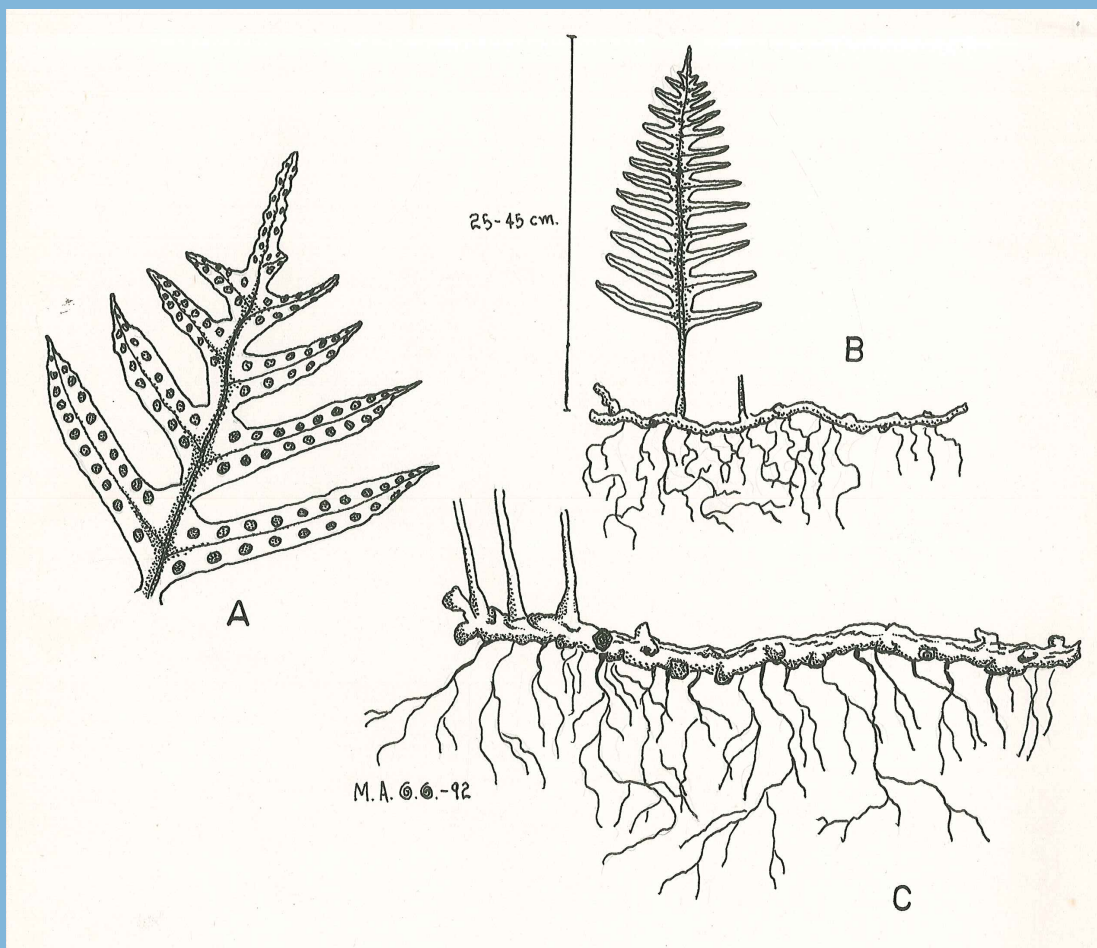


# MUTIS

REVISTA ELECTRÓNICA EDITADA POR LA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

EDITORIAL  
**UTADEO**

# MUTIS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano  
Jefatura de Publicaciones  
Carrera 4 n.º 23-76, Módulo 29, of. 203  
Piso 2, Bogotá, D. C., Colombia  
Tel: (571) 242 7030, Exts. 3120-3132

e-ISSN: 2256-1498  
DOI: <https://doi.org/10.21789/issn.2256-1498>  
[revista.mutis@utadeo.edu.co](mailto:revista.mutis@utadeo.edu.co)

Rectora  
CECILIA MARÍA VÉLEZ WHITE

Vicerrectora Académica  
MARGARITA MARÍA PEÑA BORRERO

Vicerrectora Administrativa  
NOHEMY ARIAS OTERO

Director de Investigación, Creación y Extensión  
LEONARDO PINEDA SERNA

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales  
e Ingeniería  
ISAAC DYNER REZONZEW

Jefe de Publicaciones  
MARCO GIRALDO BARRETO

Coordinador Editorial  
JUAN CARLOS GARCÍA SAENZ

Director de Arte y Diseño  
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Corrector de estilo  
LEONARDO PAIPILLA PARDO

Diagramación  
MARY LIDIA MOLINA BERNAL

*Mutis* es una publicación electrónica semestral de ciencia e investigación editada por la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

## Editor

GERARD OLIVAR TOST

## Editores de sección

JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ  
Ciencias Naturales

CÉSAR DÍAZ  
Ingeniería

## Comité Editorial

ISAAC DYNER REZONZEW  
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia  
MICHAEL J. AHRENS  
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia  
LEONARDO MARIÑO RAMÍREZ  
NCBI - National Center for Biotechnology Information,  
Bethesda MD, EE. UU.  
MYRON SPECTOR  
Harvard University, EE. UU.

## Comité Científico

MÓNICA PUYANA HEGEDUS  
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia  
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR  
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia  
ALBA GRACIELA ÁVILA  
Universidad de los Andes, Colombia  
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ  
Universidad de La Sabana, Colombia  
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS  
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca,  
Colombia

Actualmente el contenido está indexado e incluido en EBSCO, Latindex, DOAJ, BASE, Google Scholar, REDIB, Academia.edu, Mendeley, Directory of Research Journals Indexing, ROAD



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

# CONTENIDO

Vol. 8 n.º 2, julio-diciembre 2018

## Editorial

Gerard Olivar-Tost 5

---

## ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

---

*Flora Farallonensis* I: los helechos del bosque premontano de Pico de Águila

*Flora Farallonensis* I: The Ferns of *Pico de Águila* Premontane Forest

Miguel Ángel Gamboa-Gaitán 7

---

Crecimiento y pigmentos de *Spirulina subsalsa* cultivada a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno

Growth and Pigments of *Spirulina subsalsa* Grown at Different Salinities and Nitrogen Concentrations

Lolymar Romero Maza, Miguel Guevara y José Félix Bernal 25

---

Efecto del almidón y dos fitorreguladores sobre la germinación de *Prosthechea* sp.

Effect of Starch and Two Phyto regulators on the Germination Process of *Prosthechea* sp.

César Ariza, Edwin Deaza, Arlette Gil y Cristian Orjuela 37

---

Evaluación de cenizas volantes como material adsorbente para la remoción de  $Pb^{2+}$  en solución acuosa

Evaluation of Fly Ash as an Adsorbent Material for the Removal of  $Pb^{2+}$  in an Aqueous Solution

Óscar Leonardo Ortiz Medina, Rafael Nikolay Agudelo Valencia, Lina María Tovar Castañeda y Natalia Gutiérrez Camargo 47

---

Contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre

Environmental Pollution Caused by Non-ionizing Electromagnetic Waves from Wireless Technologies in Outdoor Environments

Óscar Gerardo Barrera Monsalve y Jemay Mosquera Téllez 57

---

Dinámica no lineal del mercado del café en Colombia

Non-linear Dynamics of the Coffee Market in Colombia

Cristian Felipe Jiménez Varón y Reinel Tabares Soto 73

---

Propuesta de modelo en dinámica de sistemas para la toma de decisiones en la selección de proyectos verdes

A Systems Dynamics Model for Decision-making in the Selection of Green Projects

Julián Andrés Castrillón Gómez y Johnny Valencia Calvo 84

---

Instrucciones para autores

95

---



## EDITORIAL

Vol. 8 (2) pp. 5-6, julio-diciembre del 2018

### Apreciados lectores:

Es un placer saludarlos en este segundo número del año.

En esta ocasión contamos con siete artículos en diferentes áreas y de muy diversa procedencia. Con el primero de ellos esperamos iniciar una serie de contribuciones respecto a la flora del Parque Nacional Natural los Farallones de Cali. Los dos artículos siguientes nos muestran estrategias y efectos relacionados también con el estudio de flora vegetal, específicamente un alga y una orquídea. A continuación, se presenta una contribución en ingeniería química sobre la posibilidad de utilizar cenizas. Por su parte, una contribución adicional sobre electromagnetismo da a conocer los efectos de las tecnologías inalámbricas. Posteriormente, se incluye un artículo sobre modelamiento en el ámbito de los mercados del café. Por último, cierra este número una contribución sobre estrategias de priorización de proyectos verdes.

Concretamente, en el primer artículo de la serie *Flora Farallonensis*, el autor, Gamboa-Gaitán, estudia los helechos de la vereda Pico del Águila, ubicada dentro del Parque Nacional Natural los Farallones de Cali, presentando una caracterización de la especie, así como sus datos biogeográficos y algunas ilustraciones.

La segunda contribución, de autoría de Romero Maza y colaboradores, aborda un tema de investigación relacionado con el crecimiento y los pigmentos de la *Spirulina* al modificar las concentraciones de nitrógeno y la salinidad de dicho compuesto. Este trabajo evalúa el crecimiento y el contenido de pigmentos de un nuevo aislado de *Spirulina subsalsa* cultivada en agua de mar a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno. Los resultados indican que la salinidad y la concentración de nitrógeno afectan el crecimiento y los pigmentos, señalando además que esta cepa posee potencial para su aprovechamiento biotecnológico con miras a obtener metabolitos valiosos en las industrias alimenticias y farmacológicas.

En el tercer documento de este número, el profesor César Ariza, de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, y sus colaboradores, nos muestran el efecto del almidón y dos fitorreguladores sobre la germinación de una especie de orquídea cuya población se encuentra en declive, lo cual respresenta un alto riesgo de desaparición debido a problemas relacionados con la deforestación de su hábitat y el tráfico ilegal de esta planta.

El cuarto artículo corresponde a una investigación de Óscar Leonardo Ortiz y colaboradores, de la Universidad Libre. Este trabajo analizó la ceniza volante proveniente de una empresa ladrillera con el objetivo de evaluar la adsorción de plomo presente en una solución acuosa. Los factores estudiados fueron el pH inicial y la concentración inicial de soluto en la solución acuosa, a fin de determinar la influencia de estos sobre la eficiencia del tratamiento, la cual fue medida en términos de porcentaje de remoción de plomo y capacidad de adsorción del material.

Óscar Gerardo Barrera y Jemay Mosquera, de la Universidad de Pamplona, son los autores del siguiente artículo. Este trabajo analiza la contaminación ambiental generada por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre. Para ello, se estudia el registro de indicadores como la intensidad del campo eléctrico, la intensidad del campo magnético, la densidad de potencia y el tiempo de exposición a estaciones base de telefonía móvil. El objetivo general de la investigación es estimar la contaminación ambiental ocasionada por este tipo de ondas mediante la selección de un área urbana densamente poblada que cuente con la presencia de una estación base de telefonía móvil dentro de su extensión.

Los modelos matemáticos del mercado del café son el tema expuesto por Cristian Felipe Jiménez y Reinel Tabares Soto, profesores de la Universidad Autónoma de Manizales, en el siguiente artículo. Este trabajo lleva a cabo el modelado de las variables de oferta, demanda y *stock* del mercado del café verde colombiano comercializado como *commodity*. Empleando estas variables, los autores formulan un modelo de sistemas dinámicos usando ecuaciones diferenciales que permiten observar el comportamiento del mercado. En el análisis realizado se tienen en cuenta parámetros como las tasas de exportación e importación de este producto, los cuales fueron estimados a partir de datos históricos sobre el mercado del café reportados por las entidades oficiales.

Finalmente, el último artículo de este número es una interesante contribución de Julián Andrés Castrillón y Johnny Valencia al estudio de la priorización y selección de proyectos verdes. En su trabajo, los autores argumentan que los procesos de selección y toma de decisiones de este tipo de proyectos deben ser modificados de manera que, además de llevar a cabo la selección del mejor proyecto, se involucre a la comunidad de forma activa durante el proceso de convocatoria, generando en ella beneficios relacionados con el aprendizaje social y la apropiación de conocimiento. De esta manera, el trabajo propone la creación de una metodología que incorpore la participación de la comunidad y el conocimiento de su dinámica social, ambiental y económica como una variable. Lo anterior, con el fin de que el proceso de toma de decisiones en las convocatorias o los procesos de selección de proyectos verdes se desarrolle con base en el análisis de información proveniente de la misma comunidad. A través de esta investigación, los autores contribuyen al desarrollo de un modelo sostenible y participativo que facilita la toma de decisiones en los procesos de selección de proyectos verdes en el marco del posconflicto en Colombia.

De la misma manera que con el número anterior, espero que disfruten la lectura de la revista.

**Gerard Olivar-Tost**

Editor

<http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1401>

# *Flora Farallonensis* I: los helechos del bosque premontano de Pico de Águila

## *Flora farallonensis* I: The Ferns of *Pico de Águila* Premontane Forest

**Miguel Ángel Gamboa Gaitán**

Biólogo de la Universidad del Valle, M. Sc. Universidad de Puerto Rico,  
Laboratorio de Biología Tropical, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-8145-8712>  
[magamboaga@unal.edu.co](mailto:magamboaga@unal.edu.co)

Fecha de recepción: 10 de octubre del 2018  
Fecha de aceptación: 15 de noviembre del 2018

**Sugerencia de citación:** Gamboa Gaitán, M. A. (2018). *Flora Farallonensis* I: los helechos del bosque premontano de Pico de Águila. *Mutis*, 8(2), 7-24.  
doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1412>

## RESUMEN

Este manuscrito inaugura una serie de artículos sobre la flora de los Farallones de Cali, proyecto botánico que pretende dar a conocer el inventario de la flora de esta región, así como estudiar su potencial para la bioprospección del recurso natural florístico. Este escrito aborda los helechos hallados en la vereda Pico de Águila, departamento del Valle, presentando sus descripciones, datos biogeográficos y algunas ilustraciones que facilitan su identificación.

**Palabras clave:** flora neotropical, Colombia, pteridófitas, Farallones de Cali.

## ABSTRACT

This manuscript is the first of a series of papers dedicated to study flora in Los Farallones de Cali National Park, in Colombia. The purpose of this research is to make an inventory of plant species in this national park, showing their local distribution and selecting potential useful species for bioprospection analysis. This paper deals with pteridophytes species at Pico de Águila (Valle) and includes the first illustrated record of ferns at Los Farallones.

**Keywords:** Neotropical flora, Colombia, pteridophytes, Farallones de Cali.





## INTRODUCCIÓN

La Flora de los Farallones de Cali es un proyecto ambicioso que está en mora de haberse iniciado, particularmente por el hecho que en Colombia existe una larga tradición botánica sustentada por un gran número de excelentes profesionales en esta disciplina. Algunos aspectos que retrasaron su inicio fueron los temas de orden público y la poca financiación para proyectos científicos de biodiversidad. Una vez tomada la decisión de embarcarse en este megaproyecto surgen preguntas tales como: ¿qué clase de organismos deberían ser incluidos en una flora?, ¿cómo organizar esta obra?, ¿cuál es el límite geográfico de Los Farallones?

Esta flora de los Farallones se irá publicando en contribuciones puntuales en revistas científicas, para luego hacer volúmenes independientes que estarán dedicados a sitios específicos de los Farallones de Cali, los cuales estarán constituidos por tomos dedicados a diferentes grupos de plantas. El proyecto se llevará a cabo de esta manera debido a que un muestreo completo del parque es prácticamente imposible en la actualidad a causa de la situación de orden público en algunas partes del parque y a la inaccesibilidad del terreno en otras, para lo cual sería necesario realizar costosas excursiones de muestreo. Considerando lo anterior, resulta imposible presentar completamente un solo grupo de plantas de los Farallones, por ejemplo, las *Solanaceae* o las *Orchidaceae*, tal como se hace tradicionalmente en las floras de los países, por lo que ir muestreando localidades puntuales de este ecosistema parece una estrategia más razonable en las condiciones actuales.

Este trabajo permitirá que la flora propia de este parque nacional sea conocida de manera progresiva, lo cual quizá aumente las probabilidades de conseguir financiación para el estudio de lugares remotos, como la ladera occidental de los Farallones de Cali. Los grupos que serán incluidos en toda la obra son algas, hongos, briófitas, pteridófitas y espermatófitas. Dentro de cada uno de estos grupos se llevará una organización alfabética por familias, haciendo de cada una de ellas un breve diagnóstico basado en literatura relevante en el área y en los ejemplares reportados en el lugar muestreado.

Es pertinente dar una explicación acerca de por qué se ha decidido constituir la obra de esta manera. Al-

gas, hongos y vegetación terrestre eran los organismos que constituían el reino vegetal —o reino de las plantas— hasta hace poco tiempo. Su inmovilidad, su capacidad fotosintética (en las algas) y el hecho de que casi siempre conviven estrechamente con la vegetación terrestre, llevó a que las algas, los hongos y los líquenes fueran tradicionalmente estudiados por los botánicos, quienes los consideraban elementos de la flora de cualquier lugar. Sin embargo, modernos estudios taxonómicos muestran que estos grupos no pueden ser sostenidos en el mismo reino si se quiere realizar una clasificación basada en los principios filogenéticos. En efecto, las algas son en realidad un conjunto polifilético de protistas que debió ser deshecho para reasignar varios de sus taxones en diversos reinos de eucariotas. Solo las algas verdes se mantuvieron cercanamente emparentadas con las plantas terrestres. Si bien las algas son hoy día estudiadas por su propia disciplina, la ficología, es claro que se recolectan, tratan y almacenan de manera similar a las plantas en los herbarios, razón por la cual siguen siendo parte del quehacer botánico. Adicionalmente, las algas tienen una taxonomía complicada y se conoce muy poco de las especies tropicales, particularmente de las especies de ecosistemas montañosos. Todo esto justifica que las algas verdes sean estudiadas en esta obra.

En cuanto a los hongos, se puede decir que forman un reino separado de las plantas, en realidad más cercanamente emparentado con el reino animal que con el vegetal. Por ello, estas especies deberían ser incluidas en los estudios de fauna, más que en los de la flora de los ecosistemas. Sin embargo, los zoólogos no parecen interesados en incluir a los hongos en los libros de zoología ni en los inventarios de fauna; mucho menos en tomar las colecciones fúngicas de los herbarios para ubicarlas en los museos zoológicos. Por ello, los hongos siguen siendo tema de la botánica *sensu lato*, y aunque se violan los principios filogenéticos, se ha decidido atender a la tradición e incluir a los hongos en esta Flora de Los Farallones de Cali.

Además de las algas y los hongos, esta *Flora Farallonensis* también incluirá la vegetación terrestre, la cual forma el grueso de la diversidad vegetal. Las plantas terrestres serán presentadas en los grandes grupos que tradicionalmente son usados para estudios a nivel de pregrado: *i)* plantas avasculares o briófitas, *ii)* plantas vasculares sin semilla o pteridófitas y *iii)* plantas



con semilla o espermatófitas. Para su presentación se tendrá como referencia el conjunto de autores en sistemática vegetal de obligatoria consulta, Cronquist, Takhtajan, Thorne, Dahlgren, Kubitski y Judd, entre otros, pero a la vez se prestará mucha atención a las publicaciones especializadas más recientes cuando se pretenda establecer a qué categoría taxonómica pertenece una especie determinada.

Aunque en la actualidad existen propuestas que modifican la posición de algunos grupos grandes de plantas, resulta más didáctico presentar la flora en la forma tradicional, debido a que dichas propuestas generalmente afectan a los taxones superiores y no a las categorías por debajo de familia, y a que su validez es un asunto aún en discusión. En esta obra se ha optado por ubicar las especies halladas en cada uno de los grandes grupos tradicionales. De ser necesario, se mencionará la referencia que propone su nueva ubicación para que la persona interesada pueda llevar a cabo la consulta correspondiente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio

El sitio de estudio es conocido bajo el nombre de Farallones de Cali, una región biogeográfica interesante que se localiza en la Cordillera Occidental del sistema andino colombiano. Si bien su epicentro es el Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali (PNNFC), que actualmente forma parte del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, el ecosistema natural que representan los Farallones de Cali no puede limitarse únicamente a la zona bajo protección estatal. Los extensos territorios aledaños al parque, con los que existe una continuidad biológica natural, constituyen importantes zonas de amortiguación que se caracterizan también por poseer una gran diversidad de especies.

El PNNFC fue creado en 1968 y actualmente se encuentra bajo la jurisdicción del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y de la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC); desde aquella época, el estado de conservación de esta zona ha mejorado considerablemente. Antes de la creación del área de protección oficial, los Farallones eran usados como fuente de variados recursos naturales que se extraían inadecuadamente mediante actividades

como la minería, la caza y la tala de bosques. La vegetación estaba bajo fuerte presión extractiva, ya que tanto especies ornamentales como maderables fueron selectivamente sacadas del parque desde que la ciudad de Santiago de Cali se estableció en su ladera oriental. Algunos ejemplos de especies ornamentales extraídas sin control de los Farallones son los anturios, los helechos y las orquídeas, mientras que entre las especies maderables más usadas se puede mencionar el comino, el mediocomino, el laurel, el roble negro y el laurel amarillo.

El PNNFC es considerado una zona de muy alta prioridad en materia de conservación y con alta vulnerabilidad a la invasión humana (García-Kirkbride, 1986) debido a los numerosos asentamientos que se han establecido a sus alrededores. Si bien sus suelos son clasificados como de fertilidad baja y muy baja (CVC, 1983), el avance de colonos, el establecimiento de potreros para ganadería extensiva, la parcelación de terrenos para vivienda, la minería y la extracción de madera son factores que hoy día amenazan la integridad de los Farallones.

Geográficamente, el parque abarca territorios en los municipios de Cali, Jamundí, Dagua y Buenaventura (figura 1), en el departamento del Valle del Cauca, con una superficie de 205.266 hectáreas y un rango altitudinal entre 200 y 4.100 m, siendo sus coordenadas extremas 3° 39' 55,5" - 3° 6' 56,7" de latitud norte y 77° 6' 6,69" - 77° 35' 43,6" de longitud oeste (Sarría, 1993; PNNC, 2005, 2007).

En esta Flora de los Farallones de Cali, sin embargo, el sitio de estudio será delimitado en un sentido un tanto diferente, pues además del área oficialmente adscrita al parque, los territorios que presenten continuidad florística también serán incluidos. Es por ello que varios tomos de la obra estarán dedicados a flóru-las ubicadas por fuera del área oficial del PNNFC, pero que muestran continuidad biológica con él. De tal forma, esta obra pretende abordar a los Farallones de Cali como una unidad natural, por lo que es importante entender que los Farallones es, ante todo, un ecosistema montañoso dentro del sistema cordillera-no Andino. Razón por la cual su flora es básicamente de montaña.

A partir de lo anterior, el alcance de esta obra en términos biogeográficos debe establecerse altitudinalmente en ambas laderas de los Farallones. En la ladera

**Figura 1.** Mapa de la ubicación geográfica aproximada del Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali



Fuente: CVC 1983.

occidental de la Cordillera Occidental de Colombia, la cota de los 1.100 m ha sido establecida como el límite altitudinal máximo de la región de la costa pacífica colombiana (Rangel *et al.*, 1995), punto en el que se empieza a evidenciar la diferencia entre la flora de la llanura costera del pacífico (que forma parte del Chocó biogeográfico) y la flora de la vertiente occidental de los Farallones (que forma parte del sistema montañoso andino). En la ladera oriental de la Cordillera Occidental el límite de los Farallones debe establecerse en el punto en que se da la transición floral entre los ecosistemas de montaña y los ecosistemas secos y semisecos del valle geográfico del río Cauca, límite que puede ser también ubicado a 1.100 m. En efecto, el trabajo de Mahecha-Vega y Echeverri-Restrepo (1983) sobre los árboles del Valle del Cauca usa esta cota como el límite superior del valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle.

