factor definitivo para resolver los problemas ambientales, de la producción, económicos y sociales*”.

La Resolución No. 02 de 2018 indica que la Condecoración Medalla General Francisco de Paula Santander “será otorgada a personas naturales o jurídicas que hayan hecho aportes importantes en el ámbito de la política científica y educativa en consonancia con los objetivos y propósitos de

la Academia, y con la visión y el ideario del General Francisco de Paula Santander. En esta forma se honra la memoria de un ilustre militar y estadista colombiano.

El **General Santander** nació en Villa del Rosario el 2 de abril de 1792 y murió en Bogotá el 6 de mayo de 1840. Estudió jurisprudencia y legislación romana y española en el Real Colegio Mayor y Seminario de San Bartolomé. Su fulgurante carrera militar lo llevó a ser designado general a los 27 años de edad. El General Santander se distinguió por las reformas educativas que instauró siendo Presidente de la República, las cuales incluían, entre otras cosas, el mejoramiento de la educación elemental, el establecimiento de escuelas y colegios en diferentes regiones de la Nueva Granada, y la obligatoriedad de la educación para los niños sin distinción de clases sociales, ordenando que en cada parroquia hubiese una escuela, en cada provincia un colegio y en cada “departamento” (en la época: Venezuela, Colombia y Ecuador) una universidad. Fue así como, en 1826, creó la Universidad Central, con sedes en las capitales de los tres “departamentos”, Quito, Bogotá y Caracas.

Para la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales la figura del General Santander reviste particular importancia, ya que en sus diferentes periodos presidenciales impulsó la ciencia, en primer lugar, a través de la Comisión Científica Permanente o Misión Zea que

fue creada mediante decreto del 22 de julio de 1823 y protocolizada según decreto del 28 de julio del mismo año. Por ley del 18 de marzo de 1826 creó la Academia Nacional de Colombia que instaló oficialmente el 25 de diciembre del mismo año. En 1832 fue elegido Presidente de la República y por decreto ejecutivo del 15 de noviembre (basado en la ley del 18 de marzo de 1826) estableció la Academia Nacional de la Nueva Granada, que fue instalada el 6 de enero de 1833.

Santander tenía la convicción plena de que los científicos le ayudarían a fortalecer la Nación, y así lo expresó en su discurso de instalación:

*“La Patria os llama... a componer la Academia Nacional de la Nueva Granada”.*

*“Vuestra comisión se contrae a establecer el imperio de la verdad en esta naciente República, afianzarlo y conservarlo perpetuamente.”*

*“Vuestras luces y vuestro patriotismo me inspiran la más fundada esperanza de que os dedicareis asiduamente a corresponder el bello encargo que la Patria os confía”.*

*“...debemos marchar con el siglo, concurriendo a comunicar a nuestros compatriotas las verdades útiles, que hacen desarrollar la civilización intelectual, industrial y política”.*

Resoluciones por las cuales se crean las condecoraciones

## **Medallas Luis Eduardo Mora Osejo y General Francisco de Paula Santander**

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

### **RESOLUCIÓN No. 01**

16 de mayo de 2018

Por la cual se crea una Condecoración

La Junta Directiva de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en uso de sus atribuciones, y en especial de las contenidas en el literal 1) del Artículo 17° de los Estatutos, y

#### **CONSIDERANDO:**

1. Que la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** debe exaltar los méritos de aquellos servidores que se han distinguido por su aporte y contribuciones meritorias al progreso y desarrollo de la Institución;
2. Que esta exaltación puede lograrse, entre otros, creando un distintivo especial que simbolice dichos méritos;
3. Que es procedente hacer el reconocimiento a los servidores de la Academia que con su trabajo, empeño y aportes, beneficien la consolidación de los objetivos de la Academia en materia de fomento a las ciencias exactas, físicas y naturales, su enseñanza y sus aplicaciones;

4. Que dicho reconocimiento debe referirse a una trayectoria, ya sea personal o institucional, con un beneficio a la comunidad que se proyecte más allá del quehacer cotidiano;
5. Que entre 1982 y 2002 la Academia fue dirigida en forma meritoria por el Doctor Luis Eduardo Mora Osejo, quien la consolidó como entidad representativa de la comunidad científica del país;
6. Que el Doctor Luis Eduardo Mora Osejo impulsó en la Academia la creación de grupos de pensamiento sobre el efecto invernadero y la historia y filosofía de la ciencia, entre otros;
7. Que el doctor Luis Eduardo Mora Osejo ocupó importantes cargos en instituciones académicas como la Universidad

de Nariño, de la cual fue rector, y la Universidad Nacional de Colombia donde fue director del Instituto de Ciencias Naturales y del Departamento de Biología y Decano de la Facultad de Ciencias.

RESUELVE:

**Artículo 1º.** Créase la condecoración “Medalla Luis Eduardo Mora Osejo”, la cual será otorgada a personas naturales que hayan hecho aportes importantes en el ámbito de las ciencias naturales y el medio ambiente, en consonancia con los objetivos y propósitos de la Academia, a través de su vinculación a proyectos de carácter docente, investigativo, de innovación y de desarrollo sostenible a nivel nacional o internacional.

**Artículo 2º.** La condecoración de que trata la presente Resolución se materializará con la entrega de una medalla en metal a la persona o personas naturales merecedoras de la misma. La Medalla penderá de un cordón de color verde y llevará en la parte frontal la imagen del doctor Luis Eduardo Mora Osejo y la inscripción “Medalla Luis Eduardo Mora Osejo” y en el reverso la fecha y el nombre del galardonado. Igualmente, será entregada, en nota de estilo, la Resolución de la Junta Directiva mediante la cual se reconocen las causales por las cuales se otorga la distinción.

**Artículo 3º.** La condecoración “Medalla Luis Eduardo Mora Osejo”, será otorgada por la Junta Directiva de la Academia, por iniciativa propia o a solicitud del Presidente de la Academia.

**Artículo 4º. IMPOSICIÓN DE LA CONDECORACIÓN.** La condecoración “Medalla Luis Eduardo Mora Osejo”, será impuesta por el Presidente de la Academia en la ceremonia académica anual que celebra la efemérides de la Institución.

**Artículo 5º. VIGENCIA Y DEROGATORIAS.** La presente Resolución rige a partir de la fecha de su expedición y deroga las disposiciones que le sean contrarias.

COMUNÍQUESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

Dada en Bogotá, D.C., en la sede de la Academia, a los 16 días del mes de mayo de 2018.