Las primeras contribuciones a esta *Flora Farallonensis*, que se inauguran con este artículo sobre pteridófitas, estarán dedicadas a la flórmula del bosque hallado en las inmediaciones de la vereda Pico de Águila, corregimiento de Pance, municipio de Santiago de Cali. Dicha vereda es un pequeño caserío de unas 20 familias (alrededor de 80 personas), ubicadas en la ladera oriental de los Farallones en la zona de amortiguación

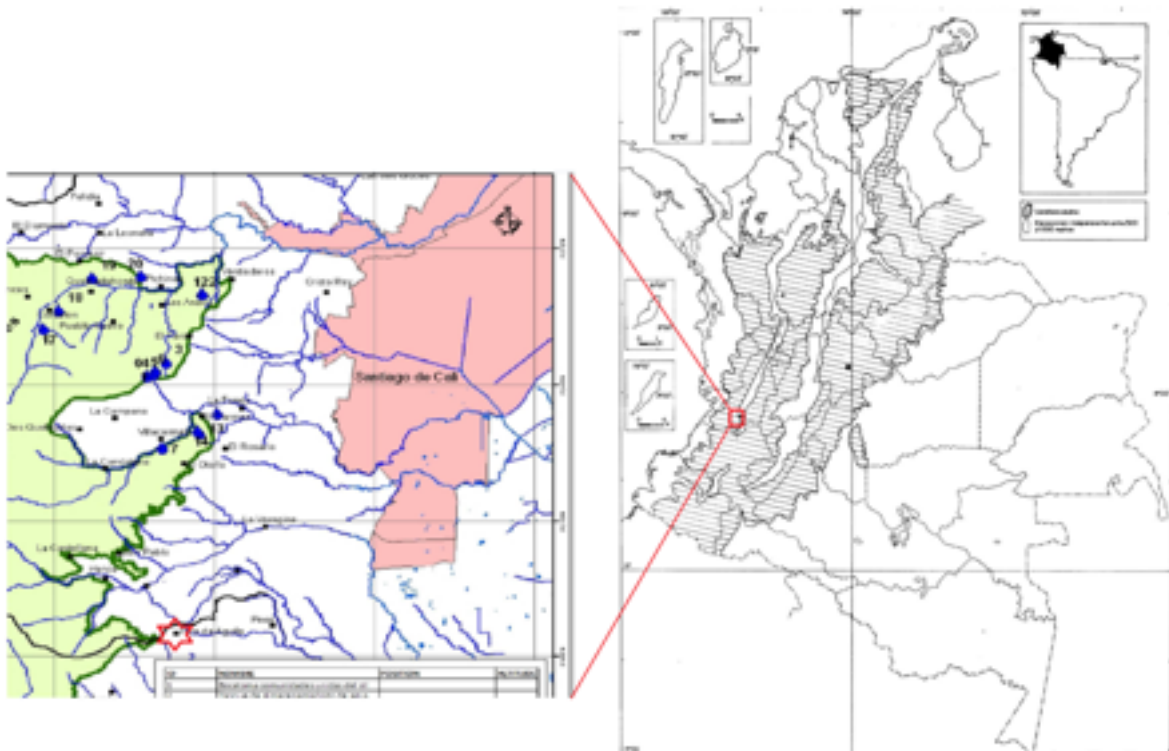
que rodea al parque y que lo separa de Cali y Jamundí (figura 2). Pico de Águila se localiza a una altitud de 1.550 m, con una temperatura media anual en el rango 18-24 °C, cuyo ecosistema corresponde a la zona del bosque muy húmedo subtropical, según Espinal (1968), quizá más correctamente descrito como bosque tropical montano bajo, con clima tropical lluvioso de bosque, ubicado en pleno piso térmico medio (cvc, 2010). El único trabajo florístico realizado en la zona es el de Gamboa-Gaitán (1995), el cual constituye, junto con nuevas recolecciones de material vegetal realizadas a partir de 2009, la base de esta y las próximas publicaciones.

Es importante anotar que la zona original en la que se realizó el estudio, la cual comprendía un área aproximada de seis hectáreas (Gamboa & Ramos, 1995), fue inmensamente intervenida hacia el año 2003 debido a invasiones por parte de colonos como consecuencia de las alteraciones de orden público en la región. Actualmente, casi todos los predios que se formaron en esa época están abandonados, por lo que se está dando el proceso de regeneración natural. Dichas invasiones alteraron sustancialmente la composición florística de la zona y es factible decir que en ella se dio tanto el fenómeno de fragmentación de bosques como el de extinción local, puesto que no se han encontrado algunas de las especies reportadas en los estudios de 1995. Por ello, es posible que algunas de las descripciones dadas en este y los siguientes trabajos se basen solamente en un individuo, quizá ya extinto, cuya muestra botánica muy probablemente se encuentra en el Herbario de la Universidad del Valle (cvc), aun cuando existen algunos duplicados en el Herbario Nacional Colombiano (COL).

### Recolección e identificación

Las especies estudiadas fueron recolectadas de manera discontinua desde 1994 hasta el presente. El proceso de muestreo continúa, pues es posible que existan especies que no hayan sido recolectadas, especialmente aquellas en las partes altas del dosel, como se ha evidenciado con otros grupos de angiospermas como las briófitas y las orquídeas, entre las cuales siguen apareciendo nuevos registros. El material recolectado fue depositado en bolsas plásticas individuales con un número de recolección bajo el cual se apuntan sus datos en la bitácora. Luego, estos son llevados al sitio de ordenamiento de las muestras, si-

**Figura 2.** Mapa de la ubicación de Pico de Águila en las cercanías de los Farallones de Cali (estrella en el mapa de la izquierda)



Fuente: PNNC 2007 y Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.

tuado en la finca Nazaret de la vereda Pico de Águila, donde sus propietarios, Teodoro Valencia y su esposa, permitieron llevar a cabo el procesamiento de las muestras. Allí, estas fueron puestas en papel periódico con su respectivo número de colección y posteriormente fueron prensadas para ser transportadas al cuvc o al Laboratorio de Biología Tropical, donde fueron secadas en prensa metálica a 70 °C durante al menos 24 horas. Una vez seco, el material fue contado en cartulina libre de ácido y dispuesto para su identificación por parte de especialistas. Todas las especies identificadas aquí presentadas fueron ilustradas por el autor antes de ser secadas al horno. En la actualidad, se sigue visitando el lugar en búsqueda de nuevas especies y para recoger información sobre sus usos, con lo cual se busca identificar taxones con potencial para investigaciones futuras en el campo de la bioprospección.

## RESULTADOS

Las pteridófitas son plantas terrestres que tienen en común dos características notables: un sistema vascular bien desarrollado y la ausencia de semilla. Tra-

dicionalmente, atendiendo principalmente fines didácticos, estas han sido divididas en psilotales, licopodios, equisetos y helechos, grupos ubicados en diferentes categorías a lo largo del desarrollo de la sistemática vegetal, desde orden hasta división. Sin embargo, propuestas recientes cambian la posición de algunos taxones de pteridófitas con respecto a algunas plantas fósiles y a las plantas con semilla, haciendo que el grupo sea insostenible porque no es monofilético (figura 3). Por ejemplo, una familia de los grupos eusporangiados de los helechos tradicionales (*Ophioglossaceae*) parece más emparentada con los psilotales que con otros helechos, mientras que los equisetos parecen estar mejor agrupados con los helechos leptosporangiados (Judd *et al.*, 2007).

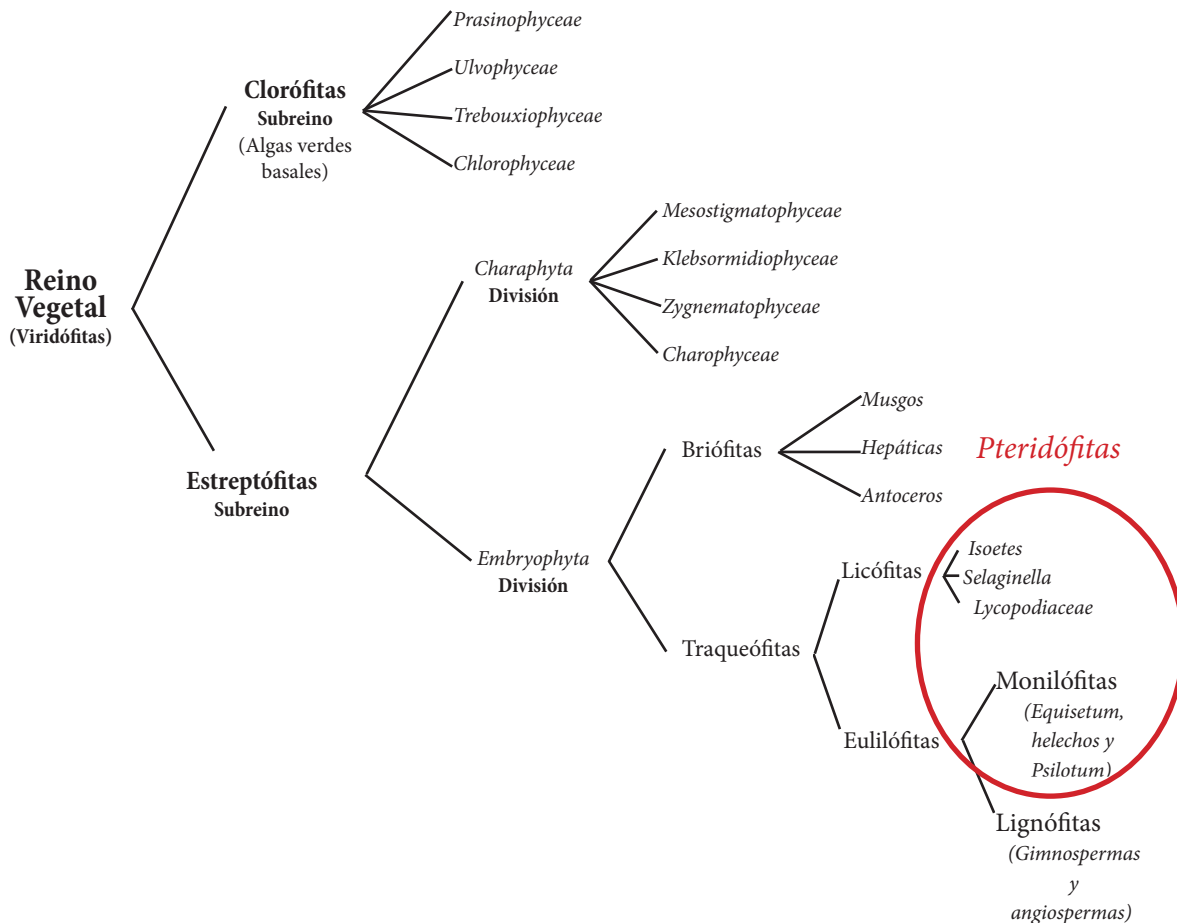
A pesar de las inconsistencias sistemáticas a nivel de categorías superiores, las familias de las pteridófitas están relativamente bien delimitadas. Kramer & Green (1990), propusieron 38 familias: 1 familia en psilotales, 1 en equisetales, 3 en licopodios y 33 en los helechos. Dieciséis años después, Smith *et al.* (2006) separaron los licopodios de los verdaderos helechos y aceptaron la existencia de 37 familias (1 en psilotales, 1 en equisetos, 2 eusporangiadas y 33 en los helechos

leptosporangiados). Debe enfatizarse aquí que la separación de los licopodios (licófitas) de los helechos verdaderos (monilófitas), es lo que hace a las pteridófitas un grupo parafilético (figura 3), de acuerdo con Raubeson y Jansen (1992), Pryer *et al.* (2001) y Smith *et al.* (2006). Sin embargo, Christenhusz, Zhang y Schneider (2011), proponen una agrupación lineal de licopodios y helechos con un total de 48 familias, por lo que es claro que seguir usando dicho término es de utilidad botánica, ya que las pteridófitas, en sentido tradicional, son un grupo de plantas con notables similitudes morfoanatómicas y ecológicas, lo cual facilita y justifica su estudio como un grupo unificado. Más recientemente Christenhusz y Chase (2014), hacen una propuesta más incluyente que trata de evitar el uso excesivo de familias y géneros, en la cual pro-

ponen tres familias para los licopodios y 21 familias de helechos, a los cuales subdividen en cuatro subclases.

Es claro que la sistemática de las pteridófitas *sensu lato* es un tema altamente dinámico, por lo que resulta necesario establecer claramente qué postura se sigue cuando se presentan plantas en este grupo. En esta obra se ha decidido presentar a los helechos aceptando a *Blechnum* y *Thelypteris* en sus propias familias, siguiendo en este caso la postura de Smith *et al.* (2006), pero a la vez tratando de hacer más concisas las familias en una posición más cercana a Christenhusz & Chase (2014), que es probablemente la postura que prevalecerá. Los dos géneros mencionados son muy grandes, lo cual justifica en parte la aceptación de sus propias familias.

Figura 3. Constitución actual del reino vegetal



Fuente: elaboración propia.

En la vereda Pico de Águila de los Farallones de Cali, altitud  $1.550 \pm 50$  m, se hallaron 18 especies de pteridófitas, todas ellas helechos, distribuidas en 13 géneros de 8 familias, las cuales se describen a continuación en orden alfabético por familias.

### Familia *Aspleniaceae* Newman

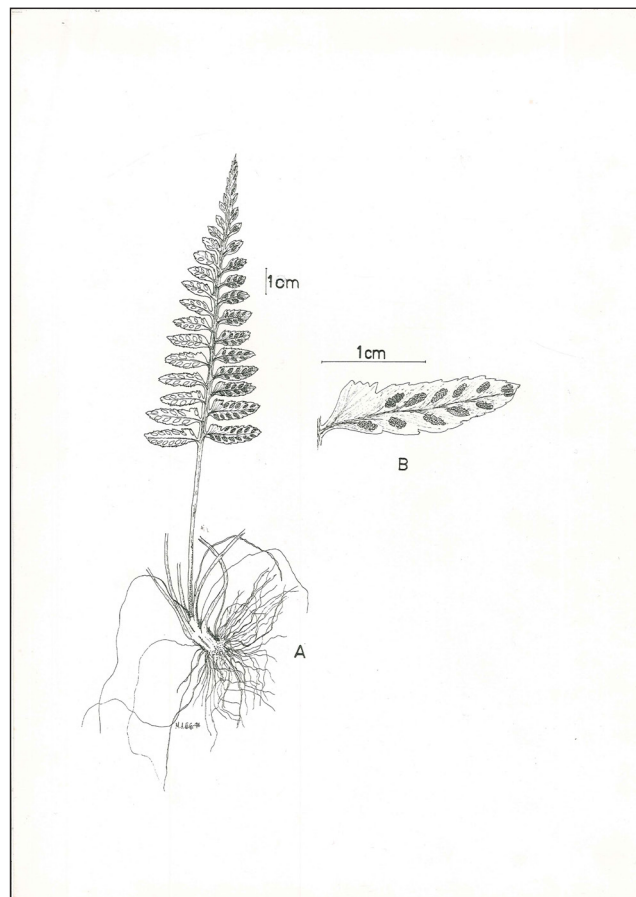
Hierbas terrestres, epilíticas y epífitas, rara vez de más de 1 m de longitud. Poseen unas 700 especies en un solo género (*Asplenium*), el cual es de distribución cosmopolita pero con la mayoría de sus especies tropicales y de zonas templadas del hemisferio sur. Se considera que los Andes son un posible centro secundario de diversificación (Kramer & Viane, 1990). Christenhusz y Chase (2014) consideran que esta familia debe ser entendida en sentido muy amplio e incluyen en ella a *Blechnum*, *Thelypteris* y *Diplazium*, cada uno en diferentes subfamilias.

### *Asplenium auritum* Swartz

Hierba epífita estrechamente asociada con otras especies de la misma sinusia. Individuos pequeños, con 4-10 frondas de 15-35 cm de longitud, con pinnas que disminuyen en longitud y se van fusionando desde la base hasta el ápice de la fronda, raquis con un pliegue entre las pinnas. Soros de 2-4 mm de longitud, paralelos a la vena secundaria, rojizos en la madurez, cubren gran parte de la superficie inferior de la pinna, indusio presente. Se ha reportado su uso como planta ornamental y medicinal (Murillo, 1983) (figura 4).

Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima, Valle, Vaupés y Vichada, desde el nivel del mar hasta 3.200 m.

Figura 4. *Asplenium auritum*: A) rizoma y fronda, B) detalle de una pinna fértil



Fuente: elaboración propia.



***Asplenium radicans* L.**

Hierba terrestre, crece en zonas sombreadas con abundante hojarasca en el suelo. Frondas de hasta 1 m, con indusio. Al parecer, el espécimen pertenece a la variedad *uniseriale* (Raddi) Gómez.

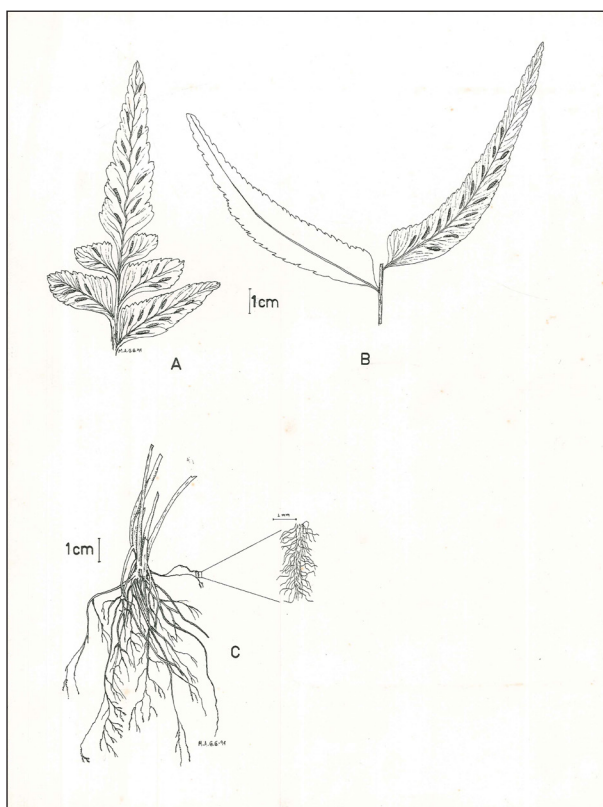
Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cauca, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima y Valle, entre 150 y 2.900 m.

***Asplenium salicifolium* L.**

Hierba terrestre de zonas húmedas y sombreadas. Fronda de 35-50 cm de longitud, raquis negro con dos canales longitudinales. Pinnas de 2-15 cm, enteras, lobadodentadas, fusionadas en el ápice de la fronda. Soros alargados, con indusio, venación abierta (figura 5).

Distribución: Antioquia, Boyacá, Casanare, Chocó, Cundinamarca, Guajira, Magdalena, Meta, Santander y Valle, entre 680 y 2.500 m.

Figura 5. *Asplenium salicifolium*: A) ápice de la fronda, B) pinnas, C) rizoma y base de las frondas



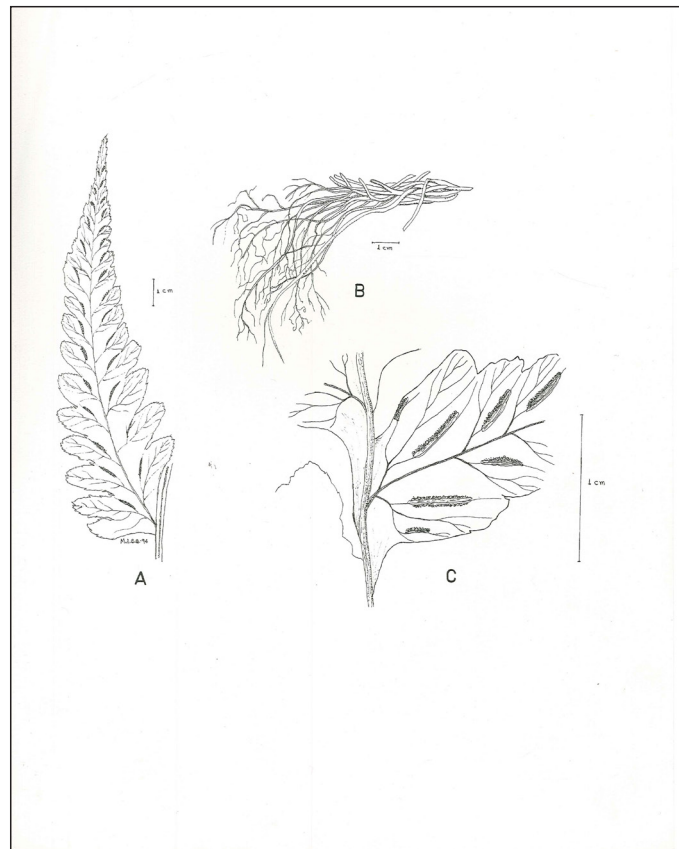
Fuente: elaboración propia.

***Diplazium striatum* (L.) C. Presl vel sp. aff.**

Smith *et al.* (2006) consideran que este género debe estar en la familia *Woodsiaceae*, mientras que Christenhusz *et al.* (2011) lo ubican en la familia *Athyriaceae*. Por su parte, Christenhusz y Chase (2014) lo ubican en las aspleniáceas en sentido amplio, en la subfamilia *Athyrioideae*. Hierba terrestre de 50 cm, localizada en zonas intervenidas del bosque. Raquis

con canal longitudinal, pinnas lobadas, ligeramente dentadas, se fusionan hacia el ápice, de 4-22 cm por 1-4 cm, venación abierta. Soros de 2-6 mm de largo, ubicados sobre las venas secundarias, en dirección al ápice, con indusio (figura 6).

Distribución: Amazonas, Antioquia, Caldas, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Putumayo y Valle, entre 100 y 2.700 m.

**Figura 6.** *Diplazium striatum*: A) pinna fértil vista por el envés, B) rizoma, C) detalle de los soros

Fuente: elaboración propia.

**Familia *Blechnaceae* (C. Presl) Copel.**

Se trata de hierbas terrestres o epilíticas, rara vez epífitas, que pueden presentar dimorfismo marcado entre frondas estériles y fértiles, raquis y peciolos con surcos. Presente en casi todo el mundo, esta familia tiene unas 250 especies, siendo *Blechnum* el género más abundante, particularmente conspicuo en el hemisferio sur, donde alcanza a darse en las montañas tropicales. Otros géneros: *Brainea*, *Stenochlaena*, *Woodwardia* (Kramer, Chambers & Hennipman, 1990). Smith *et al.* (2006) sostienen que las blechnoides deben ser consideradas una familia; sin embargo, en la obra de Christenhusz y Chase (2014) aparecen como una subfamilia dentro de *Aspleniaceae*, grupo que claramente necesita un tratamiento taxonómico extenso.

***Blechnum confluens* Schlechter & Chamizo**

Hierba terrestre de zonas húmedas. Frondas de 20-40 cm, pinnas enteras de 1-3 cm, mucronadas, venación abierta, soros lineales paralelos a la vena central, de 4-14 mm, indusio presente (figura 7).

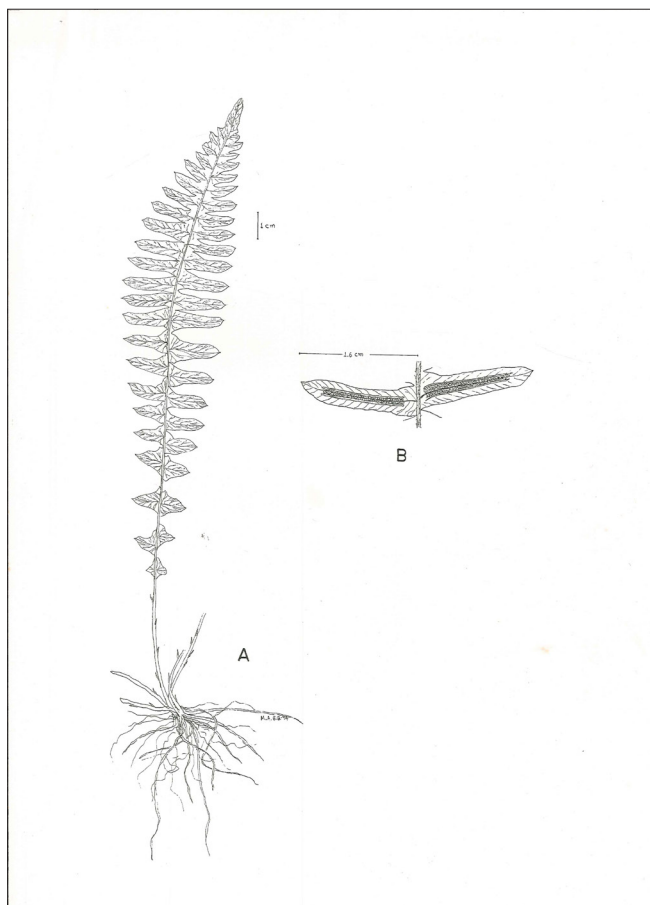
Distribución: Antioquia y Valle, entre 200 y 1.600 m.

***Blechnum fraxineum* Willdenow**

Hierba terrestre de zonas sombreadas con abundante hojarasca. Frondas 20-45 cm, pinnas lanceoladas, a veces un poco ovaladas de 2-11 cm.

Distribución: Antioquia y Valle, entre 1.030 y 2.000 m.



Figura 7. *Blechnum confluens*: A) fronda y rizoma, B) pinnas fértiles

Fuente: elaboración propia.

***Blechnum occidentale* L.**

Hierba terrestre, común en zonas en regeneración. Frondas de 25-70 cm, con venación abierta, soros alargados a ambos lados de la vena central de la pinnula, de 0,4-9,0 cm, se fusionan hacia el ápice, indusio presente. Se ha registrado su uso medicinal en el tratamiento de cálculos (Murillo, 1983) (figura 8).

Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima, Valle y Vaupés, desde el nivel del mar hasta 2.800 m.

**Familia *Dryopteridaceae* Ching**

Hierbas terrestres o epilíticas, rara vez epífitas. Lámina de la fronda a menudo oblonga, soros orbiculares, esporas monoletes y venación abierta. Algunas espe-

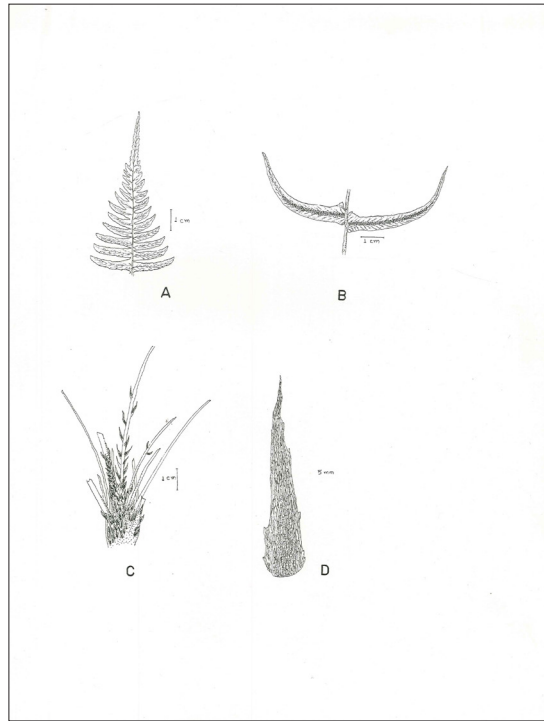
cies de *Dryopteris* y de los géneros más emparentados con él han sido estudiadas por la presencia de compuestos venenosos y de uso medicinal (Kramer *et al.*, 1990). Christenhusz y Chase (2014), la consideran una subfamilia dentro de las *Polypodiaceae*.

***Polystichum platyphyllum* (Willdenow) C. Presl**

Hierba terrestre, con frondas de hasta 70 cm, raquis verde con canal central, escamas delgadas con pelos de hasta 8 mm, pinnas de 1,0-2,5 cm de longitud soros redondeados, marginales, dispuestos en "U", venación abierta. Crece en suelos con abundante hojarasca (figura 9).

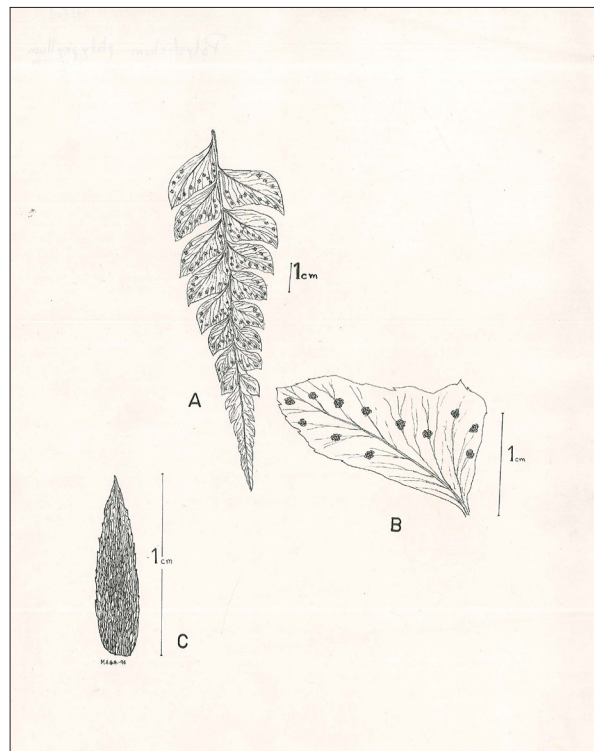
Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Quindío, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Putumayo, Risaralda, Tolima, Valle, desde del nivel del mar hasta 2.800 m.

**Figura 8.** *Blechnum occidentale*: A) ápice de una fronda, B) detalle de dos pinnas fértiles, C) rizoma y base de las frondas, D) escama



Fuente: elaboración propia.

**Figura 9.** *Polystichum platyphylum*: A) ápice de una fronda fértil, B) pinna mostrando la disposición de los soros, C) escama



Fuente: elaboración propia.

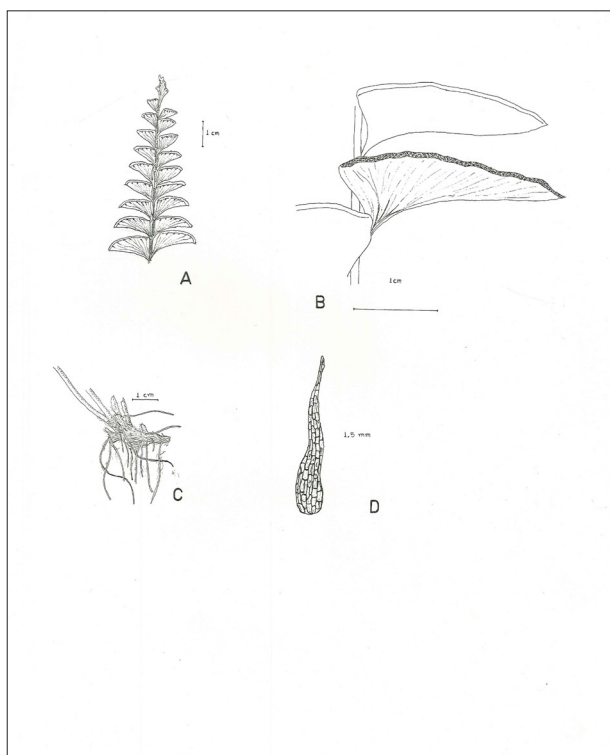
**Familia Lindsaeaceae C.Presl ex M.R. Schomb.**

Unas 200 especies componen esta familia de distribución pantropical, terrestres, infrecuentemente epilíticas o epífitas. Generalmente glabras de venas libres, hojas pinnadas una a tres veces, soros indusiados, marginales o submarginales, indusio extrorso.

***Lindsaea* sp.**

Hierba terrestre, frondas 55 cm, soro alargado sobre el borde arqueado de la pinna, con indusio, base del raquis color marrón, con canal central longitudinal, rizoma marrón rojizo, con escamas. Se da en zonas sombreadas y húmedas, con abundante hojarasca (figura 10).

**Figura 10.** *Lindsaea* sp.: A) ápice de una fronda, B) detalle de una pinna fértil, C) rizoma, D) escama



Fuente: elaboración propia.

**Familia Marattiaceae Kaulf.**

Helechos terrestres, erectos o trepadores, con canales de mucílago en todo el cuerpo, micorrícicos, con aurículas en la base de los pecíolos, normalmente 1 a 3 pinnas o de hojas enteras. Presenta reproducción vegetativa notable.

***Danaea lucens* A Rojas**

Hierba terrestre, de porte arbustivo, erecta, con rizoma erecto, grueso, de 5 cm de diámetro, en zona muy sombreada y húmeda del sotobosque, cerca de la quebrada Chontaduro.

Distribución: Chocó, Risaralda y Valle, entre 1.550 y 1.900 m.

**Familia Polypodiaceae Berchtold & J.C. Presl.**

Hierbas perennes terrestres, epífitas o epilíticas. Frondas mono o dimórficas, con pecíolo variadamente desarrollado, alado, con escamas o glabro, venación abierta, soros usualmente redondeados y prominentes pero pueden ser alargados. De distribución tropical, principalmente. Su clasificación genérica es complicada, algunos autores prefieren dividirla en dos o tres familias (Hennipman *et al.*, 1990).

***Campyloneurum* sp.**

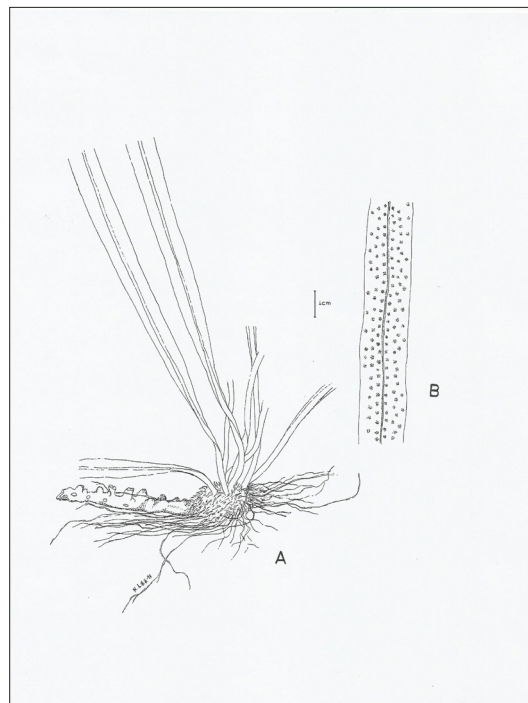
Hierba epífita. Frondas de hasta 50 cm por 1-2 cm de ancho, soros redondeados de 1 mm de diámetro al final de las venas, las cuales son abiertas, rizoma color marrón, con escamas, estas también presentes en las hojas, vena central de color amarillo pálido (figura 11).

***Pecluma divaricata* (Fournier) Mickel & Beitel**

Hierba terrestre, frondas de hasta 1,3 m. En zonas intervenidas en proceso de regeneración.

Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Meta, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Santander, Tolima y Valle, entre 350 y 3.000 m.

Figura 11. *Campyloneurum* sp.: A) rizoma y base de las frondas, B) detalle de una fronda fértil por el envés.



Fuente: elaboración propia.

***Pleopeltis macrocarpa* (Bory ex Willdenow) Kaulfuss**

Hierba epífita, fronda de 8-18 cm por 1-3 cm, envés rojizo, soros redondeados, prominentes, a lado y lado de la vena central, haz con puntos vistosos. Rizoma profusamente esparcido en su forófito (figura 12).

Distribución: Amazonas, Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Santander, Tolima y Valle, entre 450 y 3.200 m.

***Pleopeltis remota* (Desv.) A.R.Sm.**

Hierba epífita, frondas de hasta 40 cm, pinnas enteras de 0,8-0,9 cm por 0,5-0,9 cm, de color verde claro, fusionadas hacia el ápice, soros redondeados de 2

mm de diámetro, caquis marrón oscuro, rizoma escamoso, muy ramificado (figura 13).

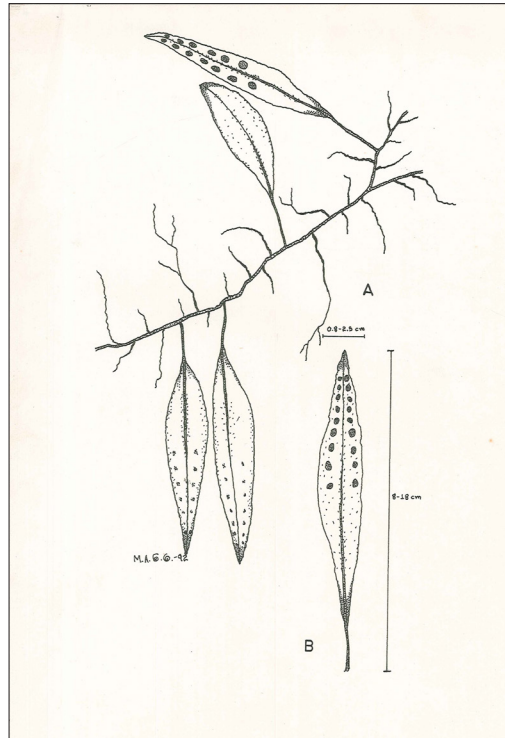
Distribución: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Putumayo, Santander y Valle, entre 1.300 y 2.800 m.

***Polypodium fimbriatum* Maxon**

Hierba epífita de 25-40 cm. Lámina dividida en pinulas digitiformes, conectadas por alas en el raquis, envés de color rojo ladrillo, tricomas muy abundantes, soros en dos hileras pareadas a ambos lados de la vena central (figura 14).

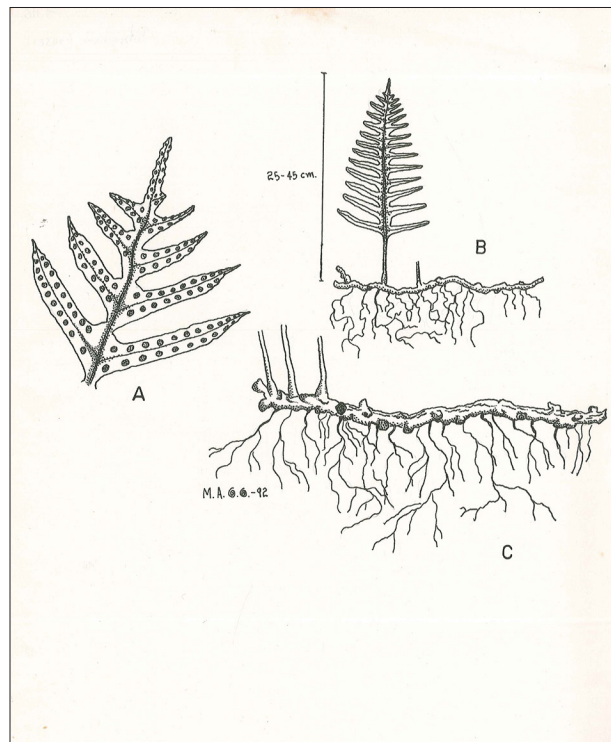
Distribución: Antioquia, Cundinamarca, Meta y Valle, entre 350 y 3.000 m.

Figura 12. *Pleopeltis macrocarpa*: A) rizoma y frondas, B) detalle de una fronda fértil



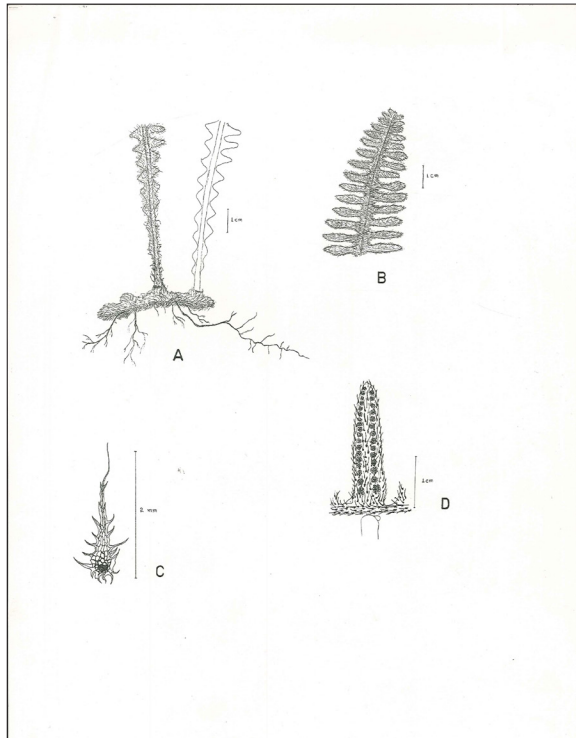
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. *Pleopeltis remota* (Desv.) A.R.Sm.: A) extremo de una fronda fértil vista por el envés, B) vista panorámica de un rizoma y una fronda, C) detalle del rizoma



Fuente: elaboración propia.

**Figura 14.** *Polypodium fimbriatum*: A) base de las frondas y rizoma, B) ápice de una fronda, C) escama, D) detalle de una pinna por el envés



Fuente: elaboración propia.

***Serpocaulon fraxinifolium* (Jacq.) A.R.Sm.**

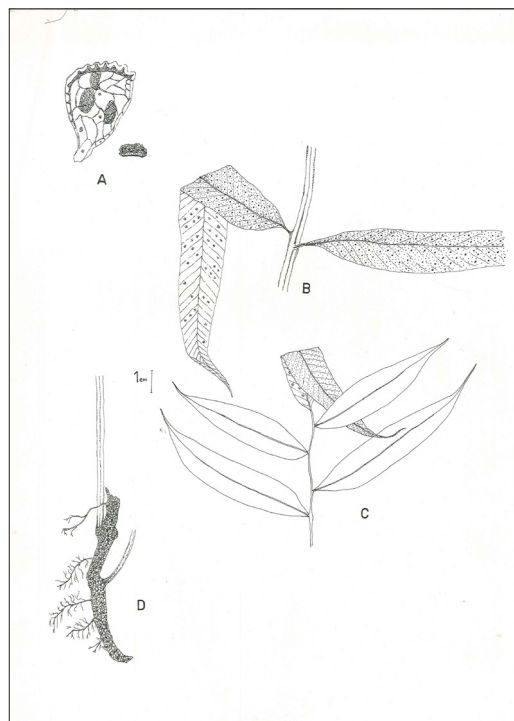
Hierba hemiepífita, frondas de 80 cm, pinnas 7-21 cm por 1-3 cm, haz verde oscuro, con puntos, soros redondeados de 1 mm de diámetro, entre las venas secundarias (figura 15).

Distribución: Antioquia, Boyacá, Cauca, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander Tolima y Valle, entre 100 y 2.750 m.

**Familia *Pteridaceae* E.D.M. Kirchn.**

Hierbas terrestres con algunas especies acuáticas, venas usualmente libres, soros lineales a lo largo de las venas, sin indusio, pero también pueden ser marginales. Son de distribución mundial pero centrada en los trópicos (Tryon, Tryon, & Kramer, 1990).

**Figura 15.** *Serpocaulon fraxinifolium*: A) esporangio abierto, B) detalle de una pinna fértil vista por el haz y el envés, C) disposición de las pinnas, D) rizoma y base de una fronda



Fuente: elaboración propia.

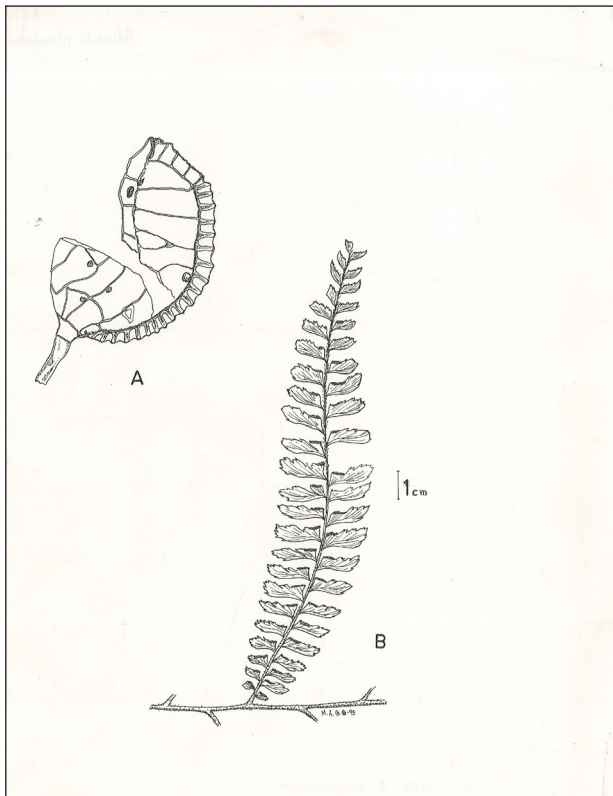


### ***Adiantum pulverulentum* L.**

Hierba terrestre, frondas de hasta 1 m de longitud, pinnas 7-20 cm, raquis negro con canal central, con escamas amarillentas, pinnulas sésiles de 0,9-1,7 cm, aserradas, con soros marginales alargados de 3-14 mm en su borde anterior. Hallada en zonas húmedas y sombreadas (figura 16).

Distribución: Amazonas, Antioquia, Bolívar, Caquetá, Cauca, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Magdalena, Meta, Nariño, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander y Valle, desde el nivel del mar hasta 1.830 m.

Figura 16. *Adiantum pulverulentum*: A) vista muy aumentada de un esporangio abierto, B) detalle de una pinna en una fronda fértil



Fuente: elaboración propia.

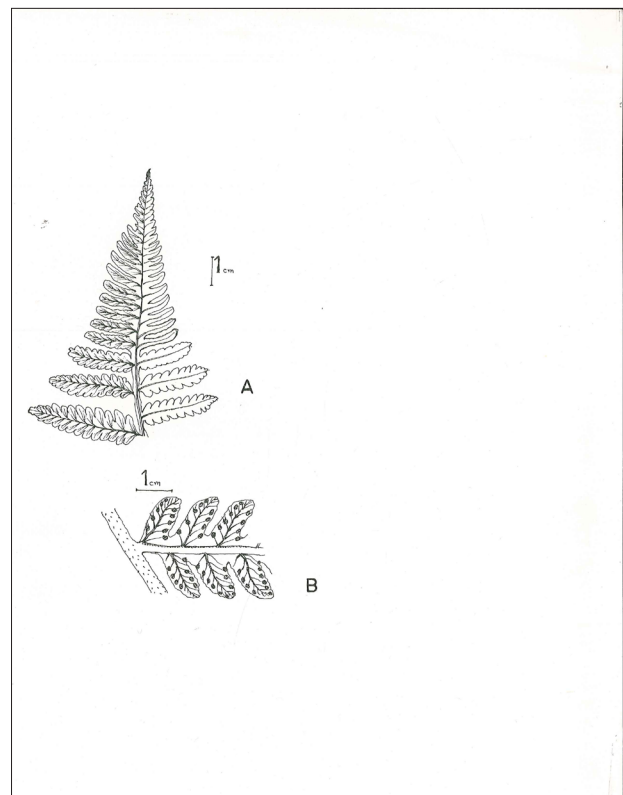
### **Familia *Thelypteridaceae* Ching ex Pic. Serm.**

Helechos terrestres, rara vez epífitos, con especies arbóreas, cuerpo escamoso, soros orbiculares o alargados sobre las venas. Familia con más de 1.000 especies, especialmente en los trópicos y zonas subtropicales (Smith, 1990).