El presidente,  
**ENRIQUE FORERO**

El secretario  
**HORACIO TORRES**

---

## ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

### RESOLUCIÓN No. 02

16 de mayo de 2018

Por la cual se crea una Condecoración

La Junta Directiva de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en uso de sus atribuciones, y en especial de las contenidas en el literal l) del Artículo 17º de los Estatutos, y

CONSIDERANDO:

1. Que la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** debe exaltar los méritos de aquellas personalidades que se han distinguido por sus contribuciones meritorias al desarrollo de la ciencia y la educación en Colombia;
2. Que esta exaltación puede lograrse, entre otros, creando un distintivo especial que simbolice dichos méritos;
3. Que es procedente hacer el reconocimiento a los personajes que con su empeño y sus aportes, propiciaron la creación de la Academia;
4. Que dicho reconocimiento debe referirse a una trayectoria personal con un beneficio a la comunidad que se proyecte más allá del quehacer cotidiano;
5. Que mediante decreto del 22 de julio de 1823 el General Francisco de Paula Santander creó la Comisión Científica Permanente o Misión Zea que fue protocolizada mediante decreto del 28 de julio de 1823;

6. Que en 1826 creó la Academia Nacional de Colombia que fue instalada el 25 de diciembre;
7. Que, basado en la ley de 18 de marzo de 1826, creó la Academia Nacional de la Nueva Granada que fue instalada el 6 de enero de 1833;
8. Que en la sesión de instalación de la Academia Nacional de la Nueva Granada expresó su confianza en que la comunidad científica le ayudaría a trazar los destinos del país con frases como estas: “La Patria os llama por el órgano de gobierno a componer la Academia Nacional de la Nueva Granada. Vuestra comisión se contrae a establecer el imperio de la verdad en esta naciente República, afianzarlo y conservarlo perpetuamente” y “debemos marchar con el siglo, concurriendo a comunicar a nuestros compatriotas las verdades útiles, que hacen desarrollar la civilización intelectual, industrial y política”
9. Que, así mismo, el General Francisco de Paula Santander promovió desde la Presidencia cambios muy profundos en el ámbito de la educación.

RESUELVE:

**Artículo 1º.** Créase la condecoración “Medalla General Francisco de Paula Santander”, la cual será otorgada a personas naturales o jurídicas que hayan hecho aportes importantes en el ámbito de la política científica y educativa, en consonancia con los objetivos y propósitos de la Academia y con la visión y el ideario del General Francisco de Paula Santander.

**Artículo 2º.** La condecoración de que trata la presente Resolución se materializará con la entrega de una medalla en metal a la persona o personas naturales o jurídicas merecedoras de la misma. La Medalla penderá de un cordón de color rojo y llevará en la parte frontal la imagen del General Francisco de Paula Santander y la inscripción “Medalla General Francisco de Paula Santander” y en el reverso la fecha y el nombre del galardonado. Igualmente, será entregada, en nota de estilo, la Resolución de la Junta Directiva mediante la cual se reconocen las causales por las cuales se otorga la distinción.

**Artículo 3º.** La condecoración “Medalla General Francisco de Paula Santander”, será otorgada por la Junta Directiva

de la Academia, por iniciativa propia o a solicitud del presidente de la Academia.

**Artículo 4º. IMPOSICIÓN DE LA CONDECORACIÓN.** La condecoración “Medalla General Francisco de Paula Santander”, será impuesta por el presidente de la Academia en la ceremonia académica anual que celebra la efemérides de la Institución.

**Artículo 5º. VIGENCIA Y DEROGATORIAS.** - La presente Resolución rige a partir de la fecha de su expedición y deroga las disposiciones que le sean contrarias.

COMUNÍQUESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

Dada en Bogotá, D.C., en la sede de la Academia, a los 16 días del mes de mayo de 2018.

El presidente,  
**ENRIQUE FORERO**

El secretario  
**HORACIO TORRES**



▼  
Medalla  
Luis Eduardo Mora Osejo



▼  
Medalla  
General Francisco de Paula Santander

Palabras del doctor Julio Carrizosa Umaña  
Académico honorario de la Academia Colombiana de  
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Hoy sería políticamente correcto describir a Paolo Lugari como un empresario innovador, pero no sería exacto y creo que Paolo rechazaría esa descripción. Paolo rebasa ampliamente la mentalidad empresarial shumpeteriana que hoy nos presentan como el desiderátum para los colombianos. Paolo tampoco puede describirse como uno de los PHDs que aspiran a salvar la nación mediante el desarrollo tecnológico porque Paolo orgullosamente se describe a sí mismo como un *creativo, alejado de la educación formal*.

Difícil describir a Paolo, un creativo que ha recibido el honoris causa de una de las mejores universidades del mundo, porque su vida ha estado dedicada durante estos últimos 50 años, los mismos de la guerra contra las FARC, a cosas muy diferentes a las que se encuentran en los discursos de los que se ocupan en los medios de los problemas colombianos. Paolo se ha ocupado del futuro y, ha pasado de esta preocupación a los hechos, ha construido ese futuro deseado, a escala menor, en una llanura del Vichada *lejos de todo y cerca de nada*, como el mismo lo repite.

Lo que ha inventado Paolo es una colectividad creadora en el centro de la nada y en medio de la guerra, la corrupción y el narcotráfico que afligía a su nación. Por colectividad creadora entiendo aquella en donde cada uno de sus miembros participa en el proceso de cumplir con las necesidades de todos, unas veces expresándolas claramente, criticando lo ofrecido, agradeciendo su solución y otras lanzando ideas, ordenándolas, convirtiéndolas en ejemplos materiales e, inclusive, como ocurre en Gaviotas, fabricándolas para el resto de la Nación.

En estos cincuenta años son muchos los colombianos que bajo la dirección y el entusiasmo de Paolo han participado en esta comunidad creadora. Algunos, especialmente las comunidades indígenas que son sus vecinos, llevan ya dos generaciones de gentes que no solo gozan con los avances tecnológicos sino aportan constantemente ideas, muestras de sus saberes tradicionales, ejemplos de su vivir comunal. Otros han sido forestales, arquitectos, ingenieros, médicos, agrónomos, trabajadores especializados en fábricas y en campos de cultivos que allí han perfeccionado sus destrezas en el convencimiento de que de su trabajo el único que se lucra es el país. Finalmente han estado allí los inventores, profesores de las principales universidades, o gentes del común que nunca habían tenido ni el tiempo ni los recursos ni el apoyo moral para construir los proyectos de su vida.