### ***Thelypteris* sp.**

Helecho arbóreo palmiforme de hasta 5 m de altura, con frondas de más de 1,5 m de longitud, cicatrices foliares conspicuas, abundantes escamas rojizas, soros acampanados y dispuestos en herradura cerca al borde foliar. Crece naturalmente en el sotobosque, en zonas sombreadas (figura 17).

Figura 17. *Thelypteris* sp.: A) detalle del final de una fronda por el haz, B) detalle de la disposición de los soros en el envés de una pinna fértil



Fuente: elaboración propia.



## DISCUSIÓN

El bosque premontano de Pico de Águila presenta una notable diversidad vegetal a pesar de ser un ecosistema intervenido y muy cercano a una ciudad cosmopolita como Santiago de Cali. En efecto, Gamboa y Ramos (1995) presentan datos sobre su notable biodiversidad usando varios índices. En particular, la presencia de pteridófitas es notable, pues la existencia de 18 especies, prácticamente todas terrestres o epífitas de estratos bajos del bosque, se puede considerar un indicador de alta diversidad.

Es posible afirmar que al investigar el dosel del bosque, que en algunas zonas puede alcanzar 30 m de altura, se hallará nuevas especies. En este punto es importante aclarar que la sinonimia en los helechos es abundante, por lo que una recomendación para los investigadores en este grupo es que se actualicen constantemente en este asunto, teniendo en cuenta que varias de las especies reportadas aquí fueron inicialmente identificadas con nombres que han sido revaluados. El trabajo se continuará enfatizando en dos aspectos: el muestreo de estratos más altos del bosque y la búsqueda de información acerca de los usos de estas especies, tanto por parte de la población de esta vereda como de otros lugares, con el fin de determinar su valor en posibles estudios de bioprospección.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Primera Dama de la Botánica, la profesora María Teresa Murillo, quien orientó el proceso de recolección e identificación de los helechos al comienzo de este informe. A los profesores Jorge Eduardo Ramos y Philip Silverstone-Sopkin, del Herbario de la Universidad del Valle (cuvc), por su orientación y colaboración. Al profesor Carlos Parra, del Herbario Nacional Colombiano (COL), por permitir el acceso a los especímenes del COL.

## REFERENCIAS

- Christenhusz, M. J. M., & Chase, M. W. (2014). Trends and concepts in fern classification. *Annals of Botany*, 113(4), 571-594.
- Christenhusz, M. J. M., Zhang, X.-C., & Schneider, H. (2011). A linear sequence of extant families and genera of lycophytes and ferns. *Phytotaxa*, 19, 7-54.
- Cronquist, A. (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. New York: Columbia University Press.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [cvc]. (1983). *Informe general sobre áreas del sistema de Parques Nacionales ubicados en la jurisdicción de la cvc*. Palmira, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, División Recursos Naturales.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [cvc]. (2010). *Informe final Convenio 256 de 2010. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Grupo Sistemas de Información Ambiental, Grupo de Biodiversidad*, Cali, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- Espinal, L. S. (1968). *Visión ecológica del Departamento del Valle del Cauca*. Cali: Universidad del Valle.
- Gamboa-Gaitán, M. A., & Ramos, J. E. (1995). Composición florística y diversidad vegetal de un bosque premontano en Los Farallones de Cali. En: *Memorias del Primer Congreso Nacional sobre Biodiversidad* (pp. 71-76). Instituto de Estudios del Pacífico, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Gamboa-Gaitán, M. A. (1995). *Contribución a la flora de Los Farallones de Cali. I. Vereda Pico de Águila* (tesis de grado). Departamento de Biología, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- García-Kirkbride, M. C. (1986). *Biological evaluation of the Chocó biogeographic region in Colombia*. Washington D. C.: World Wild Fund.
- Hennipman, E., Veldhoen, P., Kramer, K. U., & Price, M. G. (1990). *Polypodiaceae*. En Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 203-230). Berlín: Springer-Verlag.
- Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (2007). *Plant systematics: A phylogenetic approach* (3<sup>rd</sup> ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.

- Kramer, K. U., Chambers, T. C., & Hennipman, E. (1990). *Blechnaceae*. En Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 60-68). Berlín: Springer-Verlag.
- Kramer, K. U., & Green, P. S. (1990). Pteridophytes and Gymnosperms, volumen I. En: Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants*. Berlín: Springer-Verlag.
- Kramer, K. U., Holttum, R. E., Moran, R. C., & Smith, A. R. (1990). *Dryopteridaceae*. En: Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 101-144). Berlín: Springer-Verlag.
- Kramer, K. U., & Viane, R. (1990). *Aspleniaceae*. En: Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 52-57). Berlín: Springer-Verlag.
- Mahecha-Vega, G. E., & Echeverri-Restrepo, R. (1983). *Árboles del Valle del Cauca*. Bogotá: Progreso Corporación Financiera S. A.
- Murillo, M. T. (1983). *Usos de los helechos en Suramérica con especial referencia a Colombia*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia [PNNC]. (2005). *Plan de manejo 2005-2009 Parque Nacional Natural Farallones de Cali*. Cali: Parques Nacionales Naturales de Colombia, Dirección Territorial de Suroccidente.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia [PNNC]. (2007, diciembre). *Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Recuperado de [http://www.parquesnacionales.gov.co/pnn/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.010903&f\\_patron=01.0109](http://www.parquesnacionales.gov.co/pnn/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.010903&f_patron=01.0109)
- Pryer, K. M., Schneider, H., Smith, A. R., Cranfill, R., Wolf, P. G., Hunt, J. S., & Sipes, S. D. 2001. Horsetails and ferns are a monophyletic group and the closest living relatives to seed plants. *Nature*, 409, 618-622.
- Rangel-Ch, J. O., Aguilar-P, M., Sánchez-C, H., & Lowy-C, P. (1995). Región costa pacífica. En Rangel-Ch, J. O. (Ed.). *Colombia diversidad biótica I* (pp. 121-139). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Raubeson, L. A., & Jansen, R. K. (1992). Chloroplast DNA evidence on the ancient evolutionary split in vascular land plants. *Science*, 255, 1697-1699.
- Sarria, S. (1993). *Parque Nacional Natural Farallones de Cali*. (Monografía). Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca/Fundación Protectora de las Cuencas, Procuencas.
- Smith, A. R. (1990). *Thelypteridaceae*. En: Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 263-272). Berlín: Springer-Verlag.
- Smith, A. R., Pryer, K. M., Schuettpelz, E., Korall, P., Schneider, H., & Wolf, P. G. (2006). A classification for extant ferns. *Taxon*, 55(3), 705-731.
- Takhtajan, A. (1997). *Diversity and classification of flowering plants*. New York, NY: Columbia University Press.
- Tryon, R. M., Tryon, A. F., & Kramer, K. U. 1990. *Pteridaceae*. En: Kubitzki, K. U. (Ed.). *The families and genera of vascular plants. Volume I: Pteridophytes and gymnosperms* (pp. 230-256). Berlín: Springer-Verlag.

# Crecimiento y pigmentos de *Spirulina subsalsa* cultivada a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno

## Growth and Pigments of *Spirulina subsalsa* Grown at Different Salinities and Nitrogen Concentrations

**Lolymar Romero Maza**

Licenciada en Química y Magister Scientiarum en Ciencias Marinas de la Universidad de Oriente  
Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre, Venezuela  
<https://orcid.org/0000-0003-1072-6596>  
lolyrome@gmail.com

**Miguel Guevara**

Licenciado en Biología y Magister en Ciencias Marinas de la Universidad de Oriente  
Doctor en Ciencias Biológicas de la Universidad de Concepción  
Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, República Dominicana  
<https://orcid.org/0000-0002-1830-3822>  
miguevara2003@gmail.com

**José Félix Bernal**

Licenciado en Biología y Magister en Ciencias Marinas de la Universidad de Oriente  
Departamento de Biología de la Universidad de Oriente, Venezuela  
<https://orcid.org/0000-0003-2445-6638>  
josefelix.bernal@gmail.com

Fecha de recepción: 17 de octubre del 2018

Fecha de aceptación: 13 de noviembre del 2018

**Sugerencia de citación:** Romero-Maza, L., Guevara, M., y Bernal, J. F. (2018).

Crecimiento y pigmentos de *Spirulina subsalsa* cultivada a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno. *Mutis* 8(2) 25-36.  
doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1402>

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el crecimiento y el contenido de pigmentos de un nuevo aislado de *Spirulina subsalsa* cultivada en agua mar a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno. La nueva cepa de *S. subsalsa* se aisló a partir de muestras de agua procedentes del embalse de Clavellino, estado Sucre, Venezuela, y fue identificada haciendo uso de la clave taxonómica propuesta por Aguiar (2013). El medio de cultivo ensayado fue el f/2, modificando las concentraciones de nitrato (14,5; 29 y 58 mmol/L) y cloruro de sodio (0, 9 y 18 ‰ por adición de agua de mar). Los cultivos se realizaron por triplicado, de forma discontinua, bajo condiciones de medio ambiente controlado (T: 30±1 °C; iluminación: 3.000 lux; agitación manual, fotoperiodo 12:12), durante 21 días. Los resultados obtenidos evidenciaron que la salinidad de 9 ‰ y la concentración de



nitrate de 14 mmol/L fueron los parámetros que propiciaron los mayores contenidos de biomasa; mientras que la clorofila *a* y la ficocianina mostraron mayores valores en la misma concentración de nitrógeno, 0 ‰. Estos hallazgos indican que la salinidad y la concentración de nitrógeno afectan el crecimiento y los pigmentos del nuevo aislado de *S. subsalsa* y además sugieren que esta cepa posee potencial para su aprovechamiento biotecnológico con miras a obtener metabolitos valiosos en las industrias alimenticias y farmacológicas.

**Palabras clave:** cianobacteria, agua de mar, biotecnología.

## ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the growth and content of pigments of a new isolate of *Spirulina subsalsa* grown in seawater at different salinities and nitrogen concentrations. The new *S. subsalsa* strain was isolated from water samples from the Clavellino reservoir, Sucre state, Venezuela, and was identified using the taxonomic key proposed by Aguiar (2013). The culture medium tested was f / 2 Guillard, modifying the concentrations of nitrate (14.5; 29, 59 mmol/L) and sodium chloride (0, 9 and 18 ‰ by the addition of seawater). The cultures were carried out in triplicate, discontinuously, under conditions of controlled environment (T: 30±1 °C, illumination: 3,000 lux, manual agitation, photoperiod 12:12), for 21 days. The results obtained showed that the salinity of 9 ‰ and the nitrate concentration of 14 mmol/L were the parameters that propitiated the highest biomass; while chlorophyll *a* and phycocyanin showed higher values at the same nitrogen concentration at 0 ‰. These findings indicate that salinity and nitrogen concentration affect the growth and pigments of the new isolate of *S. subsalsa* and suggest that this strain has potential for its biotechnological exploitation in order to obtain valuable metabolites for food and pharmacological industries.

**Keywords:** Cyanobacteria, sea water, biotechnology.

## INTRODUCCIÓN

Las cianobacterias, comúnmente denominadas algas verde azules, comprenden un grupo grande y heterogéneo de procariontes fotoautotróficos (Van-Den-Hoek, Mann, & Jahns, 1995) con muchas aplicaciones biotecnológicas (Encarnação, Pais, Campos, & Burrows, 2015; Sommella *et al.*, 2018). Dentro de este grupo se encuentra *Spirulina*, la cual muchas veces es confundida con *Arthrospira*, aunque en la actualidad está totalmente esclarecido que corresponden a dos géneros totalmente distintos (Ali & Saleh, 2012). Algunas de sus características, tales como forma, tamaño de los filamentos, forma de sus tricomas y espiras, presencia o no de vesículas de gas y caliptras, entre otras, son utilizadas para la clasificación de las cianobacterias; sin embargo, estos atributos pueden variar considerablemente a causa de los cambios morfológicos inducidos por las condiciones de cultivo y la plasticidad fenotípica de las cianobacterias, lo cual puede conducir a errores en la identificación taxonómica de las cepas (Lyra *et al.*, 2001; Valerio *et al.*, 2009).

Los miembros del género *Spirulina* crecen en medios alcalinos y poseen filamentos espiralados o helicoidales. Estos son ampliamente utilizados como fuente de proteínas, vitaminas y minerales y como medicamentos contra el cáncer (Fedorov *et al.*, 2013; Ouhtit *et al.*, 2014), la hiperlipidemia (Deng & Chow, 2010), el daño renal y hepático (Gallardo-Casas *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2012), la diabetes (Layam & Kasi, 2006) y diferentes enfermedades neurodegenerativas (Salvador, Uranga & Giusto, 2011).

Otros metabolitos sintetizados por *Spirulina* son los pigmentos (Khazi, Demirel, & Dalay, 2018; Murugan & Rajesh, 2014), los cuales, al igual que el resto de la composición química, están influenciados por los parámetros físico-químicos que interactúan en cultivos, a saber: temperatura (Lee, Chen, & Peng, 2012; Pandey & Tiwari, 2010; Uslu, Isik, Koc, & Goksan, 2011), aireación (Ravelonandro *et al.*, 2011), concentración de dióxido de carbono (Soletto *et al.*, 2008), fuentes de carbono (Soundarapandian & Vasanthi, 2010), intensidad de luz (Lee *et al.*, 2012; Pandey & Tiwari, 2010; Ravelonandro *et al.*, 2011), pH (Pandey & Tiwari, 2010) y concentraciones de nutrientes como nitrógeno (Colla, Furlong, & Vieira,

2007a; Colla, Reinehr, Carolina, & Jorge, 2007b; Uslu *et al.*, 2011) o fósforo (Markou, 2012; Markou, Chatzipavlidis, & Georgakakis, 2012; Ravelonandro *et al.*, 2011; Uslu *et al.*, 2011; Yuan, Kumar, Sahu, & Ergas, 2011).

Los principales pigmentos presentes en *Spirulina* incluyen carotenoides, xantofilas, clorofila y ficobiliproteínas (Saini, Pabbi, & Shukla, 2018). Tanto la clorofila *a* como la ficocianina son ampliamente utilizadas en las industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas. Su consumo ha aportado muchos beneficios a la salud como un agente nutracéutico con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimutagénicas y antimicrobianas (Da Silva-Ferreira & Sant'Anna, 2017; Marín-Prida *et al.*, 2015).

Los cultivos de *Spirulina* suelen realizarse en agua dulce y con medios de cultivo costosos debido a la inclusión de un gran número de sales de grado analítico. Entre estos medios destacan el Zarrouk (Zarrouk, 1966), *Spirulina* (Aiba & Ogawa, 1977), BG-11 (Rippka, 1988) y algunos medios modificados (Amala & Ramanathan, 2013; Kumari, Kumar, Pathak, & Guria, 2014a; Kumari, Sharma, Pathak, & Guria, 2014b). Esta situación ha propiciado la búsqueda de fuentes alternativas de medios de cultivos que incluyan el uso de agua marina, con el fin de posibilitar la obtención de altos rendimientos de biomasa a bajo costo.

La evaluación de nuevos aislados de *S. subsalsa* con miras a su manejo biotecnológico para la producción de metabolitos industriales es de suma importancia, dado que se ha demostrado que las respuestas de las cianobacterias y las microalgas, en general, a los cambios de los factores abióticos varían notablemente de una especie a otra, entre cepas de una misma especie e incluso entre clones originados de un mismo cultivo unialgal (Gómez & González, 2005). Al respecto, ha sido documentado que el análisis de miles de especies de microalgas han mostrado diferencias significativas en el contenido de lípidos entre diferentes cepas, que van desde 1% hasta aproximadamente 85 % de la masa seca de las células (Chisti, 2007; Li *et al.*, 2008). En el caso de *Arthrospira* y *Spirulina*, Cohen, Vonshak & Richmond (1987) evidenciaron variabilidad en los contenidos de metabolitos de 18 cepas de estas cianobacterias, especialmente en los ácidos grasos poliinsaturados. Las disimilitudes observadas entre las cepas pueden

ser resultado de diferencias morfológicas y fisiológicas, atribuibles a variaciones genéticas intraespecíficas, tal como han señalado Whyte (1987), Gómez y González (2005) y Guevara *et al.* (2016).

Tomando en consideración los planteamientos antes señalados, relacionados con la importancia económica de *Spirulina* y las diferencias que poseen las diferentes cepas, la presente investigación planteó la evaluación del crecimiento y el contenido de pigmentos de una nueva cepa de *Spirulina subsalsa* cultivada en agua de mar a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno, lo cual vendría a ser un reporte novedoso para la biotecnología de cianobacterias procedentes de represas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Aislamiento e identificación de la cianobacteria

#### *Spirulina subsalsa*

Las muestras de agua fueron tomadas superficialmente (0-5 m de profundidad) con colectores plásticos estériles de 350 mL de capacidad, entre 0-5 m de distancia de la orilla del embalse de Clavellino, estado Sucre, Venezuela (coordenadas: entre 10° 19' hasta 10° 23' Lat. N y entre 63° 35' hasta 63° 40' Long. O), y posteriormente llevadas al Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del Departamento de Biología Pesquera del Instituto Oceanográfico de Venezuela, en la Universidad de Oriente.

En el laboratorio, las muestras de agua del embalse fueron diluidas en agua destilada previamente esterilizada (120 °C, 15 PSI, 15 min). Posteriormente, las muestras fueron inoculadas con la ayuda de un asa de siembra en placas de Petri contentivas de 15 mL de medio sólido *Spirulina* (Aiba & Ogawa, 1977) e incubadas a temperatura de 25±1 °C, iluminación de 39 μE/m<sup>2</sup>s y fotoperiodo 12:12, hasta la aparición de las colonias verdeazuladas. Estas últimas fueron tomadas con asa de siembra y resuspendidas en medio *Spirulina* líquido para su purificación. Una vez obtenidas, las colonias puras de la cianobacteria se colocaron en tubos de vidrios estériles con tapas de baquelitas de 15 mL de capacidad, contentivos de 10 mL de medio líquido *Spirulina* y se mantuvieron en cámara de cultivo a las condiciones ambientales antes mencionadas.



Al evidenciar crecimiento, se procedió a la verificación de la pureza de la cepa mediante observaciones en el microscopio a 40X y al resguardo de la misma para su posterior identificación, la cual se realizó en el Laboratorio de Taxonomía de Fitoplancton del Departamento de Biología de la Universidad de Oriente, Venezuela, utilizando criterios morfológicos y siguiendo las claves taxonómicas propuesta por Aguiar (2013). La cepa aislada fue incorporada al Banco de Germoplasma de Algas del Instituto Oceanográfico de Venezuela, Universidad de Oriente, con el código BGAUDO 161.

### **Crecimiento y contenido de pigmentos de la cepa *S. subsalsa* a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno**

Los cultivos de la cepa de *S. subsalsa* se realizaron en agua de mar previamente tratada, según la metodología de Faucher, Coupal y Leduy (1979), la cual consistió en ajustar el pH del agua de mar (37 ‰) a 9,2 por adición de hidróxido de sodio. Posteriormente, se adicionó 19,2 g/L de bicarbonato de sodio, se dejó reposar por 2 h a 35 °C, se filtró a través filtros Whatman GF/C y se ajustó el pH a 8,5 con ácido clorhídrico 5 eq/L, para finalmente repetir el filtrado. Las salinidades evaluadas (9 y 18 ‰) se obtuvieron mediante diluciones, con agua destilada, del agua de mar tratada. Los cultivos a 0 ‰ fueron realizados con agua destilada. Como medio de cultivo se utilizó el f/2 Guillard (Guillard, 1975), ajustándose a tres concentraciones de nitrógeno (14,5, 29 y 58 mmol/L) y adicionando 8 g/L de bicarbonato de sodio. La selección de las concentraciones de nitrógeno se basó en las usadas por el medio Zarrouk (Zarrouk, 1966), el cual es el más utilizado en el cultivo de *Spirulina* y tiene una concentración de nitrógeno de 29 mmol/L. Usando esta concentración como referencia, se decidió evaluar la influencia de mayores (2X) y menores (X/2) concentraciones de nitrógeno en el crecimiento y acumulación de pigmentos en *S. subsalsa*.

Los cultivos se realizaron de forma discontinua, por triplicado, bajo condiciones de medio ambiente controlado (T: 30±1 °C; iluminación: 3.000 lux; agitación manual, fotoperiodo 12:12), durante 21 días. Se usaron tubos de ensayo, con tapa de algodón, contentivos de 10 mL del medio de cultivo y dispuestos sobre bandejas de madera, con una inclinación de

25°. La densidad poblacional inicial fue de 0,5±0,025 mg/L, y desde el inicio del ensayo y cada 48 h se tomaron muestras de cada uno de los tratamientos para determinar el pH y el crecimiento poblacional según criterio de Pelizer y Oliveira (2014).

La cuantificación de ficocianina se realizó de acuerdo con lo propuesto por Boussiba y Richmond (1979) y Bennett y Bogorad (1973). Por su parte, la clorofila *a* se determinó siguiendo los criterios de Jeffrey y Humphrey (1975).

### **Análisis de resultados**

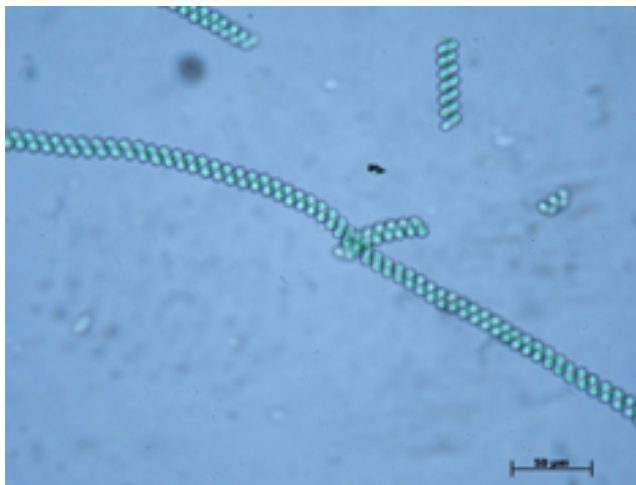
Previo cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de las varianzas y normalidad, los datos de los valores de biomasa y pigmentos de *S. subsalsa*, obtenidos en los diferentes tratamientos, fueron contrastados mediante un análisis de varianza de dos factores (salinidad y concentración de nitrógeno). Su posterior análisis fue realizado a través de pruebas de rango múltiples, siguiendo las recomendaciones de Sokal & Rohlf (1995).

## **RESULTADOS**

### **Identificación de la cianobacteria *S. subsalsa***

La cianobacteria aislada del embalse de Clavellino es filamentosa, cilíndrica-helicoidal con extremos ligeramente redondeados, con tricomas aislados, de contenido celular verde-azulado pálido y homogéneo. Sus espiras son estrechas, yuxtapuestas, densas y regulares. Los filamentos poseen un diámetro entre 1-2,3 µm, con distancia y altura entre las espiras entre 1-2 µm y 2-3,3 µm, respectivamente. No se observaron vesículas de gas ni caliptra en las terminaciones de las células (figura 1). Estas características, junto con lo expuesto por Aguiar (2013) y Luo y Jiang (2015), permiten concluir que la cianobacteria aislada es *Spirulina subsalsa*.