La lista de los avances logrados es impresionante no solo por su originalidad sino porque todos han sido logrados teniendo en la cabeza no el éxito en el mercado, no en el enriquecimiento personal, sino el bienestar de la región y del país. ¿Por qué, entonces, me decía un amigo, cuando

se habla de las posibilidades de desarrollo de los llanos colombianos, casi nadie menciona ya a Gaviotas? Tal vez, creo, porque Paolo Lugari nunca ha sido políticamente correcto; los presidentes colombianos, uno o dos que lo han apoyado lo han hecho en contra de sus más cercanos asesores y de sus amigos políticos. Hoy para que lo oigan en las oficinas públicas tiene que comprobarles que Gaviotas existe. En el exterior eso es diferente, seis grandes guros globales del pensamiento ambiental: Aurelio Peccei, Lester Brown, Donella Meadows, Alan Weissman, Fritjof Capra y Gunther Paoli han viajado a conocer a Gaviotas y la elogian con entusiasmo y admiración, escriben libros y citan las frases de Paolo. Aunque en el DNP no lo reconozca ahora los avances de Gaviotas se encuentran en las redes y en las grandes bibliotecas, esperando que los colombianos nos intereseamos en ellos. Se puede repetir en este caso la frase clásica acerca de los profetas.

¿Que ha sido lo que entusiasma a los científicos extranjeros y no le llama la atención a los políticos colombianos?. Voy a mencionar tres grandes características de la obra de Lugari; la integralidad del hábitat que construyo, su visión y sus actos precursores del papel de la energía solar en Colombia y su manejo del paisaje de la sabana llanera.

Cuando se visita a Gaviotas es imposible no asombrarse de la integralidad y la coherencia casi absoluta de todos los procesos que se adelantan. No hay detalle que disuene en esa construcción armoniosa con la naturaleza y tal vez eso es lo que más entusiasma a los visitantes cuando después de volar horas sobre el desorden y el deterioro se introducen en el pequeño universo en donde todo coincide con naturaleza que lo rodea y, al mismo tiempo todo significa una nueva forma de ver el mundo, un dejar de imitar y un enfrentamiento continuo con la creación. Las formas y el funcionamiento de las edificaciones, escuelas, hospital, talleres, 45.000 metros cuadrados diseñados, construidos y manejados por los mismos miembros de la comunidad con la mezcla de suelo y cemento inventado para integrar arenas y arcillas de la sabana, los molinos de viento de doble efecto, las cocinas, los destiladores y los secadores solares, los viejos arietes y bombas que habían sido abandonados, resucitados gracias a pequeñas modificaciones de diseño. Todo irradia austeridad e ingenio, entusiasmo por su belleza y muestra alternativas reales a las extravagancias del diseño y de los modos y magnitudes de las inversiones comunes en otros ámbitos. Uno de los más famosos visitantes escribió después esta frase: *invención, ingenuidad, imaginación, entusiasmo viven en paz en medio de un país destrozado por la guerra*.

Pocos colombianos saben que a finales de la década de 1970 en Gaviotas dotó de calentadores solares a toda una urbanización en Bogotá que fue la primera en el mundo que abandonó el carbón, la electricidad y el gas para calentar el agua de la totalidad de sus instalaciones. En su momento varios medios extranjeros divulgaron la noticia como una excentricidad latinoamericana. Eso fue posible gracias a

la primera alianza de Paolo Lugari con la Universidad de los Andes en donde existía un grupo de ingenieros que eran también precursores del tema. Lugari confió en sus prototipos, logró que Mario Calderón Rivera quien era entonces Gerente del Banco Central Hipotecario creyera en su consejo y fue capaz, él, un visionario, de instalar una pequeña fábrica en donde en tiempo record dotó de calentadores a 5.000 familias. Han pasado casi 50 años y hoy la mayoría de las instalaciones de energía solar que emplean en Colombia, son importadas. ¿Qué decir de la falta de visión de nuestros industriales?. ¿Cómo entender esa ignorancia del talento propio y esa dependencia de lo ajeno?

Las imágenes de satélite de las llanuras del Vichada muestran hoy una anomalía junto a las instalaciones originales de Gaviotas: 8.000 hectáreas cubiertas de vegetación arbórea en medio de la sabana tropical. Algunos de los admiradores de Lugari todavía le indagan acerca del proyecto de plantación de pino caribeño que ha tenido tanto éxito y él les contesta con argumentos que ligan su bosque a la historia ecológica de los llanos y los invita a caminar en medio de ese bosque que parecía imposible a todos los expertos y en donde, debajo de los pinos, sin que nadie lo haya sembrado se ha desarrollado un sotobosque de extraordinaria diversidad, 190 especies por hectárea.

Pregunto: ¿Ha sido este un atentado mayor contra el paisaje de la Orinoquia o es el ejemplo de una solución propia para que sea sostenible una vida digna de las comunidades indígenas? Gaviotas está demostrando lo segundo. El bosque de Gaviotas ha mostrado que utilizando micorrizas es posible generar un paisaje de mayor productividad de biomasa y con rentabilidades económicas más altas y no dependientes de la producción de madera. Hoy buena parte de la sostenibilidad económica de Gaviotas se obtiene sin modificar en nada su hábitat, únicamente extrayendo colofonia del bosque. ¿No hay razones para que Paolo recomiende que se siembren árboles en toda la Colombia compleja y deteriorada que no pueda producir eficientemente alimentos?

Es difícil entender como el fundador de Gaviotas logró mantenerla intacta y productiva durante estos 50 años de guerras en medio de corrupción, guerrillas, paras y narcos y que ahora, en estos días, este proponiendo la construcción de urbanizaciones auto sostenibles, desligadas por completo de los sistemas tradicionales de servicios públicos.

Tampoco es fácil comprender lo que sucedió en la década de 1960 en la mente de ese muchacho veinteañero que fue llevado por su padre a conocer los llanos y resolvió dedicar su vida a desarrollar tecnologías adecuadas a la vasta llanura de Vichada que lo enamoró. Tal vez eso tuvo que ver con la biblioteca de su padre, tal vez con la belleza de la llanura, tal vez con las ideas que eran comunes en esa década, ideas de integridad, de verdad, de rebelión. Lo extraño es por qué Paolo no se convirtió en guerrillero, ni en poeta maldito, ni tampoco se le ocurrió construir la hidroeléctrica más grande del mundo con las aguas del Meta y del Vichada sino pensó

que Colombia podría ser pionero en la utilización de la energía solar. Cuanto hubiera ganado Colombia si en la década de 1960 hubiéramos tenido miles de jóvenes como Paolo.