**Figura 1.** Micrografías de *Spirulina subsalsa* aislada del Embalse de Clavellino, estado Sucre, Venezuela



### Crecimiento y contenido de pigmentos de la cepa *S. subsalsa* a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno

El crecimiento de la cepa de *S. subsalsa* se muestra en la figura 2, en la que se observa que hasta el día 15, en todas las salinidades y concentraciones de nitrógeno evaluadas, esta cepa mostró un crecimiento similar, con contenidos de biomasa entre 0,3–0,6 mg/mL. A partir de allí, se incrementó la producción de biomasa, presentando al final del ensayo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los tratamientos, siendo los cultivos a 9‰ y 14 mmol/L de N los que produjeron mayor biomasa (2,07 mg/mL).

Los contenidos de clorofila *a* (figura 3) y ficocianina (figura 4) presentaron diferencias significativas entre las salinidades ( $p < 0,05$ ) y las concentraciones de nitrógeno ( $p < 0,05$ ) evaluadas. Ambos pigmentos disminuyeron sus contenidos al incrementar tanto la salinidad como la concentración de nitrógeno. La interacción entre estos factores fue significativa ( $p < 0,05$ ), lo que sugiere que la acumulación de ambos tipos de pigmentos está influenciada simultáneamente por la salinidad y el aporte de nitrógeno. Los mayores valores de clorofila *a* (6,9  $\mu\text{g/mL}$ ) y ficocianina (4,9  $\mu\text{g/mL}$ ) se obtuvieron en los cultivos expuestos a una salinidad de 0 y a una concentración de 14 mmol/L de N.

**Figura 2.** Crecimiento de *S. subsalsa* aislada del Embalse de Clavellino, estado Sucre, cultivada en agua mar a diferentes salinidades (0, 9 y 18‰) y concentraciones de nitrógeno (14,5, 29 y 58 mmol/L)

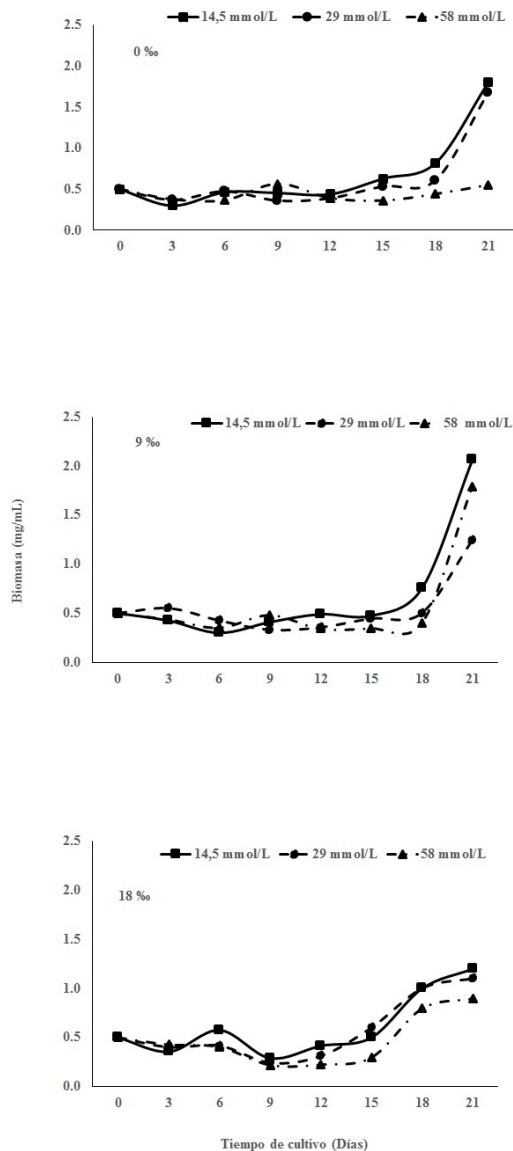




Figura 3. Contenidos de clorofila *a* ( $\mu\text{g/mL}$ ) de *S. subsalsa* cultivada en agua mar a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno ( $\text{mmol/L}$ )

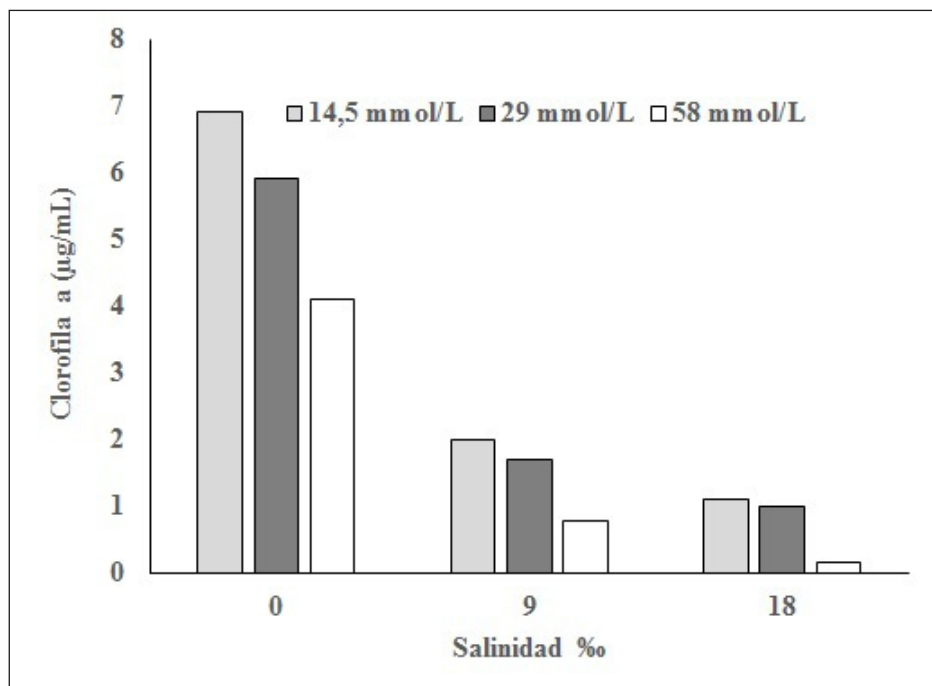
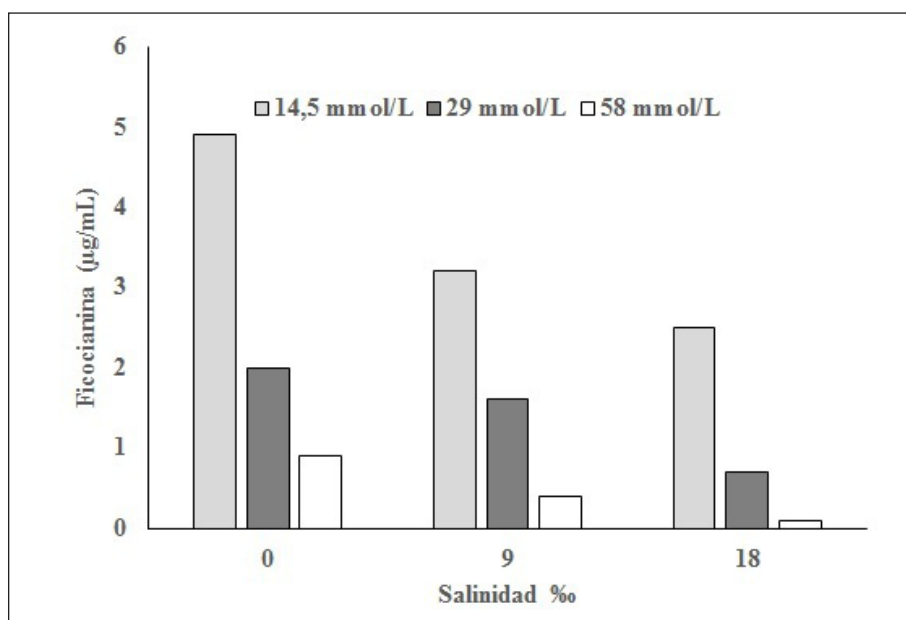


Figura 4. Contenidos de ficocianina ( $\mu\text{g/mL}$ ) de *S. subsalsa* cultivada en agua mar a diferentes salinidades y concentraciones de nitrógeno ( $\text{mmol/L}$ )



## DISCUSIÓN

A pesar de que el uso de los caracteres morfológicos permitió la identificación de la cianobacteria como *Spirulina subsalsa*, hay que tener en consideración que la taxonomía de cianobacterias filamentosas es ambigua debido a que las principales características

que diferencian las especies (cantidad de espirales, por ejemplo) pueden variar en función de la plasticidad fenotípica y las condiciones ambientales o de cultivo, particularmente temperatura, concentración de nitrógeno y salinidad (Eykelenburg, 1979; Lewin, 1980; Lyra *et al.*, 2001; Valerio *et al.*, 2009). Estudios

moleculares posteriores, como el 16S rRNA, permitirían esclarecer las dudas existentes en cuanto a la correcta identificación de la cepa analizada.

La presencia de esta cianobacteria en el embalse mencionado fue referida por Bernal (2002). El embalse muestreado presenta rangos de temperatura entre 28 y 31 °C y valores de pH entre 7,2 y 8,7, siendo más alcalino (cerca de pH 9) en las horas de la tarde (García, 2009; Merayo & González, 2010), lo cual favorece el crecimiento del microorganismo en este tipo de ecosistema, según Whitton (2012). Otros ecosistemas venezolanos donde se ha evidenciado la presencia de *S. subsalsa* y de otros miembros del género *Spirulina* incluyen al Lago de Maracaibo (Rodríguez, 2002), los embalses Pao-Cachinche (límites entre los estados Carabobo y Cojedes), la Mariposa (Distrito capital), la Pereza y Quebrada Seca (estado Miranda), el Lagartijo (estado Miranda) y el Archipiélago de Los Roques (González *et al.*, 2003; Petrash *et al.*, 2012); sin embargo, no existen reportes sobre su cultivo en el país.

Algunos autores han trabajado en el cultivo de *Spirulina* variando las condiciones de cultivo, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas que permitan maximizar la producción de biomasa o algún metabolito en particular (Markou *et al.*, 2012; Markou, 2012); tal es el caso de Sallal, Al-Hassan y Nimer, (1990), quienes estudiaron la actividad de la glicolato deshidrogenasa presente en *S. subsalsa*, la cual está asociada a las membranas tilacoides y es la responsable de su capacidad para crecer a rangos variados de salinidad, reportando que dicha microalga puede crecer de forma óptima a concentraciones de NaCl de 0-9 g/L.

Los contenidos de biomasa en varias especies de *Spirulina* son variables. Así, por ejemplo, El-Khair, El-Sayed y El-Sheekh (2018), quienes ensayaron varios sistemas de cultivo en fotobioreactores para el cultivo de *Spirulina platensis* en medio Zarrouk, lograron alcanzar niveles de biomasa de 1,4 g/L. Por su parte Khazi *et al.* (2018) realizaron varios ensayos con *S. platensis* a fin de evaluar, entre otros parámetros, la biomasa producida por dicha cianobacteria en función de la variabilidad de temperatura, irradiación de luz y agitación, encontrando que 33 °C, 44  $\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$  y 2,5 L/min de agitación fueron las condiciones que propiciaron el mayor crecimiento, logrando obtener 2,42 g/L; resultados muy similares

a los de esta investigación. Por otro lado, Torres *et al.* (2018) obtuvieron solo 0,9 g/L de biomasa para esta misma especie, cuando los cultivos fueron realizados en fotobioreactores utilizando  $\text{KNO}_3$  y urea como fuentes de nitrógeno y una salinidad de 5 ‰. Todos los autores antes mencionados coinciden en que las variables de cultivos, principalmente la concentración de nitrógeno y la salinidad, son determinantes para incrementar la productividad de *Spirulina*.

Con respecto a los contenidos de pigmentos, Dineshkumar, Umamageswari, Jayasingam y Sampathkumar (2015) encontraron valores de clorofila *a* de 12,6  $\mu\text{g/mL}$  para cultivos de *Spirulina platensis* en medio Zarrouk (29 mmol/L de N y salinidad de 1 ‰) con adición de sustrato orgánico (melaza). Por su parte, Çelekli y Yavuzatmaca (2009) evaluaron diferentes concentraciones de nitrato y NaCl en la producción de *Spirulina platensis*, obteniendo la más alta producción de clorofila (29,92 mg/L) a concentraciones de 29,4 mmol/L de  $\text{NaNO}_3$  y 1,5 ‰ de salinidad, respectivamente.

La salinidad es un parámetro de cultivo que afecta la fisiología de *Spirulina* (Sreevani, Bhanumathi, Mohammad, & Murthy, 2011; Sharma, Kumar, Irfan, & Dut, 2014), ejerciendo su efecto en el crecimiento, la síntesis de clorofila *a*, la ficocianina y los carotenoides (Lamela & Márquez, 2000; Murugan & Rajesh, 2014; Sharma *et al.*, 2014); sin embargo, muchos aspectos fisiológicos, relacionados con la aclimatación, la tolerancia al estrés, la producción de macromoléculas y el crecimiento en medios salinos permanecen sin esclarecer.

Entre los estudios relacionados con el efecto salino en *Spirulina* se incluye el trabajo de Sharma *et al.* (2014), quienes reportaron mejoras en la producción de ficocianina, aloficocianina y ficoeritrina en *Spirulina platensis* cultivada en medio Zarrouk modificado, utilizando 0,4 mol/L de NaCl. Murugan y Rajesh (2014) cultivaron dos especies de *Spirulina* en agua de mar por 15 días a 27 °C e irradiación de 1,7 klux, obteniendo una producción de biomasa y ficocianina en los cultivos con agua de mar comparables a la encontrada en los cultivos controles (medio Zarrouk), lo cual les permitió concluir que el agua de mar representa una alternativa para el cultivo de esta cianobacteria.

Conclusiones similares fueron presentadas por Abd-El-Baky, El-Baz y El-Baroty (2003), quienes

estudiaron la influencia de la deficiencia de nitrógeno y el estrés salino en el contenido de pigmentos en *S. platensis* y *S. maxima*, identificando que el estrés salino de 0,2 mol/L (11,6 ‰) aumenta el contenido de  $\beta$ -caroteno, astaxantina, luteína, zeaxantina y criptoxantina, siendo *S. máxima* la que acumuló mayor contenido de criptoxantina y zeaxantina. Otros autores, como Lamela y Márquez (2000), también han reportado valores de clorofila *a* entre 2,08-2,78 mg/g y carotenoides totales entre 1,56-1,85 mg/g en *A. máxima*, cultivada en agua de mar y medio convencional Zarrouk.

Por otra parte, la concentración de nutrientes es determinante en el crecimiento de las cianobacterias, llegando a comprobarse que las sales de nitrato garantizan los rendimientos más altos de biomasa (Faintuch, 1989), lo cual justifica el uso de medios de cultivo utilizando  $\text{NaNO}_3$  o  $\text{KNO}_3$ , como los sugeridos por Zarrouk (1966) y Schlösser (1982). En tal sentido, Marrez *et al.* (2013) realizaron un estudio de evaluación del efecto de varios medios de cultivo sobre la biomasa y el contenido de pigmentos de *Spirulina platensis*, encontrando que en el medio Zarrouk, cuya concentración de  $\text{NO}_3^-$  es igual a 29 mmol/L, es donde se obtiene la mayor cantidad de biomasa (4,87 g/L).

En el desarrollo de este estudio se encontró que la mayor cantidad de biomasa (2,07 mg/ml) se obtuvo a 14 mmol/L de nitrato y 9 ‰, la cual es la mitad de la concentración de nitrógeno normalmente recomendada para el cultivo de especies del género *Spirulina*. A pesar de que muchas investigaciones refieren que el uso de grandes cantidades de nitrógeno en los medios de cultivo garantiza mayores producciones de biomasa, también se han obtenido altas producciones a bajas concentraciones de este macronutriente, tal como lo refirieron Sassano *et al.* (2007) y Tambiev, Vasilieva y Lukyanov (2011), quienes indicaron que contenidos de 11,7 mmol/L (1g/L) de nitrógeno (menores a los usados en esta investigación) pueden ocasionar mayores crecimientos de esta cianobacteria; comportamiento que puede ser atribuido a las diferencias fisiológicas y de adaptación que puede presentar una cepa en particular. Además de esta evidencia, Fábregas *et al.* (1984) indicaron que la interacción salinidad-concentración de nitrógeno afecta la producción de biomasa de las microalgas. La disminución de las concentraciones de nitrógeno

en los cultivos de microalgas es prioritario, puesto que lleva implícito una reducción de los costos de producción de la biomasa microalgal, uno de los macronutrientes más costosos.

Es de resaltar que durante el desarrollo del ensayo el pH de los cultivos varió entre 9,40-10,90, lo cual favoreció el crecimiento de *S. subsalsa*, considerando que esta cianobacteria presenta óptimos crecimientos en cultivos con pH entre 9-11, tal como señalaron Rincón *et al.* (2013) y Soundarandian y Vasanthi (2010).

## CONCLUSIONES

La salinidad y la concentración de nitrógeno tienen efectos diferentes en el crecimiento y el contenido de clorofila *a* y la ficocianina del nuevo aislado de *Spirulina subsalsa*, siendo 9 ‰ y 14 mmol/L de N, salinidad y concentración de nitrógeno, respectivamente, los que produjeron los mayores contenidos de biomasa. Por su parte, los pigmentos clorofila *a* y ficocianina alcanzaron sus mayores contenidos a 0 ‰ y 14 mmol/L de N. Por ende, esta cepa puede ser considerada como un microorganismo promisorio para las industrias biotecnológicas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Grupo de Investigaciones en Microalgas y por el Postgrado en Ciencias Marinas del Instituto Oceanográfico de Venezuela, Universidad de Oriente, Venezuela.

## REFERENCIAS

- Abd-El-Baky, H., El-Baz, F., & El-Baroty, G. (2003). *Spirulina* species as a source of carotenoids and  $\alpha$ -tocopherol and its anticarcinoma factors. *Biotechnology*, 2(3), 222-240.
- Aguiar, T. (2013). *Cianobacterias marinhas bentônicas filamentosas do litoral do Estado da Bahia, Brasil* (tesis de maestría). Universidad de Estadual de Feira de Santana, Brasil.
- Aiba, S., & Ogawa, T. (1977). Assessment of growth yield of a blue-green alga: *Spirulina platensis*, in axenic and continuous culture. *Journal of General Microbiology*, 102, 179-182.

- Ali, S., & Saleh, A. (2012). *Spirulina* – An overview. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4(3), 9-15.
- Amala, K., & Ramanathan, N. (2013). Comparative studies on production of *Spirulina platensis* on the standard and newly formulated alternative medium. *Science Park*, 1(1), 1-10.
- Bennett, A., & Bogorad, L. (1973). Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga. *The Journal of Cell Biology*, 58(2), 419-435.
- Bernal, J. (2002). *Taxonomía de microalgas en las riberas del Embalse Clavellinos, Municipio Ribero, estado Sucre, Venezuela* (tesis de licenciatura). Departamento de Biología, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.
- Boussiba, S., & Richmond, A. (1979). Isolation and characterization of phycocyanins from the blue alga *Spirulina platensis*. *Archives of Microbiology*, 120(2), 155-159.
- Çelekli, A., & Yavuzatmaca, M. (2009). Predictive modeling of biomass production by *Spirulina platensis* as function of nitrate and NaCl concentrations. *Bioresource Technology*, 100, 1847-1851.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294-306.
- Cohen, Z., Vonshak, A., & Richmond, A. (1987). Fatty acid composition of *Spirulina* strains grown under various environmental conditions. *Phytochemistry*, 26, 2255-2258.
- Colla, L., Furlong, E., & Vieira, J. (2007a). Antioxidant properties of *Spirulina* (*Arthospira*) *platensis* cultivated under different temperatures and nitrogen regimes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 50(1), 161-167.
- Colla, L., Reinehr, C., Carolina, R., & Jorge, A. (2007b). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource. Technology*, 98(7), 1489-1493.
- Da Silva-Ferreira, V., & Sant'Anna, C. (2017). Impact of culture conditions on the chlorophyll content of microalgae for biotechnological applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(1), 20.
- Deng, R., & Chow, T. (2010). Hypolipidemic, antioxidant and anti-inflammatory activities of microalgae *Spirulina*. *Cardiovascular Therapeutics*, 28(4), 33-45.
- Dineshkumar, R., Umamageswari, P., Jayasingam, P., & Sampathkumar, P. (2015). Enhance the growth of *Spirulina platensis* using molasses as organic additives. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4(6), 1057-1066.
- El-Khair, A., El-Sayed, B., & El-Sheekh, M. (2018). Outdoor Cultivation of *Spirulina platensis* for Mass Production. *Notulae Scientia Biologicae*, 10(1), 38-44.
- Encarnação, T., Pais, A., Campos, M., & Burrows, H. (2015). Cyanobacteria and microalgae: a renewable source of bioactive compounds and other chemicals. *Science Progress*, 98, 145-168.
- Eykelenburg, C. (1979). The ultrastructure of *Spirulina platensis* in relation to temperature and light intensity. *Antonie van Leeuwenhoek*, 45, 369-390.
- Fábregas, J., Abalde, J., Herrero, C., Cabezas, B., & Veiga, M. (1984). Growth of marine microalgae *Tetraselmis suecica* in batch cultures with different salinities and nutrient concentration. *Aquaculture*, 51, 237-243.
- Faintuch, B. (1989). *Análise comparativa da produção de biomassa a partir de três cianobactérias empregando distintas fontes nitrogenadas* (master thesis). University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil.
- Faucher, O., Coupal, B., & Leduy, A. (1979). Utilization of seawater and urea as a culture medium for *Spirulina maxima*. *Canadian Journal of Microbiology*, 25, 752.
- Fedorov, S., Svetlana, P., Ermakova, T., Zvyagintseva, N., & Stonik, V. (2013). Anticancer and cancer preventive properties of marine polysaccharides: some results and prospects. *Marine Drugs*, 11, 4876-4901.