Tal vez no los tuvimos por una razón histórica que varios escritores han resaltado, la importancia de las ideologías a través de la historia de Colombia. Yo prefiero llamarlas imaginarios, imágenes de poder extraordinariamente fuertes que son copiadas exactamente de las que han estado de moda en Europa o en Estados Unidos a lo largo de la construcción de esas naciones y que inútilmente muchísimos jóvenes y viejos ilustres han tratado de reproducir en nuestros trópicos cálidos y fríos. Ante el enorme poder emocional de esas republicas imaginarias de la década de 1960, las que forjaron el Frente Nacional y las guerrillas marxistas, el desarrollo y la revolución, las propuestas científico-tecnológicas-ecológicas de Paolo Lugari poco podían avanzar. Las grandes hidroeléctricas, símbolos de desarrollo económico y de poder político le ganaron la batalla en la década de 1960 a los poderes del sol y del viento y parece que siguen ganando.

*Un texto sin contexto es un pretexto*, repite Paolo y aquí me hace falta un contexto adicional, el de las ideas que he mencionado varias veces. Mario Calderón Rivera escribió todo un libro de 300 páginas para relatar cómo era durante todos estos años el contexto ideológico y político en el que se había desarrollado hasta entonces Gaviotas, Alan Weisman publicó otro sobre el mismo tema de 375 páginas en alemán. Hoy apenas puedo referirme a algunas de sus frases más comunes para tratar de profundizar en el valor del premio que hoy otorga la academia. Calderón Rivera insiste en que el pensamiento de Lugari fue precursor de mucho de lo que se ha venido discutiendo internacionalmente acerca del problema ambiental del planeta. He tratado de explicar porque estas visiones del mundo no era fácil que sobrevivieran en nuestra conformación de imaginarios económicos y políticos, copias exactas de lo que se decía entonces en Europa y en Estados Unidos.

Hoy todavía las ideas de Lugari chocan profundamente con el pensamiento repetido por casi todos los formadores de opinión en Colombia, inclusive por los candidatos a la Presidencia. En la colección de frases hechas, de clichés, como se decía antes, repetidos incansablemente en los medios, no hay cabida para que alguien crea en que es necesario *conciliar la serenidad del científico con el afán de los ejecutores o en que no existe una crisis de energía sino de imaginación*.

Espero que este homenaje que le rinde la Academia al otorgarle la medalla Luis Eduardo Mora Osejo sea el comienzo de un reconocimiento nacional que incida en el aprovechamiento de todos los desarrollos tecnológicos que se han efectuado en Gaviota y que le abra las puertas a miles de colombianos que, afortunadamente, como lo ha pedido Lugari, ya se adentran con su cerebros en la racionalidad tropical.

Palabras del doctor Guillermo Páramo Rocha  
Académico de número de la Academia Colombiana de  
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Al escuchar al doctor Carrizosa y al doctor Lugari, y ahora recientemente la presentación que se hacía del doctor Patiño, recordé algo que decía a mis estudiantes de Antropología en la Universidad Nacional y que repito tal vez con demasiada frecuencia: es la historia de un cronista de Indias que visitó por primera vez a Tenochtitlan, la capital del imperio de los aztecas, y que quedó sorprendido por la magnitud de esa ciudad. Él describió los edificios, los templos, y al llegar a un cierto lugar decía "... y aquí funciona un colegio (o una universidad)". El término universidad tiene una historia en Occidente; tuvo que ver primero con las corporaciones medievales de oficios: antes había universidades de plateros, universidades de pañeros, de bataneros, de panaderos; luego habría universidades de estudiantes y de profesores.

Clavijero, ese cronista que al visitar a Tenochtitlan hablaba de una universidad en el México prehispánico, tal vez no se equivocó: en el sitio que señalaba, los aztecas tenían el Calmécatl. El Calmécatl era una escuela donde se formaban aquellas personas encargadas de leer los códices, de descifrar la historia de los antepasados, de señalar en el cielo los astros, predecir los eclipses, marcar las fechas para las cosechas, para las quemaduras, para las siembras, donde los estudiosos penetraban por primera vez los secretos de la anatomía de los seres humanos, de las poblaciones animales, de los vegetales, de las aguas; donde se iniciaba a los jóvenes en los misterios de los dioses; uno de esos dioses era el patrón del Calmécatl, el señor Quetzalcoatl, la Serpiente Emplumada, quien allí se había ordenado como sacerdote. La Serpiente Emplumada, en cuanto que serpiente, representaba lo duro de la Tierra, las piedras, el mundo cósmico, el de lo oscuro, lo áspero, lo firme; en cuanto que emplumada, era el mundo aéreo, lo impalpable, la luz, lo luminoso, lo iridiscente. Entonces, la imagen del Quetzalcóatl del Calmecatl, dios-serpiente de la tierra, remitía a la vez al cielo y a la luz que estaba con los astros.

Nuestra academia tiene como motto *Pedes in terrae ad sidera visum*, "los pies en la tierra y la mirada en el cielo". Esa frase dice lo mismo que el nombre de Quetzalcoatl le decía a los antiguos mexicanos, y entre nosotros se asocia a las mismas calidades que ellos les atribuían a sus sabios. Quizás esa conjunción de pies en la tierra y mirada en el cielo marque una imagen transcultural del sabio. Dice lo que se acaba de decir del doctor Paolo Lugari; y dice lo que yo diría de Santander, porque siendo un hombre de acción, un guerrero, un político con todas las posibilidades de equivocación que tal cosa conlleva, imaginó y fundó universidades, escuelas, ciencias, leyes, en un país que apenas despertaba. Santander fue un hombre que tuvo siempre los pies en la tierra, pero que, para fortuna nuestra, quizo y supo levantar su mirada hacia los cielos.

Con esa misma frase de nuestro motto quisiera referirme al doctor Fernando Sánchez. Él ha sido, como médico que hace y ve nacer, un hombre de acción, siempre metido en el mundo, en el mundo de la vida y en el mundo para la vida; un hombre que ha dirigido instituciones con pulcritud y con claridad, práctico y eficaz, como lo fue en su calidad de rector de la Universidad Nacional en una experiencia que tuve el privilegio de presenciar cuando fui su decano de Ciencias Humanas. Pero el doctor Sánchez es, por sobre todo, un ser que siempre ha mirado hacia la luz.

El doctor Fernando Sánchez, quien ha pertenecido y pertenece a numerosas asociaciones científicas de Colombia y del exterior, quien ha publicado muy valiosos trabajos científicos y diez y seis libros, quien ha sido Presidente de la Academia Nacional de Medicina y es Profesor Emérito y Honorario de la Universidad Nacional de Colombia, ha conjugado su disciplina, que le ha merecido los más altos reconocimientos nacionales y mundiales (recientemente se le ha otorgado el Premio al Mérito Distinguido, otorgado por la Federación Internacional de Ginecología y Obstetricia de Vancouver, Canadá) con el arte y las humanidades. Es un científico humanista, un científico que puede y tiene la fortuna de combinar el conocimiento de la técnica y la tecnología que impone su profesión, con el estudio de la ética, la literatura, la poesía, el arte. De pocas personas he sabido yo que hayan podido producir con tanta maestría en tan diversos campos.

Tengo de él una hoja de vida que no alcanzaría hoy a leer. Hay algo, sin embargo, que falta en ella: el doctor Fernando Sánchez es, él mismo, un gran artista, un gran pintor; a mi juicio, uno de los grandes retratistas que ha tenido Colombia. Considero que los retratos del doctor Fernando Sánchez son ejemplo de retrato. Los suyos son retratos naturalistas, fieles en el parecido, retratos rigurosos como que surgen de la mano de aquel que es un experto en anatomía y fisiología, pero a la vez son retratos del carácter; puede decirse, inclusive, que lo son del pensamiento del individuo retratado. Son ciencia y arte. No sé si equivoco mis palabras por mi ignorancia en la medicina, pero es mi forma espontánea de pensar que cada obra del doctor Sánchez como retratista es una especie de semiología médica del carácter; el carácter en ella se revela a través de los signos externos, plásticos, de la forma, del contorno, de la luz, de detalles imperceptibles que plasma su pincel pero que uno no logra adivinar. Está allí, recogido en el gesto instantáneo, en la mirada vaga de algunos, a veces en el escorzo de una mano.

La vida del doctor Sánchez, repito, ha sido la de un científico y la de un artista; la de un clínico y la de un humanista; la de un directivo y la de un eticista. Yo como exalumno de la Universidad Nacional, como el docente que fui de esa institución por tanto tiempo, y además como colombiano, quiero agradecer y felicitarle por haber tenido la oportunidad de compartir en algo una vida como esa, y por saber que hay vidas así que reivindican nuestra sociedad,

que le dan esperanza, que señalan caminos por el camino del ejemplo, por el camino de lo que debiéramos imitar y continuar todos los colombianos.

Santander, ese gran hombre que tuvimos en la fundación de nuestra nacionalidad, tuvo la capacidad de mirar siempre lejos sin perder de vista lo que estaba con él en su lugar, en su historia, en su tierra y en su gente. Así lo fue también el querido y eminente profesor Luis Eduardo Mora Osejo, científico y académico ejemplar. La semblanza que magistralmente nos ha trazado el doctor Carrizosa del doctor Lugari es igualmente el de una persona que ha mirado lejos, pero de pie en medio de su paisaje, con sus llanuras y sus plantas; así el doctor Patiño, también un héroe científico

de nuestro país y de nuestra época. El doctor Sánchez es otro de ellos: la orientación que le dio a su rectoría de la Universidad Nacional no ha sido suficientemente valorada, quizás por el momento difícil, traumático, que vivíamos entonces, aunque siempre quiso proyectarla a Colombia y al mundo con toda su enorme potencialidad; hoy sigue siendo un universitario visionario en el Consejo Superior de la Universidad Central.

Una medalla con el nombre de Santander y una con el nombre de Mora Osejo evocan a Santander y Mora Osejo; pienso que los dos estarían muy orgullosos de saber que sus nombres se asocian a los de estas otras figuras que hoy son condecoradas por esta Academia.

## Comentarios de los académicos

### La reserva Thomas van der Hammen y la redefinición de sus linderos: fragmenta y extinguirás

J. Orlando Rangel-Ch.  
Profesor titular, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia; Investigador Emérito Colciencias y Académico de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

#### Origen e historia

La delimitación inicial de un área de protección que permitiera mantener las conexiones bióticas y físicas entre los cerros orientales y occidentales y los territorios del norte y el sur que convergen en la parte plana o antiguo lecho del gran lago de Bogotá, fue el fruto del conocimiento acumulado a lo largo de más de 50 años en torno a su flora, vegetación, geología, sedimentación, precipitación, balance hídrico, conectividad hidráulica y, sobre todo, a la historia natural de los cambios en su geomorfología que condujeron al escenario reciente. La idea original se fundamentó en la selección del área mínima representativa cuyas condiciones para la época (año 2000) mantuvieran la conexión hidráulica-fluvial entre la zona de recarga (cerros orientales), la zona de reserva (laguitos, lagunetas y pantanos de la parte plana) y el costado occidental, incluido el drenaje hacia el río Bogotá.

El análisis de la expansión urbana del distrito capital hacia el norte y las posibilidades de conurbación con las localidades cercanas, especialmente Chía, fueron razones de primer orden para determinar en el escenario geográfico así planteado una franja territorial que incluyera áreas con las condiciones biofísicas originales, que estuviera relativamente cerca de centros de germoplasma nativo e, indudablemente, que su ocupación –en ese entonces– garantizara que no se aumentaría el área sujeta a transformación. En la documentación de la dinámica hidráulica histórica entre el lecho y los cerros, quedaba clara la precaria condición en cuanto al nivel freático

(aguas superficiales) en los cerros debido a las transformaciones radicales producidas por las obras de ingeniería y los asentamientos humanos descontrolados. La desaparición de numerosas quebradas y riachuelos de los cerros (por ejemplo, en Chía), es evidencia de estos cambios, que tienen repercusión directa en la economía hídrica de la región.

Si se examina de manera juiciosa la situación del trayecto entre la calle 26 y el límite con Chía, la única zona que ofrecía condiciones ajustadas a estos preceptos fue la que concibió originalmente el grupo asesor, del Ministerio de Ambiente en ese entonces, liderado por el Profesor, Dr. Thomas van der Hammen. La transformación del territorio en el lecho fluvial es de tal magnitud que las condiciones básicas de conducción y transmisión hidráulica se redujeron o se perdieron porque el ladrillo y el cemento ocuparon todo este espacio y modificaron completamente el escenario original.

Es categórica la consideración de que el sitio y la forma como fue seleccionada la unidad de bloque del territorio original en la propuesta del 2000 era la única opción que hacía viable cumplir con el objetivo del área de conservación.