- Gallardo-Casas, C., Cano-Europa, E., Lopez-Galindo, G., Blas-Valdivia, V., Olvera-Ramírez, R., Franco-Colín, M., & Ortiz-Butrón, R. (2011). Las ficobiliproteínas de *Spirulina maxima* y *Pseudanabaena tenuis* protegen contra el daño hepático y el estrés oxidativo ocasionado por el Hg<sup>2+</sup>. *Revista Mexicana Ciencias Farmacéuticas*, 41(2), 30-35.
- García, E. (2009). *Variación temporal de la concentración de microcistinas y su relación con algunos parámetros ambientales en aguas del embalse Clavellino, estado Sucre* (trabajo de grado Licenciatura en Química). Universidad de Oriente, Venezuela.
- González, E., Ortaz, M., Peñaherrera, C., Montes, E., Matos, M., & Mendoza, J. (2003). Fitoplancton de cinco embalses de Venezuela con diferentes estados tróficos. *Limnetica*, 22(1-2), 15-35.
- Gómez, P., & González, M. (2005). The effect of temperature and irradiance on the growth and carotenogenic capacity of seven strains of *Dunaliella salina* (Chlorophyta) cultivated under laboratory conditions. *Biological Research*, 38(2-3), 151-162.
- Guevara, M., Arredondo-Vega, B., Palacios, Y., Saéz, K., & Gómez, P. (2016). Comparison of growth and biochemical parameters of two strains of *Rhodomonas salina* (Cryptophyceae) cultivated under different combinations of irradiance, temperature, and nutrients. *Journal of Applied Phycology*, 28(5), 2651-2660.
- Guillard, R. (1975). Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. En Smith, W. L., & Chanle, M. H. (Eds.). *Culture of Marine Invertebrate Animals* (pp. 26-60). New York, USA: Editorial Plenum Press.
- Jeffrey, S., & Humphrey, G. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 167(2), 191-194.
- Khazi, M., Demirel, Z., & Dalay, M. (2018). Enhancement of biomass and phycocyanin content of *Spirulina platensis*. *Frontiers in Bioscience*, 10, 276-286.
- Kumari, A., Kumar, A., Pathak, A., & Guria, C. (2014a). Carbon dioxide assisted *Spirulina platensis* cultivation using NPK-10:26:26 complex fertilizer in sintered disk chromatographic glass bubble column. *Journal of CO<sub>2</sub> utilization*, 8, 49-59.
- Kumari, A., Sharma, V., Pathak, A., & Guria, C. (2014b). Cultivation of *Spirulina platensis* using NPK-10:26:26 complex fertilizer and simulated flue gas in sintered disk chromatographic glass bubble column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1859-1869.
- Lamela, T., & Márquez-Rocha, F. (2000). Phycocyanin production in seawater culture of *Arthrospira maxima*. *Ciencias Marinas*, 26(4), 607-619.
- Layam, A., & Kasi, C. (2006). Antidiabetic property of *Spirulina*. *Diabetologia Croatica*, 35(2), 29-33.
- Lee, M., Chen, Y., & Peng, T. (2012). Two-stage culture method for optimized polysaccharide production in *Spirulina platensis*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(7), 1562-1569.
- Lewin, R. (1980). Uncoiled variants of *Spirulina platensis* (Cyanophyceae: Oscillatoriaceae). *Archive Hydrobiology Supplement*, 60, 48-52.
- Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C., & Dubois, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*, 24(4), 815-820.
- Luo, J., & Jiang, L. (2015). Production of aquatic feed grade algal powder from turtle breeding wastewater using a locally isolated *Spirulina* sp. JXSC-S1. *African Journal of Microbiology Research*, 9(51), 2404-2409.
- Lyra, C., Suomalainen, S., Gugger, M., Vezie, C., Sundman, P., Paulin, L., & Sivonen, K. (2001). Molecular characterization of planktic cyanobacteria of *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* and *Planktothrix* genera. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51, 513-526.
- Marín-Prida, J., Llopiz-Arzuaga, A., Pavón, N., Pentón-Rol, G., & Pardo, G. (2015). Aplicaciones de la C-ficocianina: métodos de obtención y propiedades farmacológicas. *Revista de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*, 1(1), 29-43.



- Markou, G. (2012). Alteration of the biomass composition of *Arthrospira (Spirulina) platensis* under various amounts of limited phosphorus. *Bioresource Technology*, 116, 533-535.
- Markou, G., Chatzipavlidis, I., & Georgakakis, D. (2012). Carbohydrates production and bio-flocculation characteristics in cultures of *Arthrospira (Spirulina) platensis*: Improvements through phosphorus limitation process. *Bioenergy Research*, 5, 915-925.
- Marrez, D., Naguib, M., Sultan, Y., Daw, Z., & Higazy, A. (2013). Impact of culturing media on biomass production and pigments content of *Spirulina platensis*. *International Journal of Advanced Research*, 1(10), 951-961.
- Merayo, S., & González, E. (2010) Variaciones de abundancia y biomasa del zooplancton en un embalse tropical oligo-mesotrófico del norte de Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 58(2), 603-619.
- Murugan, T., & Rajesh, R. (2014). Cultivation of two species of *Spirulina (Spirulina platensis* and *Spirulina platensis* var *lonar*) on sea water medium and extraction of C-phycoyanin. *European Journal of Experimental Biology*, 4(2), 93-97.
- Ouhtit, A., Ismail, M., Othman, A., Fernando, A., Abdraboh, M., El-Kott, A., Azab, ... & Raj, M. H. (2014). Chemoprevention of rat mammary carcinogenesis by *Spirulina*. *The American Journal of Pathology*, 184(1), 296-303.
- Pandey, J., & Tiwari, A. (2010). Optimization of biomass production of *Spirulina maxima*. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 1(2), 20-32.
- Pelizer, L., & Oliveira, I. (2014). A method to estimate the biomass of *Spirulina platensis* cultivated on a solid medium. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(3), 933-936.
- Petrash, D., Gingras, M., Lalonde, S., Orange, F., Pecoits, E., & Konhauser, K. (2012). Dynamic controls on accretion and lithification of modern gypsum-dominated thrombolites, Los Roques, Venezuela. *Sedimentary Geology*, 245-246, 29-47.
- Ravelonandro, P., Ratianarivo, D., Joannis-Cassan, C., Isambert, A., & Raheimandimby, M. (2011). Improvement of the growth of *Arthrospira (Spirulina) platensis* from Toliara (Madagascar): Effect of agitation, salinity and CO<sub>2</sub> addition. *Food and Bioproducts Processing*, 89(3), 209-216.
- Rincón, D., Semprun, A., Dávila, M., Velásquez, H., Morales, E., & Hernández, J. (2013). Producción de harina de *Spirulina maxima* para ser empleada como ingrediente en la elaboración de dietas para peces. *Zootecnia Tropical*, 31(3), 187-191.
- Rippka, R. (1988). Isolation and purification of cyanobacteria. *Methods Enzymology*, 167, 3-27.
- Rodríguez, G. (2001). The Maracaibo System, Venezuela. En Seeliger, U. & Kjerfve, B. (Eds.). *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Berlin: Springer.
- Rodríguez, R., Ortiz, R., Blas, V., Hernández A., & Cano, E. (2012). Phycobiliproteins or C-phycoyanin of *Arthrospira (Spirulina) maxima* protect against HgCl<sub>2</sub>-caused oxidative stress and renal damage. *Food Chemistry*, 135, 2359-2365.
- Saini, D., Pabbi, S., & Shukla, P. (2018). Cyanobacterial pigments: Perspectives and biotechnological approaches. *Food and Chemical Toxicology*, 120, 616-624.
- Sallal, A., Al-Hassan, R., & Nimer, N. (1990). Effect of salinity on photosynthesis and glycolate dehydrogenase of *Spirulina subsalsa* and *Sinechocystis* sp. *British Phycological Society*, 25, 201-203.
- Salvador, G., Uranga, R., & Giusto, N. (2011). Iron and mechanisms of neurotoxicity. *International Journal of Alzheimer's disease*, 2011, 1-9.
- Sassano, C., Gioielli, L., Almeida, K., Sato, S., Perego, P., Converti, A., & Carvalho, J. (2007). Cultivation of *Spirulina platensis* by continuous process using ammonium chloride as nitrogen source. *Biomass and Bioenergy*, 31, 593-598.
- Schlösser, U. (1982). Sammlung von Algenkulturen. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 95, 181-276.

- Sharma, G., Kumar, M., Irfan, M., & Dut, N. (2014). Effect of carbon content, salinity and pH on *Spirulina platensis* for phycocyanin, allophycocyanin and phycoerythrin accumulation. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 6(4), 202-206.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research* (3rd Edition). New York: W. H. Freeman and Co.
- Soletto, D., Binaghi, L., Ferrari, L., Lodi, A., Carvalho, J., Zilli, M., & Converti, A. (2008). Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina platensis* in helical photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 39(2), 369-375.
- Sommella, E., Conte, G., Salviati, E., Pepe, G., Bertamino, A., Ostacolo, C., Sansone, F., Prete, F., Aquino, R., ... & Campiglia, P. (2018). Fast profiling of natural pigments in different *Spirulina Arthrospira platensis* dietary supplements by DI-FT-ICR and evaluation of their antioxidant potential by pre-column DPPH-UHPLC assay. *Molecules*, 23(5), 1152.
- Soundarapandian, P., & Vasanthi, B. (2010). Effects of chemical parameters on *Spirulina platensis* biomass production: optimized method for phycocyanin extraction. *International Journal of Zoological Research*, 6(4), 293-303.
- Sreevani, P., Bhanumathi, G., Mohammad, S., & Murthy, S. (2011). Effect of high salt stress on photosynthetic electron transport activities in the cyanobacterium, *Spirulina platensis*. *The Bioscan*, 6(2), 311-313.
- Tambiev, A., Vasilieva, S., & Lukyanov, A. (2011). Manifestation of salt tolerance of *Spirulina platensis* and *Spirulina maxima* cyanobacteria of the genus *Arthrospira* (*Spirulina*). *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 66(4), 133-137.
- Torres, L., Lopez, Y., Gomez, Y., Bautista, E., & Corzo, L. (2018). Production and broad characterization of a *Spirulina platensis* dry powder grown in bubbled columns. *Journal of Advances in Microbiology*, 9(3), 1-16.
- Uslu, L., Isik, O., Koc, K., & Goksan, T. (2011). The effects of nitrogen deficiencies on the lipid and protein contents of *Spirulina platensis*. *African Journal of Biotechnology*, 10, 386-389.
- Valerio, E., Chambel, L., Paulino, S., Faria, N., Pereira P., & Tenreiro, R. (2009). Molecular identification, typing and traceability of cyanobacteria from freshwater reservoirs. *Microbiology*, 155, 642-656.
- Van-Den-Hoek, C., Mann, D., & Jahns, H. (1995). *Algae. An introduction to Phycology*. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Whitton, B., & Potts, M. (2012). Introduction on the cyanobacteria. En Whitton, B. (Ed.). *Ecology of cyanobacteria II: Their diversity in space and time*. (pp. 1-13). Reino Unido: Springer.
- Whyte, J. (1987). Biochemical composition and energy content of six species of phytoplankton used in mariculture of bivalves. *Aquaculture*, 60, 231-241.
- Yuan, X., Kumar, A., Sahu, A., & Ergas, S. (2011). Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an air lift photobioreactor. *Bioresource Technology*, 102(3), 3234-3239.
- Zarrouk, C. (1966). *Contribution à l'étude de la cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler*. Trab. Doct. Universidad de París, París, Francia.



# Efecto del almidón y dos fitorreguladores sobre la germinación de *Prosthechea sp.*

Effect of Starch and Two Phyto regulators on the Germination Process of *Prosthechea sp.*

**César Ariza**

Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias,  
Universidad de Cundinamarca, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-6983-7621>  
caariza@ucundinamarca.edu.co

**Edwin Deaza**

Ingeniero Agrónomo de la Universidad de Cundinamarca  
Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias,  
Universidad de Cundinamarca, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-3501-4325>  
edeaza2511@gmail.com

**Arlette Gil**

M.Sc. en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia  
Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias,  
Universidad de Cundinamarca, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-6536-5877>  
aigil@ucundinamarca.edu.co

**Cristian Orjuela**

Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias,  
Universidad de Cundinamarca, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-6133-3472>  
cristianorjuela92@hotmail.com

Fecha de recepción: 11 de noviembre del 2017

Fecha de aceptación: 1 de junio del 2018

**Sugerencia de citación:** Ariza, C., Deaza, E., Gil, A., y Orjuela, C. (2018). Efecto del almidón y dos fitorreguladores sobre la germinación de *Prosthechea sp.* *Mutis*, 8(2), 37-46, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1403>

## RESUMEN

Este artículo aborda la investigación que se realizó para determinar el efecto del almidón y dos reguladores de crecimiento (6-bencilaminopurina, BAP, y ácido naftalenacético, ANA) sobre la germinación de *Prosthechea sp.*, una orquídea cuya población está disminuyendo y en peligro de extinción en San Rafael, zona rural de Fusagasugá (Cundinamarca, Colombia), debido a la deforestación y a la explotación ilegal por parte de sus habitantes. Como alternativa para su propagación, algunas semillas se cultivaron *in vitro* sobre el medio Murashige y Skoog, suplementado con almidón (0, 10 g×L<sup>-1</sup>), BAP (0, 0.5, 1 y 2 mg×L<sup>-1</sup>) y ANA (0, 0.5, 1 y 2 mg×L<sup>-1</sup>), durante 12 semanas. Se utilizó un diseño al azar con un arreglo factorial de 2×4×4, con 32 tratamientos y 5 repeticiones. En los resultados



se observó que los tratamientos suplementados con almidón obtuvieron los mayores valores de germinación, siendo el adicionado con BAP ( $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) y ANA ( $0.5 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) el mejor, con un 52.67%.

**Palabras clave:** auxina, citoquinina, *in vitro*, semillas, orquídeas.

## ABSTRACT

This paper presents the research that was carried out to determine the effect of starch and two growth regulators (6-benzylaminopurine, BAP, and naphthalene acetic acid, ANA) on the germination of *Prosthechea sp.*, an orchid whose population is declining and at risk of extinction in San Rafael, rural area of Fusagasuga (Cundinamarca, Colombia), due to deforestation and illegal exploitation by local inhabitants. As an alternative for its propagation, some seeds were cultivated *in vitro* on the Murashige and Skoog medium, supplemented with starch ( $0, 10 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ ), BAP ( $0, 0.5, 1, \text{ and } 2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ), and ANA ( $0, 0.5, 1, \text{ and } 2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ), for 12 weeks. A random design was used with a  $2 \times 4 \times 4$  factorial arrangement, with 32 treatments and 5 repetitions. The results showed that the treatments supplemented with starch obtained the highest values of germination, being the one added with BAP ( $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) and ANA ( $0.5 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) the best, with 52.67%.

**Keywords:** Auxin, cytokinin, *in vitro*, seeds, orchids.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país diverso en cultura, fauna y flora; en particular, tiene una gran diversidad de orquídeas nativas. Se estima que existen alrededor de 9.000 especies entre los bosques húmedos de Colombia y Ecuador; sin embargo, se reportan aproximadamente 3.000 especies en peligro de extinción (Pérez, Sánchez & Ortiz, 2009). En Colombia, las orquídeas ocupan el deshonroso primer lugar como la familia de plantas con el mayor número de especies amenazadas (Calderón-Sáenz, 2007). Las especies de los bosques nublados del país tienen doble riesgo debido a sus niveles altos de endemismo y a las tasas elevadas de conversión de sus ecosistemas para actividades como la agricultura y la ganadería; además, se prevé que esta situación se agravará como consecuencia del calentamiento global (Jarvis, 2009).

*Prosthechea sp.* es una orquídea muy apetecida entre las personas por el color y forma de sus flores, lo cual ha afectado su población debido a la colecta ilegal e indiscriminada y a la paulatina deforestación por parte de los habitantes de las zonas rurales del municipio de Fusagasugá (departamento de Cundinamarca, Colombia). Ante esta situación, es necesario establecer un programa de conservación de orquídeas. En el caso del género *Prosthechea*, sería pertinente usar la propagación *in vitro*, teniendo en cuenta que es importante conocer las diferentes concentraciones ade-

cuadas de reguladores de crecimiento para producir más plántulas en el menor tiempo posible y disminuir los costos de producción.

Entre las medidas que se han implementado para contrarrestar esta problemática y velar por la conservación de las orquídeas, se encuentran los programas de propagación artificial de especies en peligro de extinción (Arditti & Ernst, 1993). Por lo tanto, la tecnología de cultivos de tejidos vegetales ofrece una alternativa adecuada para facilitar los trabajos de multiplicación a gran escala y suplir los requerimientos necesarios para los planes de conservación (Gil, Contreras, & Gutiérrez, 2016).

Knudson (1922) descubrió que las semillas podían ser germinadas en un medio simple con azúcar, lo que revolucionó la propagación y el cultivo de orquídeas. Su trabajo demostró que la germinación de semillas de orquídeas en condiciones *in vitro* era posible sin la asociación con hongos. Posteriormente, propuso una nueva solución con la adición de nutrientes para la germinación de semillas de orquídeas en 1946 (Martín, 2003). Las aplicaciones del cultivo *in vitro* de orquídeas son muchas: propagación masiva de plantas –especialmente de difícil propagación o en vías de extinción–, clonación de individuos de características agronómicas muy deseables durante todo el año, obtención de plantas libres de virus, conservación de germoplasmas, producción de nuevos híbridos, mejo-

ra genética de plantas y germinación de semillas (Soto-Arenas, Solano-Gómez, & Hagsater, 2007).

Los reguladores de crecimiento vegetal se emplean para promover la división y diferenciación celular. En este sentido, dentro del cultivo *in vitro* de orquídeas los más utilizados son la citoquinina bencilaminopurina (BAP) y la auxina ácido naftalenacético (ANA). Su uso específico en las etapas de germinación y desarrollo de las semillas en medio *in vitro* permite aumentar la tasa de germinación y reducir el tiempo de desarrollo de los protocormos, cualidades necesarias para un eficiente método de propagación a gran escala (Rodrigues, Gomes, Pasqual, Almendagna, & De Assis, 2009). Además, el uso adecuado de nutrientes complejos favorece un mayor crecimiento y desarrollo de algunas especies de orquídeas (Kitsaki, Zygouraki, Ziobora, & Kintzios, 2004; Yam & Arditti, 2009; Yong, Ge, Ng & Tan, 2009).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la citoquinina BAP, la auxina ANA y el almidón sobre la germinación de las semillas de la orquídea *Prosthechea sp.*, con el fin de ayudar a mitigar la disminución de las poblaciones silvestres de dicha especie.

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial, las orquídeas son conocidas como las flores más raras del reino vegetal debido a su complejidad morfológica y a la taxonomía de cada especie. Esto resulta en su admiración y fascinación, lo que ocasiona su sobreexplotación, afectando la conservación y preservación de estas plantas, ya que se convierte en un negocio muy lucrativo para los recolectores por su valor comercial. La propagación de la familia Orquidaceae es muy compleja y limitada porque posee semillas diminutas con un embrión simple carente de endospermo, lo cual dificulta su germinación *ex vitro*. Esto impide su comercialización a gran escala, por lo que se extrae abruptamente del hábitat de desarrollo, generando así un desequilibrio en el ecosistema (De la Nova, Oria, Casadesus, & Gómez, 1998).

Solamente del 2 al 5 % de las semillas de orquídeas germinan de forma natural (Rao, 1997) y, si lo hacen, se toman un largo tiempo. Además, cualquier disturbio en el hábitat o ambiente físico puede destruir la totalidad de la población (Pant & Thapa, 2012). Las orquídeas se caracterizan por tener semillas muy pe-

queñas y numerosas, comúnmente llamadas semillas polvo, de considerable variación, que poseen una escasa reserva de nutrientes para germinar. El número de semillas puede variar de 13.000 a 4.000.000 por cápsula. Una semilla de orquídea mide de 0,25 a 1,2 mm de largo y de 0,009 a 0,27 mm de ancho, y su rango de peso varía de 0,3 a 14 µg (Arditti & Ghani, 2000). Estas semillas están formadas por un embrión de pocas células (entre 100 y 200) cubiertas por una testa muy dura (Mitchell, 1989).

En condiciones naturales, las semillas requieren la presencia e infección de un hongo simbiote que les proporcione una fuente de carbohidratos y los nutrientes necesarios para el proceso de germinación (Barba, Luna & Romero, 2001). Este hongo ayuda a las plántulas jóvenes de orquídeas a sobrevivir en campo con reservas alimenticias limitadas y actúa a manera de endospermo exógeno, puesto que aporta los nutrientes necesarios en los primeros estadios de la germinación (Rasmussen, 1995).

La interacción micorriza-orquídea es un tema que ha sido ampliamente estudiado a nivel mundial (Clements, 1987). Diversos estudios han demostrado que, en general, las orquídeas epífitas son específicas en la interacción con las micorrizas (Lee, Taylor y Bruns, 1997) y que su especificidad, especialmente en las especies tropicales, puede ser variable (Otero & Bayman, 2009).

La germinación de las semillas de *Prosthechea sp.* es variable en el tiempo, iniciando con la imbibición y posterior protrusión radicular. Posteriormente se forma una esfera de células fotosintéticamente activas denominadas protocormo, que permitirá el desarrollo de pelos radicales y la aparición de hojas (Roy, Patel, Patel, Sajeev, & Deka, 2011). Los tiempos estimados para cada fase de desarrollo de las orquídeas bajo condiciones *in vitro* son inciertos, porque varían de acuerdo con el medio de cultivo, la especie y las condiciones ambientales (Pierik, 1990).

Según Pierik (1990), la germinación de las semillas de orquídea inicia cuando el embrión absorbe agua a través de la testa, aumentando su volumen. Después, empieza la división celular y el embrión rompe la cubierta seminal. A continuación, se forma una estructura de tipo protocormo a partir del agregado de células, y sobre aquel puede distinguirse un meristemo del vástago. Tan pronto como inicia la

diferenciación de órganos (meristemo del vástago en un lado y rizoides en el otro), comienza un periodo de crecimiento intenso. Si el protocormo está a la luz, adquiere un color verde y, al mismo tiempo, se desarrollan las hojas. Como resultado de la producción de clorofila, la planta se vuelve autótrofa. Más tarde, las primeras raíces auténticas se forman endógenamente, el protocormo y los rizoides (pelos radicales) pierden su función nutritiva y desaparecen. Los tiempos estimados para cada fase bajo condiciones *in vitro* son inciertos porque varían de acuerdo con el medio de cultivo, la especie y las condiciones ambientales.

Las orquídeas fueron las primeras plantas que se propagaron *in vitro* a partir de la siembra de semillas, de manera simbiótica y asimbiótica o clonalmente al introducirse la técnica de cultivo de meristemos para la propagación vegetativa. Dada la importancia hortícola y comercial de las orquídeas, se han desarrollado diversos métodos de propagación, tanto sexual, a través de semillas, como asexual, mediante el cultivo de segmentos vegetativos (Ávila-Díaz, & Salgado, 2006). Para que la germinación se lleve a cabo se deben cumplir tres condiciones: primero, la semilla debe ser viable; segundo, la semilla debe estar bajo condiciones ambientales adecuadas; y tercero, se debe superar cualquier condición de dormancia, causada por reguladores de crecimiento que inhiben la germinación, o contar con embriones inmaduros (Pedroza-Manrique, Fernandez-Lizarazo, & Suarez-Silva, 2005).

La propagación natural de las orquídeas se dificulta porque sus semillas son diminutas y carecen de endospermo. Por esta razón, requieren de la interacción con hongos micorrízicos que permiten la germinación de las semillas (Arditti, 1984). Experimentos desarrollados por Knudson (1922) en especies de *Cattleya*, llevaron a afirmar que las semillas pueden germinar sin la acción del hongo, utilizando azúcares simples y nutrientes en el medio de cultivo. Se han desarrollado metodologías de germinación asimbiótica bajo condiciones *in vitro* (Arditti & Ernst, 1993; Steele, 2007). La germinación de semillas de orquídeas de manera asimbiótica permite conservarlas de manera sencilla mediante diversos métodos de micropropagación (Shimasaki & Uemoto, 1991). Una de las cuestiones básicas de la siembra asimbiótica es la desinfección adecuada de frutos y semillas para lograr cultivos libres de contaminación (Billard, Dalzotto, & Lallana, 2014). Una de las cuestiones básicas en la siembra

asimbiótica es la desinfección adecuada de frutos y semillas para lograr cultivos libres de contaminación (Billard, Dalzotto & Lallana, 2014).

En el cultivo de orquídeas es muy común la utilización del medio nutritivo Murashige y Skoog (MS), formulado por los científicos Toshio Murashige y Folke Skoog en 1962. Este medio de cultivo proporciona a las semillas los 17 nutrientes esenciales—tanto micronutrientes como macronutrientes— para la mayoría de las plantas, a fin de desplazar el papel del hongo en la simbiosis (Roca, Nolt, Mafla, Roa, & Reyes, 1991; Taiz & Zeiger, 1998). Por esta razón se eligió el medio Murashige y Skoog (1962), ya que contiene una formulación básica que sirve de fuente de nutrientes a una gran variedad de plantas (Hurtado & Merino, 1987; Pierik, 1990).