#### La historia de las propuestas

Entre las propuestas cartográficas (mapas) elaboradas por la comisión de expertos, hay una denominada “bordes norte y occidental” que incluye, entre otras, las áreas urbanas, las áreas de expansión urbana y las áreas rurales en torno a la zona de la reserva. Asimismo, se estableció un polígono denominado zona de reserva forestal AP-2 y áreas contiguas denominadas parques ecológicos de humedales. En otro mapa (propuesta de “uso protección – mapa guía”), aparece la diferenciación entre áreas urbanas y rurales. En el área rural se consideraron las opciones de zona de conservación de suelos (zona rural de la reserva), de santuarios de flora y fauna, incluidos los humedales de Torca, Guaymaral, La Conejera, y el cerro de La Conejera,

el bosque de Las Mercedes y una franja de conexión, restauración y protección que se llamó área forestal protectora. Se consideraron, asimismo, franjas de protección y restauración a los lados de un trazado de la Avenida Longitudinal de Occidente (ALO). Este mapa es un ejemplo claro y didáctico de una propuesta original de clasificación del territorio sobre la base del conocimiento y de los objetos de conservación. Estos mapas y los documentos elaborados por la comisión asesora sirvieron para los pronunciamientos del Ministerio del Medio Ambiente en ese entonces, como la resolución 0475, expedida el 17 de mayo de 2000, por medio de la cual se declararon como áreas protegidas las zonas reseñadas e incluidas en ellos. En el 2011 se declaró oficialmente la reserva con el nombre de Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá D.C. “Thomas Van der Hammen”. Entre el 2013 y el 2014 la CAR hizo la zonificación ambiental, la cual contempló las categorías de preservación, restauración, uso sostenible y protección del paisaje, como es usual en este tipo de trabajos.

### **La situación actual**

En el 2015 la CAR llamó a concurso de méritos para elaborar un plan de uso público de la reserva Thomas Van der Hammen. La revisión de los mapas elaborados para este ejercicio, disponibles en el portal de la CAR, permite estos comentarios:

*Mapa 01, denominado “Recursos de interés ambiental”.* En este, inexplicablemente se cambió la finalidad del plan de manejo de la zonificación ambiental del 2013-2014. En esta versión se incluyeron nuevas clases en áreas como la del turismo científico, especialmente en los alrededores de los humedales, que debe ser una zona de especial cuidado por ser refugio de fauna, principalmente de aves migratorias. Se propusieron, además, varias dependencias cuya construcción y adecuación generarían más impacto y deforestación, así como oficinas administrativas, parqueaderos vehiculares y de bicicletas, y centros de interpretación y de cultura. Se agregaron, también, unas categorías en la zonificación cuya implementación es una incógnita, por ejemplo, turismo de aventura, agroturismo y ecoturismo.

*Mapa 02, denominado “Senderos y señalización”.* En este, según la convención, se incluyeron 16 senderos, es decir, 16 áreas pequeñas (fragmentos) de lo que era la unidad original de territorio. También se indicaron nuevas intervenciones que seguramente generarán impacto, como un centro médico, una estación de servicio, un jardín botánico y oficinas administrativas.

*Mapa 03, denominado “Zonificación”.* En este llama la atención la argumentación conceptual utilizada para esta pretendida “zonificación”. Es conveniente conocer las citas bibliográficas que se utilizaron o que sirvieron de fundamento teórico, puesto que las categorías empleadas se relacionan todas con la intervención y la transformación

del entorno natural por parte del hombre. Cabe preguntarse dónde quedaron las categorías universalmente aceptadas en cualquier zonificación ambiental (zona de preservación, de restauración, de uso sostenible).

### **La puntada final: la propuesta de redefinición de linderos de la Alcaldía de abril de 2018**

El 22 de febrero de 2018 se expidió la resolución 0264 del Ministerio y de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por medio de la cual “los procesos de recategorización, integración y realideración de las reservas forestales de orden regional serán efectuadas por las corporaciones autónomas regionales y desarrollo sostenible”, con la cual prácticamente se abrió camino a la intervención de la Alcaldía de Bogotá. Del voluminoso informe que presentó la Alcaldía para este fin, se pueden considerar las extensas descripciones de los mapas. Hay uno (sin denominación) que incluye un apartado designado como reserva vial, el cual traza una cuadrícula del polígono original y las partes adicionales (principalmente el cerro de La Conejera) y produce en forma aproximada unas 16 áreas pequeñas bautizadas como reservas delimitadas y áreas de estudio. Curiosamente, las “vías” (ciclorruta, separador, andén perimetral) modifican totalmente el bloque original de territorio. Hay otro mapa (figura 8-25), muy general y sin toponimia que facilite su comprensión, denominado de “zonificación” dentro de la reserva nuevamente delimitada, en el que se contemplan dos categorías principales, área de estudio y de reserva delimitada, y en esta última, una zonificación con las clases de preservación, restauración y uso sostenible. En la de preservación únicamente aparece el cerro de La Conejera, en tanto que las zonas originales de preservación, que incluían las cercanías de los humedales (Guaymaral), no se visualizan, y en la zona de restauración, cada bloque de área queda casi completamente aislado. En los diseños que se proponen, se ignoraron los principios y recomendaciones básicas de la ciencia de la conservación. Si los mapas mencionados se evaluaran desde una óptica netamente académica, deberían archivarse por improcedentes, tendenciosos y mal fundamentados.

### **Reflexión final**

En conservación y manejo del medio natural no es posible considerar el escenario propuesto por la Alcaldía, es decir, numerosas áreas separadas, con impedimentos de conectividad, que no ofrecen las condiciones de un bloque continuo de territorio. Resultan incomprensibles las ponderaciones efectuadas para proponer tamaña división arbitraria del paisaje. La propuesta de la Alcaldía conduce inexorablemente a la fragmentación total del bloque de área originalmente propuesto, condición que hará inútil cualquier intento de restauración y recuperación de la biodiversidad original. Si se acepta la redefinición de linderos de la Alcaldía, sus desatinados propósitos lograrán cumplir con la máxima de “fragmenta y extinguirás”.

## Hace tiempo. Un viaje paleontológico ilustrado por Colombia

Jaramillo, C., Oviedo, L. (Editores)

Casa Editorial Instituto Alexander von Humboldt  
e Instituto Smithsonian de Investigaciones  
Tropicales

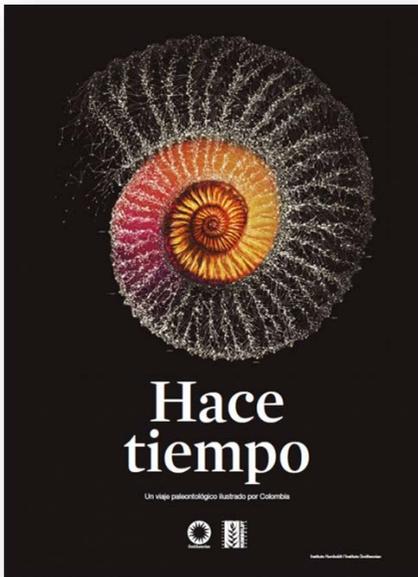
124 p. 25 capítulos.

ISBN obra impresa 978-958-5418-20-2

ISBN obra digital 978-958-5418-23-3

Primera edición, diciembre de 2017.

La versión digital del libro se puede obtener sin  
costo alguno en [http://www.humboldt.org.co/es/  
component/k2/item/1198-hace-tiempo-libro](http://www.humboldt.org.co/es/component/k2/item/1198-hace-tiempo-libro)



El libro que editan Carlos Jaramillo y Luz Elena Oviedo, es una obra de divulgación dirigida a aquellos que estén interesados en conocer los cambios en los paisajes y la vida en Colombia en los últimos 400 millones de años. Representa el resultado de numerosos trabajos científicos en Geología y Paleontología (estudio de la vida antigua a través de los fósiles), desarrollados por una nueva generación de profesionales colombianos que tienen una formación especializada en estos temas. El libro está organizado en tres partes. La primera (¿Cómo?) nos define de manera sencilla algunos de los mecanismos que han modificado los seres vivos y su distribución geográfica a través del tiempo, y cómo se preservan en las rocas. La segunda (¿Cuándo?), nos ilustra las condiciones geográficas, climáticas y los tipos de seres vivos que existían para diferentes periodos de tiempo en nuestro país. La tercera (¿Quiénes?), describe algunos de los animales y plantas que habitaron estos antiguos ecosistemas, muchos de ellos extintos en la actualidad. Al final presenta la lista de autores y su afiliación, un pequeño glosario, lecturas suplementarias sugeridas y preguntas para reflexionar.

La obra tiene hermosas y originales ilustraciones, con un lenguaje ameno y balanceado, que le permite al lector hacer un viaje imaginario a través de los paisajes antiguos de Colombia y sus habitantes. Es de resaltar que una gran parte de los autores del libro se encuentran radicados en el exterior, algunos de ellos realizando estudios de posgrado. Espero que, con un incremento en el apoyo a la investigación básica en el país, puedan regresar a integrarse en nuestras universidades e institutos para desarrollar a largo plazo líneas y proyectos de investigación. La historia geológica, de nuestro país y de la tierra en general, ha tenido poca difusión en el amplio público en Colombia, y, como académicos, es un deber que tenemos con la sociedad. Grandes y pequeños deben conocerla y disfrutarla. **Hace Tiempo** es un libro que Colombia necesitaba, y espero que sea el comienzo de muchas propuestas que nos permitan emprender viajes hacia el pasado en nuevos sitios y con protagonistas diferentes...

**Andrés Pardo Trujillo**

Profesor Titular, Departamento de Ciencias Geológicas,  
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

## Facultad de Medicina 75 años entregando el corazón Pontificia Universidad Javeriana

### Casa editora:

Editorial Pontificia Universidad Javeriana

**Ciudad:** Bogotá

**País:** Colombia

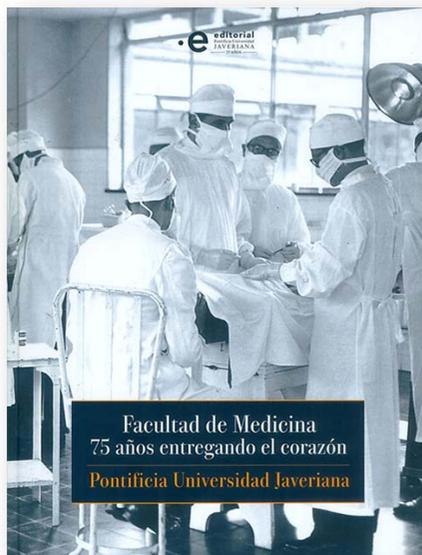
**Año:** 2017

**Número de páginas:** 192

**Tamaño:** 28 cm

**Pasta:** dura (hardcover)

**ISBN:** 978-958-781-131-5



En lujosa edición, un libro de 200 páginas exuberantemente ilustrado relata la historia de la Facultad de Medicina de Universidad Javeriana, fundada en 1942 durante la rectoría del legendario académico Padre Félix Restrepo, S.J., y que cumplió en 2017 los 75 años bajo la rectoría brillante del Padre Jorge Humberto Peláez, S.J.

Producto de la Editorial Pontificia Universidad Javeriana con el ISBN 978-958-781-131-4, este bello libro comienza con un Proemio por el Decano del Medio Universitario, historiador Jairo Bernal Parra, S.J., nombrado en 1997: “Tan pronto pisé la Facultad me di cuenta de la enorme diferencia que existe entre esta carrera y cualquiera otra.” Luego viene un Prefacio escrito por la Decana Académica en el periodo 2011-2017, primera mujer en ocupar el elevado cargo, Mary Bermúdez Gómez, MD, MSc, quien escribe que este libro es un testimonio de gratitud y un homenaje a la Pontificia Universidad Javeriana y a todos aquellos que han sido parte de la historia de la Facultad, especialmente a los maestros que han procurado “que cada generación de médicos y especialistas javerianos sea cada vez mejor”. La Introducción, a cargo tres de las más distinguidas figuras de la Facultad, Alberto Gómez, PhD, FLS, Francisco J. Henao, MD y Álvaro J. Ruiz, MD, MSc, dice: “Centrada en el legado majestuoso de la Compañía de Jesús, y en la polifacética personalidad del Padre Félix, surgió una Facultad en donde la formación integral es su atractor central...”

Estupenda la presentación del Acta de Fundación de la Facultad de Medicina, que en bella caligrafía aparece en 11 páginas. En las páginas siguientes llama la atención el cuadro que presenta los Decanos Académicos, comenzando con José del Carmen Acosta hasta el actual, Carlos Gómez Restrepo, 12 en total, y los Decanos del Medio, Alberto Duque, S.J., el primero, en los años 1955-1957, hasta el actual, Sergio Bernal, S.J., diez en total. El Padre J. H. Peláez, S.J., ha estado muy cerca de la Facultad de Medicina, primero como Decano del Medio en el período 1986-1996, y luego Rector de la seccional de la Universidad Javeriana en Cali antes de regresar a Bogotá para asumir la Rectoría de la sede central de la Pontificia Universidad Javeriana.