En el crecimiento de los tejidos existe un efecto indirecto entre el pH y el tipo de fuente de nitrógeno, pues los medios con un pH por debajo de 5 toman nitratos, y en aquellos con un pH de 5 a 5,5 los callos prefieren amonio o nitratos. Por otro lado, el potasio es necesario para la división celular, la síntesis de proteínas, la producción de clorofila y la reducción de nitratos. Los niveles de  $K^+$  *in vitro* difícilmente representan un problema, pero hay ciertas especies que son sensibles a sus altos niveles (Bhojwani & Razdan, 1996).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material vegetal

En la reserva natural de San Rafael (Fusagasugá, Cundinamarca), ubicada a 4°23'32" LN (latitud norte) y 74°18'48" LW (longitud oeste), a una altitud de 1.909 m s. n. m., con temperatura media de 17 °C, humedad relativa media de 85 % y precipitación anual de 1.250 mm, se situó una población de plantas del género *Prosthechea* sobre forofitos de caucho (*Ficus* sp.). De esta población se obtuvieron 8 cápsulas con una madurez avanzada y un diámetro entre 2 y 3 cm (figura 1).

### Protocolo de esterilización

Las cápsulas se llevaron al laboratorio de cultivo de tejidos vegetales de la Universidad de Cundinamarca para su procesamiento en condiciones asépticas. Estas se lavaron superficialmente con abundante agua corriente

Figura 1. Cápsula de *Prosthechea* sp.



Fuente: Deaza & Orjuela (2017).

y jabón antibacterial (Protex<sup>®</sup>). Después, en la cámara de flujo laminar horizontal (Flow 85 H<sup>®</sup>), se sumergieron las cápsulas durante 10 minutos en una solución de hipoclorito de sodio al 5 %, se lavaron dos veces con agua destilada estéril y luego se colocaron en inmer-

sión en alcohol al 70 % por 1 minuto. Posteriormente, se escurrieron sobre servilletas estériles y, finalmente, se flamearon con el mechero Bunsen. Para extraer la semilla, se hizo un corte longitudinal en la cápsula con la ayuda de unas pinzas y un bisturí previamente esterilizados. La semilla de tipo polvoso fue esparcida sobre la superficie de medio de cultivo MS en frascos de vidrio (dimensiones) con un volumen de 250 mL.

### Metodología

Se utilizó el medio salino básico MS desarrollado por Murashige y Skoog, suplementado con diferentes concentraciones de almidón –fécula de maíz– (0, 10 g×L<sup>-1</sup>), BAP (0, 0,5, 1 y 2 mg×L<sup>-1</sup>) y ANA (0, 0,5, 1 y 2 mg×L<sup>-1</sup>) según un diseño al azar –DCA– con un arreglo factorial de 2×4×4, con 32 tratamientos y 5 repeticiones (tabla 1). La unidad experimental correspondió a cada frasco de vidrio de 250 mL, con el fin de evaluar su efecto sobre la germinación. El cultivo se realizó bajo condiciones *in vitro* durante 12 semanas bajo un régimen lumínico de 12 horas de luz –luz blanca fría– y 12 horas de oscuridad, con una temperatura promedio de 25 °C.

Tabla 1. Tratamientos utilizados en la germinación de *Prosthechea* sp.

Tratamiento	Almidón (g×L <sup>-1</sup> )	BAP (mg×L <sup>-1</sup> )	ANA (mg×L <sup>-1</sup> )
1	0	0,5	0
2	0	1	0
3	0	2	0
4	0	0	0,5
5	0	0,5	0,5
6	0	1	0,5
7	0	2	0,5
8	0	0	1
9	0	0,5	1
10	0	1	1
11	0	0	2
12	0	0,5	2
13	0	1	2
14	0	2	2
15	0	1	0
16	10	0,5	0
17	10	1	0
18	10	2	0
19	10	0	0,5
20	10	0,5	0,5
21	10	1	0,5
22	10	2	0,5
23	10	0	1
24	10	0,5	1
25	10	1	1
26	10	2	1
27	10	0	2
28	10	0,5	2
29	10	1	2
30	10	2	2
31	0	0	0
32	10	0	0

Fuente: elaboración propia.



Cada 7 días se observaron tres unidades experimentales con el estereoscopio; en cada una se evaluó la mitad del área de la base del frasco y se examinó el número de semillas germinadas como variable para luego proceder a llevarlas a porcentaje de germinación, de acuerdo con la fórmula:

$$\%germinación = \frac{\text{número de semillas germinadas}}{\text{número total de semillas evaluadas}}$$

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y a la prueba de Fisher LSD ( $P \leq 0,05$ ), utilizando el programa Info Stat –versión libre–.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fase de germinación se evaluó desde la primera semana después de la siembra de las semillas de *Pros-*

*thechea* sp. hasta la séptima semana, calculando el porcentaje de germinación de semillas de acuerdo con las observaciones del material vegetal en el laboratorio (figura 2).

En el tratamiento 22, con el medio enriquecido con almidón ( $10 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ ) + BAP ( $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) + ANA ( $0,5 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ), y el tratamiento 30, con el medio suplementado con almidón ( $10 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ ) + BAP ( $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) + ANA ( $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ), se obtuvieron los mayores valores de porcentaje de germinación: 52,67 y 50,67%, respectivamente (figura 3); estos tratamientos estaban suplementados adicionalmente con almidón como fuente de carbono. Por otro lado, la germinación más baja se evidenció en los tratamientos con ausencia de este componente, como los tratamientos 8, 1 y 12, cuyos porcentajes de germinación de semillas fueron: 8, 7 y 5 %, respectivamente.

Figura 2. Semillas germinadas de *Prosthechea* sp. bajo condiciones *in vitro*.



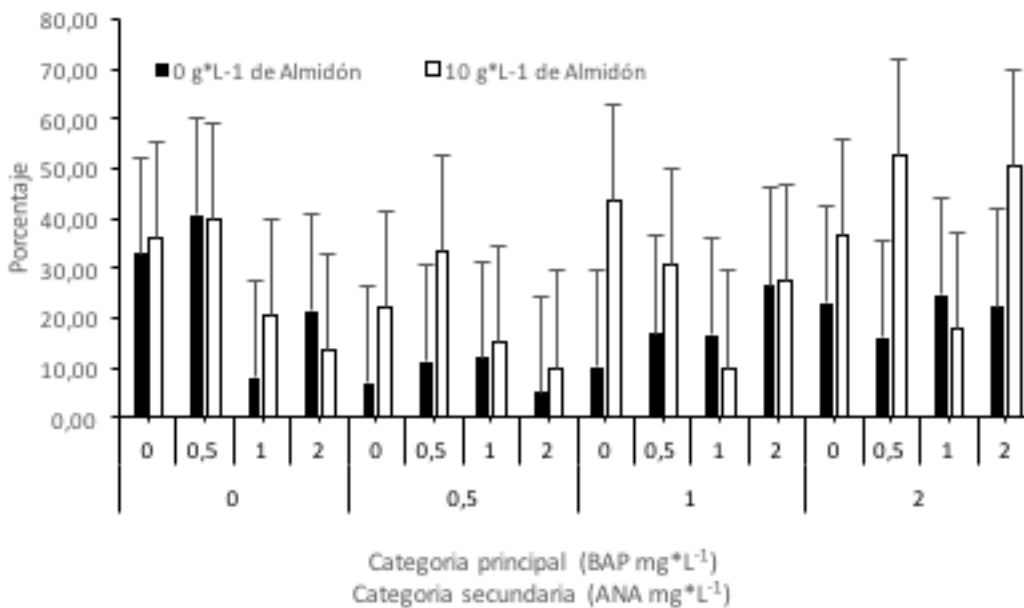
Fuente: Deaza & Orjuela (2017).

El medio MS se utiliza con frecuencia en diversas especies de orquídeas y, al suplementarse con distintas concentraciones de reguladores de crecimiento como BAP y ANA en interacción con almidón, presenta efectos favorables sobre la germinación de las semillas. En este sentido, Arditti y Ernst (1993) concluyen que los porcentajes de germinación alcanzados en orquídeas epífitas tropicales sobre un medio asimbiótico son superiores a 50 %; mientras que Kalimuthu, Senthilkumar y Vijayakumar (2007) describen una regeneración *in vitro* satisfactoria de *Oncidium* sp. al adicionar  $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$  de BAP al medio MS. También se han

obtenido resultados favorables con otros medios de cultivo enriquecidos con reguladores de crecimiento, lo cual se evidencia en estudios como el de Hossain, Sharma, Teixeira da Silva y Pathak (2010), donde obtuvieron aproximadamente un 100 % de germinación de las semillas de orquídea *Cymbidium giganteum* Wall. ex Lindl con los medios Mitra y Phytamax suplementados con  $1 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$  de BAP.

Algunos autores han reportado que el uso de ácido naftalenacético (ANA) sobre la germinación de orquídeas no es favorable, porque este se utiliza para

Figura 3. Porcentaje de germinación de semillas de *Prosthechea* sp. bajo condiciones *in vitro*.



Fuente: elaboración propia.

estimular la formación de raíces adventicias (Derkx & Karsen, 1993; Hilhorst & Karsen, 1989; Ikuma & Thimann, 1963; Perry & Metzger, 1980; Yang *et al.*, 1999); por lo tanto, es posible que no afecte la germinación de *Prosthechea* sp. Para este caso, cabe citar el estudio realizado por Paudel, Pradhan y Pant (2012) con semillas de la orquídea *Esmeralda clarkei* Rchb.f., donde obtuvieron una mayor germinación al enriquecer el medio básico MS con 0.5 mg×L<sup>-1</sup> de BAP y sin la adición de ANA.

Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden con los de Parmar y Pant (2016), quienes en estudios desarrollados con la orquídea *Coelogyne stricta* (D. Don) Schltr. encontraron que al adicionar 1 mg×L<sup>-1</sup> de BAP y 1 mg×L<sup>-1</sup> de ANA al medio básico MS, la germinación de semillas incrementó, inició a las 7 semanas de cultivo y se formaron plántulas después de 23 semanas de cultivo, de manera que ambos fitorreguladores indujeron la formación de raíces. En otro estudio con la orquídea *Coelogyne flaccida* Lindl., Parmar y Pant (2015) encontraron que al suplementar el medio MS con 0.5 mg×L<sup>-1</sup> de BAP y 0.5 mg×L<sup>-1</sup> de ANA, la germinación inició 6 semanas después de la siembra en el medio.

Estos resultados también concuerdan con los que obtuvieron Bazand, Otrshy, Fazilati, Piri y Mokhta-

ri (2014) con la orquídea *Phalaenopsis amabilis* (L.) Blume, donde el mayor porcentaje de germinación (83,75 %) se presentó al adicionar una concentración de 1,5 mg×L<sup>-1</sup> de ANA o una combinación de BAP (0,5 mg×L<sup>-1</sup>)+ANA (0,5 mg×L<sup>-1</sup>) al medio básico MS, así como con los que obtuvieron Seeja, Sreekumar, Biju y Arya (2018), quienes encontraron que la germinación de semillas de *Spathoglottis albida* Kraenzl. fue mayor (93 %) al utilizar el medio MS enriquecido con 1,5 mg×L<sup>-1</sup> de BAP y 0,5 mg×L<sup>-1</sup> de ANA.

Por último, tras observar que la ausencia de almidón no favoreció la germinación de semillas de *Prosthechea* sp. bajo condiciones *in vitro*, se puede afirmar que su uso genera un mayor porcentaje de germinación por cuanto la fécula de maíz aporta vitaminas a la semilla además de glutamina, un aminoácido esencial para el crecimiento de embriones inmaduros por ser una importante fuente de nitrógeno (Pierik, 1990), que probablemente supla los requerimientos de carbohidratos externos necesarios para la germinación de las semillas de orquídeas.

## CONCLUSIÓN

El medio de cultivo Murashige y Skoog (MS) suplementado con  $10 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$  de almidón favorece una mayor germinación de las semillas de la orquídea *Prosthechea* sp., de igual manera, el uso de  $2 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$  de bencilaminopurina (BAP) y  $0,5 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$  de ácido naftalenacético (ANA) potencia su germinación, por lo tanto, se recomienda su uso combinado en esta especie vegetal.

## REFERENCIAS

- Arditti, J. (1984). An history of orchid hybridization, seed germination and tissue culture. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 89(4), 359-381.
- Arditti, J., & Ernst, R. (1993). *Micropropagation of orchids*. New York, United States: John Wiley-Sons, Inc.
- Arditti, J., & Ghani, A. K. (2000). Tansley Review No. 110. Numerical and physical properties of orchid seeds and their biological implications. *The New Phytologist*, 145(3), 367-421.
- Ávila-Díaz, I., & Salgado, G. R. (2006). Propagación y mantenimiento in vitro de orquídeas mexicanas, para colaborar en su conservación. *Biológicas*, 8, 138-149.
- Barba, A., Luna, B., & Romero, J. (2001). *Micropropagación de plantas*. México, D. F., México: Trillas.
- Bazand, A., Otroshy, M., Fazilati, M., Piri, H., & Mokhtari, A. (2014). Effect of plant growth regulators on seed germination and development of protocorm and seedling of *Phalaenopsis amabilis* (L.) Blume (Orchidaceae). *Annual Research & Review in Biology*, 4(24), 3962-3969.
- Bhojwani, S., & Razdan, M. (1996). *Plant tissue culture: Theory and practice, a revised edition*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Billard, C. E., Dalzotto, C. A., & Lallana, V. H. (2014). Desinfección y siembra asimbiótica de semillas de dos especies y una variedad de orquídeas del género *Oncidium*. *Polibotánica*, 38, 69-81.
- Calderón-Sáenz, E. (Ed.). (2007). *Libro rojo plantas de Colombia. Volumen 6: Orquídeas, primera parte. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Alexander von Humboldt-Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Clements, M. A. (1987). The symbiotic method of orchid seed germination. Progress on Australasian epiphytes. *Proceedings of the World Orchid Hiroshima Symposium*. Japan, Hiroshima.
- Clements, M. A. (1988). Orchid mycorrhizal associations. *Lindleyana*, 3, 73-86.
- De la Nova, B. M., Oria, A., Casadesus, L., & Gómez, M. (1998). *Aislamiento, caracterización e inoculación con endomicorrizas orquídeas en especies de orquídeas*. La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Universidad de La Habana.
- Derx, M. P. M., & Karsen, C. M. (1993). Changing sensitivity to light and nitrate but not to gibberellins regulates seasonal dormancy patterns in *Sisymbrium officinale* seeds. *Plant, Cell & Environment*, 16(5), 469-479.
- Gil, A., Contreras, D., & Gutiérrez, L. (2016). Establecimiento in vitro de protocormos de *Prosthechea* sp. bajo diferentes concentraciones de ácido naftalenacético. *Mutis*, 6(1), 6-15. doi: 10.21789/22561498.1108
- Hilhorst, H. W. M., & Karsen, C. M. (1989). The role of light and nitrate in seed germination. In R. B. Taylorson (Ed.), *Recent advances in the development and germination of seeds* (pp. 191-205). New York, United States: Plenum Press.
- Hossain, M. M., Sharma, M., Teixeira da Silva, J. A., & Pathak, P. (2010). Seed germination and tissue culture of *Cymbidium giganteum* Wall. ex Lindl. *Scientia Horticulturae*, 123(4), 479-487. doi: 10.1016/j.scienta.2009.10.009
- Hurtado, M. D. V., & Merino, M. M. E. (1987). *Cultivo de tejidos vegetales*. México, D. F., México: Editorial Trillas, S. A. de C. V.
- Ikuma, H., & Thimann, K. (1963). Activity of gibberellin 'D' on the germination of photosensitive lettuce seeds. *Nature*, 197, 1313-1314.

- Jarvis, A. (2009). La conservación de orquídeas. *Congreso sobre biodiversidad y cambio climático*. Contraloría Nacional de Colombia, Colombia.
- Kalimuthu, K., Senthilkumar, R., & Vijayakumar, S. (2007). *In vitro* micropropagation of orchid, *Oncidium* sp. (Dancing Dolls). *African Journal of Biotechnology*, 6(10), 1171-1174.
- Kitsaki, C. K., Zygouraki, S., Ziobora, M., & Kintzios, S. (2004). *In vitro* germination, protocorm formation and plantlet development of mature versus immature seeds from several *Ophrys* species (Orchidaceae). *Plant Cell Reports*, 23(5), 284-290.
- Knudson C. (1922). Nonsymbiotic germination of orchid seeds. *Botanical Gazette*, 73, 1-25.
- Lee Taylor, D., & Bruns, T. D. (1997). Independent, specialized invasions of ectomycorrhizal mutualism by two nonphotosynthetic orchids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(9), 4510-4515.
- Martin, K. P. (2003). *Clonal propagation, encapsulation and reintroduction of Ipsea malabarica* (Reichb. f.) J. D. *sinensis* var. *amoena* in vitro. *Mycological Research*, 97(6), 746-752.
- McKendrick, S. L., Leake, J. R., Lee Taylor, D., & Read, D. J. (2002). Symbiotic germination and development of the myco-heterotrophic orchid *Neottia nidus-avis* in nature and its requirement for locally distributed *Sebacina* spp. *New Phytologist*, 154(1), 233-247.
- Mitchell, R. (1989). Growing hardy orchids from seeds at Kew. *Plantsman*, 11, 152-169.
- Murashige, T. y Skoog, F. (1962). A revised medium of rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Otero, J. T., & Bayman, P. (2009). Symbiotic vs. asymbiotic seed germination in epiphytic orchids. *Acta Agronómica*, 58(4), 270-276.
- Pant, B., & Thapa, D. (2012). *In vitro* mass propagation of an epiphytic orchid, *Dendrobium primulinum* Lindl. through shoot tip culture. *African Journal of Biotechnology*, 11(42), 9970-9974. doi: 10.5897/AJB11.3106
- Parmar, G., & Pant, B. (2015). *In vitro* seed germination and seedling development of *Coelogyne flaccida* Lindl. (Orchidaceae). *Advances in Forestry Science*, 2(4), 85-88.
- Parmar, G., & Pant, B. (2016). *In vitro* seed germination and seedling development of the orchid *Coelogyne stricta* (D. Don) Schltr. *African Journal of Biotechnology*, 15(5), 105-109. doi: 10.5897/AJB2015.14870
- Paudel, M., Pradhan, S., & Pant, B. (2012). *In vitro* seed germination and seedling development of *Esmeralda clarkei* Rchb. f. (Orchidaceae). *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, 22(2), 107-111.
- Pedroza-Manrique, J., Fernandez-Lizarazo, C., & Suarez-Silva, A. (2005). Evaluation of the effect of three growth regulators in the germination of *Comparettia falcata* seeds under *in vitro* conditions. *In Vitro Cellular & Developmental Biology. Plant*, 41(6), 838-843.
- Pérez, O., Sánchez, E., & Ortiz, P. (2009). Inventario orquideológico de la Reserva Bosque de Yotoco, Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 58(3), 189-196.
- Perry, L. M., & Metzger, J. (1980). *Medicinal plants of east and southeast Asia: attributed properties and uses*. Cambridge, Estados Unidos: MIT Press.
- Pierik, R. L. (1990). *Cultivo in vitro de las plantas superiores*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Rao, A. N. (1997). Tissue culture in Orchid Industry. In J. Reinert & Y. P. S. Bajaj (Eds.), *Applied and Fundamental aspects of Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. New Delhi, India: Narosa Publishing House.
- Rasmussen, H. N. (1995). *Terrestrial orchids. From seeds to mycotrophic plants*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Roca, W. M., Nolt, B., Mafla, G., Roa, J. C., & Reyes, R. (1991). Eliminación de virus y propagación de clones en la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). En W. M. Roca & L. A. Mroginski (Eds.), *Cultivo de tejidos en la agricultura: fundamentos y aplicaciones* (pp. 403-421). CIAT.

- Rodrigues, J., Gomes, A., Pasqual, M., Almendagna, F., & De Assis, F. (2009). Concentrações de sais do meio Knudson C e de ácido giberélico no crescimento *in vitro* de plântulas de orquídea. *Ciência Rural*, 39(3), 772-777.
- Roy, A. R., Patel, R. S., Patel, V. V., Sajeev, S., & Deka, B. (2011). Asymbiotic seed germination, mass propagation and seedling development of *Vanda coerulea* Griff ex. Lindl. (Blue Vanda): an *in vitro* protocol for an endangered orchid. *Scientia Horticulturae*, 128(3), 325-331.
- Seeja, G., Sreekumar, S., Biju, C. K., & Arya, K. (2018). Inbreeding and *in vitro* seed germination in *Spathoglottis albida* Kraenzl. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 11(1), 14-20. doi: 10.9790/2380-1101031420
- Shimasaki, K., & Uemoto, S. (1991). Rhizome induction and plantlet regeneration of *Cymbidium goeringii* from flower bud cultures *in vitro*. *Plant cell, Tissue and Organ Culture*, 25(1), 49-52.
- Soto-Arenas, M., Solano Gómez, R., & Hágsater, E. (2007). Risk of extinction and patterns of diversity loss in Mexican orchids. *Lankesteriana*, 7(1-2), 114-121.
- Steele, W. K. (2007). Propagation protocol for ram's head lady's slipper (*Cypripedium arietinum*). *Native Plants Journal*, 8(1), 58-64.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (1998). *Plant physiology*. Sunderland, England: Sinauer Associates, Inc.
- Yam, T. W., & Arditti, J. (2009). History of orchid propagation: a mirror of the history of biotechnology. *Plant Biotechnology Reports*, 3(1). doi: 10.1007/s11816-008-0066-3
- Yang, J., Lee, H. J., Shin, D. H., Oh, S. K., Seon, J. H., Paek, K. Y., & Han, K. H. (1999). Genetic transformation of *Cymbidium* orchid by particle bombardment. *Plant Cell Reports*, 18(12), 978-984.
- Yong, J. W., Ge, L., Ng, Y. F., & Tan, S. N. (2009). The chemical composition and biological properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) water. *Molecules*, 14(12), 5144-5164.