El libro relata la primera cátedra de medicina en nuestro país, por entonces el Nuevo Reino de Granada, en 1636, a cargo del licenciado Rodrigo Enríquez de Andrade, médico graduado en la Universidad de Alcalá de Henares; describe e ilustra la magnífica biblioteca de los jesuitas; el Hospital de la Providencia, primer hospital que tuvo la Facultad, acondicionado en un viejo edificio y que solo prestaba servicios de obstetricia y pediatría; en otro cuadro histórico aparecen los hitos en el desarrollo de la Facultad de Medicina, incluyendo la creación de la Asociación Colombiana de Facultades de Medicina (Ascofame) en sus instalaciones en 1959; se describen las reformas curriculares a lo largo de sus 75 años, y la creación de los diferentes departamentos y de los posgrados; se refiere a los profesores y a los profesores emblemáticos, entre ellos el famoso Kalman Mezey; describe la creación del Hospital Universitario San Ignacio; también se refiere a los estudiantes y destaca a quien de estudiante pasó e profesora, la psiquiatra María Cristina Aitken de Taborda; se describe e ilustra el desarrollo de la investigación; aparecen departamentos tan destacados como Epidemiología Clínica, realmente pionero en Colombia, y los Institutos de Envejecimiento, de Promoción de la Salud y el muy reconocido Instituto de Genética Humana; se describe uno de los proyectos colombianos más ambiciosos de los años recientes, la Expedición Humana, dirigida por Jaime Bernal Villegas.

Personalmente siempre he creído que la educación superior moderna se construyó sobre tres baluartes; el *Ratio Studiorum* de los jesuitas publicado en 1599, el *Yale Report* de 1828 y *La Idea de una Universidad*, por el Cardenal J.H. Newman de Oxford, publicado en 1852. Fiel a su magnífica tradición como educadora, que formalizó en el campo de la educación superior en el siglo XVI con el *Ratio Studiorum*, la Compañía de Jesús presenta hoy una de las facultades de medicina de la más alta calidad en el panorama latinoamericano.

Loor y honor a la Universidad Javeriana y a su Facultad de Medicina en sus setenta y cinco años, facultad que tanto ha aportado a Colombia y a la medicina como profesión y como ciencia.

Este libro es de verdad un deleite intelectual, bibliográfico y artístico. Es el relato de una formidable empresa académica, la Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Javeriana, obra de la Compañía de Jesús, dedicada a la educación en el mundo.

**José Félix Patiño Restrepo, MD**

## Enfoque y alcance

---

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

## Proceso de evaluación por pares

---

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los

autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

## Ética de la publicación

---

La **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN)**, acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics (COPE)*. Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct:

<https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

## Política de acceso abierto

---

La página web de la Revista ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

## Directrices para autores

---

### Tipología de los artículos publicados en la Revista

**Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

**Artículos cortos:** documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

**Artículos de posesión o artículos de revisión de tema:** documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de

desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

**Cartas al editor:** posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

**Comentarios bibliográficos:** son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

### Corrección de los autores

### Fe de erratas

### Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.

5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

### Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Research and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Research and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

## Estructura del manuscrito

**Introducción:** se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

**Materiales y métodos:** se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

**Análisis estadístico:** señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

**Resultados:** deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

**Discusión:** debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

**Conclusiones:** deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

**Referencias:** todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

**Lista de referencias.** Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

### Artículo de revista

**Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen:** pp-pp.

Ejemplo

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

### Libro

**Apellido, A. A.** (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

### Capítulo de libro

**Apellido, A. A., Apellido, B. B.** (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

### Revista en línea

**Apellido, A. A.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

### Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). *AlgaeBase*. Worldwide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

**Tablas y figuras:** las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábica de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

**Agradecimientos:** podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

### Consideraciones

---

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

### Corrección de estilo y publicación del manuscrito

---

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

### Rectificaciones y correcciones de errores

---

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

### Falsificación de artículos

---

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

### Conflicto de intereses

---

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

### Transferencia de derechos de autor

---

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

## Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.
- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
- c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
- d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
- e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

## Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los

coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

## Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

## Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

### 1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.

- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.
- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

## 2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés.
- Título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
- Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

## 3. Estructura del artículo

Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Key words).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

## 4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original.

Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPEG o PNG.

## 5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

## 6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

## 7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

## 8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

## 9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

## 10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos

## Focus and Scope

---

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

## Peer Review Process

---

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

## Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

---

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct:

<https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

## Open access policy

---

The journal enables open access to published articles via its website ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

## Author Guidelines

---

**Research articles.** A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

**Brief articles.** Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

**Inaugural articles or Review articles.** Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

**Letters to the editor.** Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

**Book reviews.** Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

## Authors correction

## Errata

## Information for Authors

---

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

## Submission and Presentation of manuscript

---

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.

2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

## Manuscript Structure

---

**Introduction:** there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

**Materials and methods:** a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

**Statistical analysis:** indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

**Results:** these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

**Discussion:** emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

**Conclusions:** an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

**References:** these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

**Reference list:** alphabetically and following the examples

### Journal article

**Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C.** (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

#### Example

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7**: 33-40.

#### Book

**Last name, A. A.** (year). Title, City, Country: Publisher

#### Example

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

#### Book chapter

**Last name, A. A., Last name, B. B.** (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), *Book title* (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

#### Example

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

#### Journal on line

**Last name, A. A.** (Year). Article title. *Journal*, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>

#### Examples

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

#### References web pages

Date of the access

#### Example

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

**Tables and graphics:** The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect

to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

**Acknowledgments:** These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

#### Considerations

---

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

## Copyright Notice

---

### Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

### Transfer of author rights

---

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights

of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

### Privacy Statement

---

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

## Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

### 1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.

- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

### 2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English.

- Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures.
- Figures in jpg or tiff format.

### 3. Structure of the article

The following sections are to be included:

1. An abstract should be included in both Spanish and English.
2. Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
3. Introduction.
4. Materials and methods.
5. Results and Discussion for short communications.
6. Discussion.
7. Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
8. Declaration of conflict of interest.

### 4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or tiff format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o PNG format

### 5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

### 6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

### 7. Abbreviations

The first use is introduced in parentheses

### 8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

### 9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

### 10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