# Evaluación de cenizas volantes como material adsorbente para la remoción de $Pb^{2+}$ en solución acuosa

## Evaluation of Fly Ash as an Adsorbent Material for the Removal of $Pb^{2+}$ in an Aqueous Solution

### Óscar Leonardo Ortiz Medina

Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre, Magister Gestión Ambiental de la Pontificia Universidad Javeriana y Doctor en Gerencia y Políticas Educativas de la Universidad de Baja California  
Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-5587-5654>  
oscarl.ortizm@unilibre.edu.co

### Rafael Nikolay Agudelo Valencia

Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>  
rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co

### Lina María Tovar Castañeda

Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-6468-2034>  
linam-tovarc@unilibre.edu.co

### Natalia Gutiérrez Camargo

Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-7034-5616>  
natalia.gutierrez@unilibrebog.edu.co

Fecha de recepción: 31 de julio del 2018

Fecha de aceptación: 30 de agosto del 2018

**Sugerencia de citación:** Ortiz Medina, O., Agudelo Valencia, R., Tovar Castañeda, L., y Gutiérrez Camargo, N. (2018). Evaluación de cenizas volantes como material adsorbente para la remoción de  $Pb^{2+}$  en solución acuosa *Mutis*, 8(2), 47-56. doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1410>

## RESUMEN

Este trabajo evaluó ceniza volante (cv) proveniente de una empresa ladrillera, con el objetivo de analizar su capacidad de adsorción de plomo en una solución acuosa. El material adsorbente fue suministrado por una empresa de fabricación de ladrillos ubicada en el municipio de Cogua, Cundinamarca, llevando a cabo los ensayos de adsorción de plomo ( $Pb^{2+}$ ) en solución acuosa en modo *batch*. La influencia del efecto del pH inicial y la



concentración inicial de soluto en la solución acuosa en el proceso de adsorción fueron analizados con el fin de determinar la influencia de estos sobre la eficiencia del tratamiento, medida en términos de porcentaje de remoción de plomo y capacidad de adsorción del material. Se determinó que la capacidad de adsorción de la cv alcanza un valor máximo de  $65,74 \text{ mg g}^{-1}$  cuando el pH inicial de la solución es 4,79 y la concentración de plomo igual a  $200 \text{ mg L}^{-1}$ . Por otra parte, el porcentaje de remoción de plomo alcanza un valor máximo de 73,8 % bajo estas mismas condiciones. El análisis gráfico de los resultados experimentales permite observar que el pH afecta el porcentaje de remoción de plomo, mas no la capacidad de adsorción de plomo alcanzada por el material estudiado. Adicionalmente, el análisis de la cinética de adsorción de plomo sobre cv condujo a que los resultados se ajustaran al modelo cinético de pseudo segundo orden, para el cual el coeficiente cinético presento un valor de  $0,00396 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

**Palabras clave:** cenizas volantes, tratamiento de aguas, adsorción, plomo.

## ABSTRACT

This work evaluated fly ash from a brick-making company, with the aim of analyzing its adsorptive capacity of lead in an aqueous solution. The adsorbent material was supplied by a brick manufacturing company located in the municipality of Cogua, Cundinamarca. Adsorption tests of lead ( $Pb^{2+}$ ) in aqueous solution were carried out in batch mode. Initial pH and initial concentration of solute in aqueous solution were analyzed in order to determine their influence on the efficiency of the treatment. This was measured in terms of percentage of lead removal and adsorption capacity. Results show that cv adsorption capacity reached a maximum value of  $65.74 \text{ mg g}^{-1}$  when the initial pH of the solution is 4.79 and lead concentration is  $200 \text{ mg L}^{-1}$ . Additionally, lead removal reached a maximum value of 73.8% under the same conditions. Graphical analysis of experimental results allows observing that pH affects the percentage of lead removal, but not the adsorption capacity of lead reached by the material studied. The analysis of the kinetics of lead adsorption on fly ash led to the results being adjusted to a kinetic model of pseudo second order, whose kinetic coefficient was  $0.00396 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

**Keywords:** Fly ash, water treatment, adsorption, lead.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua representa un problema mundial originado por la descarga descontrolada de efluentes industriales que en muchos casos, contienen materia orgánica y metales, situación que hace que este problema sea más crítico (Basu, Guha, & Ray, 2017). Los metales pesados o no esenciales son los contaminantes ambientales más comunes, siendo múltiples las actividades antrópicas que incrementan la cantidad de estas especies en ambientes acuáticos (Ribeiro *et al.*, 2010). En ese sentido, el plomo es uno de los metales de mayor prevalencia en los ecosistemas acuáticos y tiende a ser acumulado de manera inmediata por los organismos, los cuales, al ser consumidos, generan serios problemas para la salud humana, tales como desórdenes neurológicos,

defectos de nacimiento (Kuncoro & Fahmi, 2013), daños en órganos vitales (hígado, riñones y corazón) y desórdenes del sistema inmune (Georgescu, Nardou, Zichil, & Nistor, 2018).

Con el fin de mitigar el envenenamiento con plomo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) plantea que el máximo valor permisible de concentración para este metal en el agua potable sea de  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  (OMS, 2006). En cuanto a las máximas concentraciones de plomo permitidas, estos valores varían de un país a otro.

Con el fin de reducir la concentración de plomo en efluentes industriales, las técnicas de tratamiento más comunes son la ósmosis inversa, la coagulación,

la precipitación química, la electro diálisis y la ultra filtración (Basu *et al.*, 2017), las cuales no son del todo satisfactorias a causa de sus elevados costos de operación. Por otra parte, la adsorción sobre carbón activado parece ser una buena opción, aunque esta técnica también representa elevados costos y baja o nula posibilidad de regeneración del adsorbente (Basu *et al.*, 2017). Esta problemática ha llevado a la búsqueda de nuevos materiales que puedan ser empleados como adsorbentes y generen un bajo costo, una alta eficiencia y presenten una alternativa para el manejo y la disposición de residuos.

En Colombia, el sector ladrillero hace uso de carbón como fuente de energía para el secado de ladrillos. La cv es un subproducto de la combustión del carbón (CCB) relativamente económico, y extremadamente abundante, que consiste principalmente de la porción mineral no quemada del carbón. Una porción más pequeña de cenizas volantes incluye partículas de carbón no quemadas resultantes de un proceso de combustión incompleto (Norris *et al.*, 2015). Las cenizas volantes se caracterizan por presentar una elevada relación Si/Al, aunque son consideradas un residuo desechable que finalmente termina en los rellenos sanitarios (Gao & Fatehi, 2018); hecho que favorece la búsqueda de alternativas de uso o aplicabilidad de este tipo de ceniza para la adsorción de contaminantes en solución acuosa. El uso de cv en sistemas de tratamiento de aguas residuales no ha sido investigado en detalle; sin embargo, algunos trabajos han demostrado que su aplicación trae ciertos beneficios para la industria en aspectos relacionados con este asunto (Gao & Fatehi, 2018).

Algunos artículos de investigación reportan que la cv puede servir como estabilizador o reactivo de unión para la fijación de metales pesados y nutrientes contenidos en desechos peligrosos y desechos orgánicos (Alinnor, 2007), hecho por el cual su uso como material adsorbente en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos en efluentes industriales ha despertado un interés reciente en investigadores del tema (Norris *et al.*, 2015). Las cv son un material altamente alcalino que exhibe un pH entre 10 y 13 cuando es adicionado al agua, por lo cual la carga superficial se encuentra negativamente cargada a valores altos de pH (Xiyili, Çetintaş, & Bingöl, 2017). Por otra parte, este material presenta gran área su-

perficial, abundancia de sitios activos y una fuerte capacidad de adsorción (Sun, Liu, & Fatehi, 2018). Además, la literatura reporta ejemplos de investigaciones en las cuales se hace uso de cv para remover tintes, herbicidas y metales.

Algunos estudios señalan que las cv obtenidas de la quema de madera han sido empleadas para la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), logrando remover 80 % de la DQO presente en aguas residuales con dosis de cv de 100 g L<sup>-1</sup> a 25 °C y 1 hora de tiempo de retención (Sun *et al.*, 2018). Por otro lado, las cenizas volantes de carbón mineral han sido empleados para la remoción de Pb y Hg en agua residuales sintéticas, logrando remover aproximadamente 17 % de Hg y 34 % de Pb, con un periodo de contacto de 5 horas. En estos ensayos, la cv fue previamente tratada con ácido acético (Kuncoro & Fahmi, 2013). Así como en el caso anterior, la cv es modificada químicamente a fin de mejorar su capacidad de adsorción. Por ejemplo, el óxido de magnesio ha sido mezclado con cv para obtener un material adsorbente, el cual ha sido probado para la retención de colorante azoico reactivo negro 5 (RB5), determinando que la cv modificada químicamente con MgO presenta una capacidad de adsorción de RB5 de 48,78 mg g<sup>-1</sup> (Vignesh-Kumar *et al.*, 2018a). Adicionalmente, se ha empleado cv para la remoción de lignina, turbiedad y DQO en aguas provenientes del proceso de blanqueo Kraft. Los ensayos realizados en esta investigación demostraron que 6 % (w/w) y 30 minutos de tiempo, contacto permiten alcanzar valores de remoción de lignina y DQO de 81,6 y 67,9 %, respectivamente (Gao & Fatehi, 2018).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para esta investigación se empleó cv suministrada por una empresa ladrillera de municipio de Cogua, Cundinamarca. Los reactivos químicos empleados para la realización de análisis y ajuste de pH (NaOH, HCl, Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) fueron comprados a las empresas Merck y Aldrich. Todos los productos químicos utilizados fueron de grado analítico.

Para realizar la medición de pH se utilizó un potenciómetro Metrohm pH/Ion meter 780. La determinación de plomo fue llevada a cabo en un espectrofotómetro

de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 300. Por su parte, la cv fue caracterizada por difracción de rayos X en un difractómetro de polvo marca Bruker modelo D8 ADVANCE.

Los ensayos de adsorción de plomo sobre cv fueron realizados en modo *batch*, empleando una solución acuosa que contenía plomo a concentraciones entre 100 y 200  $mg\ L^{-1}$  y un pH entre 4 y 5. Para determinar el efecto de las variables o factores seleccionados (pH y concentración de  $Pb^{2+}$ ) se empleó un diseño experimental de tipo central compuesto (Xiyili *et al.*, 2017). Una vez obtenidos los resultados de los ensayos y realizado el respectivo análisis de varianza, se hizo uso de la metodología conocida como superficie de respuesta (SR), propuesta por Yus-Azila, Mashitah y Bhatia (2008), a partir de la cual se determinó la combinación de variables de proceso o factores experimentales con los mejores resultados en términos de porcentaje de remoción de plomo y concentración de plomo en la superficie del adsorbente. Las soluciones fueron preparadas con nitrato de plomo (II) ( $Pb(NO_3)_2$ ), Merck Millipore. El agua utilizada para la realización de las diluciones fue agua ultra pura obtenida en un equipo marca ELGA, con el que se obtiene agua con conductividad menor a 0,2  $\mu S/cm$ .

Cada experimento fue realizado en Erlenmeyer de 250 mL con tapa esmerilada. La dosis de cv fue de 1 g en 100 mL de solución acuosa. La mezcla resultante fue agitada haciendo uso de un agitador orbital mecánico de la marca Heidolph, *incubator* 1000, por un periodo de 1 hora, después del cual el contenido del Erlenmeyer fue filtrado, analizando el líquido clarificado para determinar el nivel de Pb. Los resultados de los análisis se emplearon para calcular la capacidad de adsorción de la cv y así determinar la posibilidad de aplicar este material para el tratamiento del agua residual propuesta. La metodología para la determinación de la concentración de Pb en solución corresponde a lo sugerido por los métodos estándar para el análisis de agua potable y residual (APHA, AWWA, & WPC, 1998).

El pH óptimo de la solución acuosa fue el valor base (o de referencia) para la determinación del equilibrio de la adsorción. En estos ensayos, una masa fija de adsorbente fue puesta en contacto con un volumen constante de agua de distinta concentración de  $Pb^{2+}$  durante 24 horas, periodo después del cual se realizó el análisis de  $Pb^{2+}$  en la solución y se efectuó el respec-

tivo análisis, lo cual permitió determinar el modelo de isoterma de equilibrio al cual se ajustaron los datos.

La determinación de la tendencia cinética del proceso de separación analizado fue realizada para los valores de pH y concentración óptimos hallados a partir de la SR, realizando ensayos para tiempo de contacto de 5, 10 y 15 minutos, a partir del cual las muestras fueron tomadas cada 30 minutos hasta completar 300 minutos. El cálculo de la capacidad de adsorción o concentración de  $Pb^{2+}$  en la superficie del sólido adsorbente fue hecho con la ecuación que se presenta a continuación (Liu *et al.*, 2017).

$$q = \frac{V*(C_o - C_f)}{m_{ads}} \quad (\text{Ec. 1})$$

En la ecuación anterior  $q$  es la cantidad de  $Pb^{2+}$  adsorbido ( $mg\ g^{-1}$ );  $V$  el volumen de solución acuosa empleada para el ensayo (mL);  $C_o$  y  $C_f$  corresponden a la concentración inicial y final de plomo en la solución ( $mg\ L^{-1}$ ); y  $m_{ads}$  a la masa de adsorbente empleado en cada ensayo (g). La efectividad del proceso de retención de  $Pb^{2+}$  sobre el adsorbente fue determinado en términos de porcentaje de remoción empleando la siguiente fórmula (Qiu *et al.*, 2018).

$$\% \text{ remoción} = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Las variables que hacen parte de la Ec. 2 fueron definidas anteriormente. La máxima capacidad de adsorción de un material se puede determinar a través de las isotermas de adsorción, siendo las isotermas de Freundlich y Langmuir las que se emplean con mayor frecuencia. La formulación matemática que representa las isotermas de Freundlich (Ec. 3) y Langmuir (Ec. 4) se presentan a continuación (Ribeiro *et al.*, 2010).

$$q = K_f * C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$q = \frac{K_a * q_{max} * C_e}{1 + K_a * C_e} \quad (\text{Ec. 4})$$

$K_f$  se relaciona con la capacidad de adsorción del material e indica la afinidad entre las especies;  $n$  es la constante de intensidad de la adsorción;  $K_o$  la constante de la isoterma de Langmuir, llamada regularmente constante de afinidad y se relaciona con la energía de adsorción ( $L\ mg^{-1}$ ); y  $q_{max}$  la máxima cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa para formar una única capa en la superficie del adsorbente

(mg g<sup>-1</sup>). El cálculo de las constantes de cada una de las ecuaciones de equilibrio se realiza a partir de las formas linealizadas de las ecuaciones de Freundlich (Ec. 5) y Langmuir (Ec. 6) (Xiyili *et al.*, 2017).

$$\log(q) = \log(K_f) + \frac{1}{n} * \log(C_e) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{K_a * q_{max}} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Con el objetivo de analizar la tendencia cinética del proceso de adsorción, se emplearon tres modelos cinéticos: *i*) de pseudo primer orden (Ec. 7) (Basu, Guha & Ray, 2017); *ii*) de pseudo segundo orden (Ec. 8); y *iii*) el modelo de difusión intrapartícula (Ec. 9) (Wang *et al.*, 2016). Las ecuaciones para cada modelo cinético se presentan a continuación:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 * (q_e - q_t) \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 * (q_e - q_t)^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

$$q_t = k_p * t^{0,5} + C \quad (\text{Ec. 9})$$

Por su parte, la forma linealizada de cada una de las ecuaciones anteriores se emplea para determinar el valor de los coeficientes cinéticos.

$$\log(q_e - q_t) = \frac{\log(q_e) - k_1 * t}{2.303} \quad (\text{Ec. 10})$$

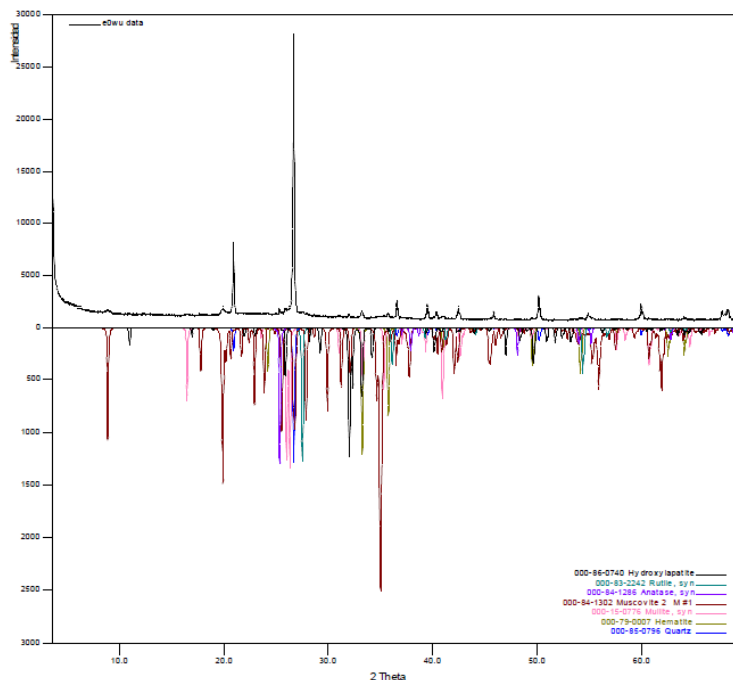
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{Ec. 11})$$

## RESULTADOS

### Caracterización de la cv

La figura 1 presenta la difracción de rayos X para la cv, donde se observa la presencia de hidroxiapatita, TiO<sub>2</sub> rutilo, TiO<sub>2</sub> Anatasa, moscovita, mulita, hematita y cuarzo. Los análisis cualitativos de las fases presentes en las muestras se realizaron mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD). La figura 1 presenta además el espectro de la muestra de cv analizada.

Figura 1. Patrones de la difracción de rayos X para la cv.



Fuente: elaboración propia.

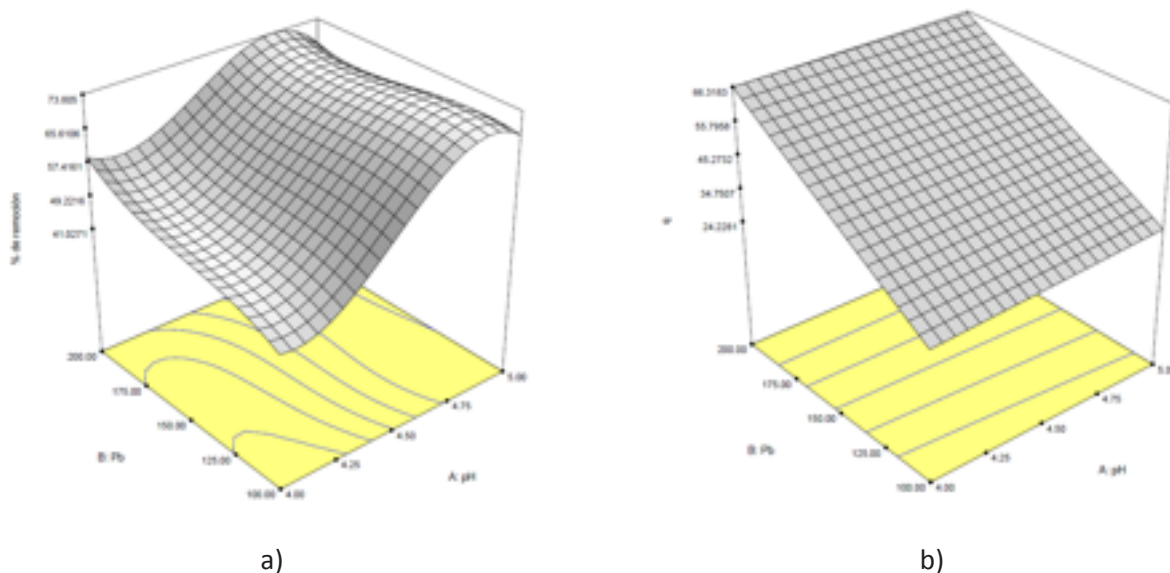


### Análisis del diseño experimental

El diseño experimental tuvo como objetivo determinar el efecto de los factores sobre las variables de respuesta seleccionadas, para lo cual los resultados experimentales fueron analizados por la metodología

de superficie de respuesta. De esta manera, gráficamente se puede evidenciar el efecto de cada factor o variable sobre las variables de respuesta seleccionadas. La figura 2, corresponde a la superficie de respuesta de los ensayos.

Figura 2. Superficie de respuesta (SR) para los ensayos realizados: a) SR para el porcentaje de remoción de  $Pb^{2+}$ ; b) SR para la capacidad de adsorción.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se puede observar cómo las mejores condiciones de separación o retención de  $Pb^{2+}$ , en términos de porcentaje de remoción y capacidad de adsorción, toman lugar cuando el pH y la concentración de plomo iniciales en la solución presentan valores de pH 4,79 y 200  $mg\ L^{-1}$ . Con relación a la capacidad de adsorción del material, la SR para este diseño experimental permite observar que el pH no presenta un efecto significativo en la separación. Las dos SR obtenidas fueron la base para la determinación de la máxima separación del  $Pb^{2+}$  presente en la solución, obteniendo valores de 73,8 % de remoción y 65.74  $mg\ g^{-1}$  de concentración de  $Pb^{2+}$  en la superficie de la cv. En otras palabras, el aumento del pH tiene un efecto positivo en el porcentaje de remoción de plomo, pero no afecta significativamente la capacidad de adsorción,

lo cual se puede explicar por la presencia de hidróxido de calcio en la ceniza volante; hecho que conduce a la formación de hidróxido de plomo y la precipitación de este, mejorando la remoción sin afectar o aumentar la concentración del metal en la superficie de la cv.

También se puede notar que el pH del medio acuoso no presenta mayor influencia sobre la capacidad de adsorción "q". Por otra parte, la concentración inicial de plomo en solución sí presenta efecto sobre "q", evidenciando que a mayor concentración inicial de plomo se incrementa "q", lo cual simplemente indica que a mayor gradiente de concentración mayor es "q".

La ecuación de la superficie de respuesta para la remoción de  $Pb^{2+}$  corresponde a:

$$\% \text{ de remoción de } Pb^{2+} = 61.6 + 23.49 * pH + 0.17 * [Pb^{2+}] - 3.51 * pH^2 + 0.97 * [Pb^{2+}]^2 - 4.41 * pH * [Pb^{2+}] - 14.54 * pH^3 + 4.02 * [Pb^{2+}]^3 \quad (\text{Ec. 12})$$

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) para esta ecuación presentó un valor de 0,9877, el cual se puede considerar un buen valor para predecir las características de remoción de  $Pb^{2+}$  en función de las variables o factores analizados dentro del rango de estudio. De igual

manera, la ecuación correspondiente a la superficie de respuesta para calcular la concentración de plomo sobre la superficie de material adsorbente corresponde a:

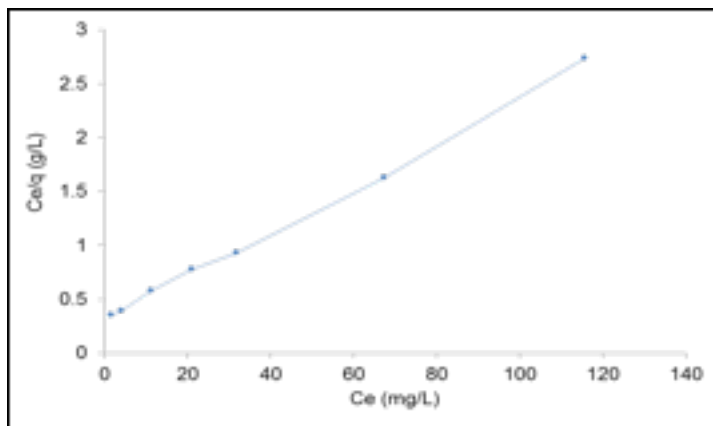
$$q = -49.12247 + 7.82009 * pH + 0.5917 * [Pb^{2+}] - 0.0427 * pH * [Pb^{2+}] \quad (Ec. 13)$$

El valor de  $R^2$  para esta ecuación fue de 0,9043, el cual, nuevamente, se puede considerar aceptable para la descripción del proceso de adsorción analizado. En las ecuaciones anteriores, las variables pH y  $Pb^{2+}$  corresponden a los valores al inicio del proceso de contacto para la adsorción. Por otra parte, para obtener las gráficas de las superficies de respuesta y los valores óptimos para cada variable de respuesta se utilizó el software Desing Expert 6.0.8.

### Equilibrio de la adsorción

Como se indicó anteriormente, el equilibrio fue analizado empleando los modelos de isoterma propuestos por Freundlich y Langmuir. Dicho análisis permitió determinar que el modelo de isoterma al cual se ajustan los resultados corresponde al modelo de Langmuir, para el cual el coeficiente de correlación  $R^2$  de los datos fue 0,9976. La figura 3 muestra la representación gráfica de la ecuación de Langmuir en su forma lineal.

Figura 3. Isoterma de adsorción



Fuente: elaboración propia.

El ajuste de los datos al modelo de Langmuir señala que la adsorción se presenta en mono capa, lo que significa que el material se satura. Además, es preciso señalar que este tipo de comportamiento se asocia generalmente a la adsorción de tipo químico (Liu *et al.*, 2017). A partir de la regresión lineal de los datos, se determinó que la ecuación de la isoterma de adsorción corresponde a:

$$q = \frac{0,06563 * 48,59 * C_e}{1 + 0,06563 * C_e} \quad (Ec. 14)$$

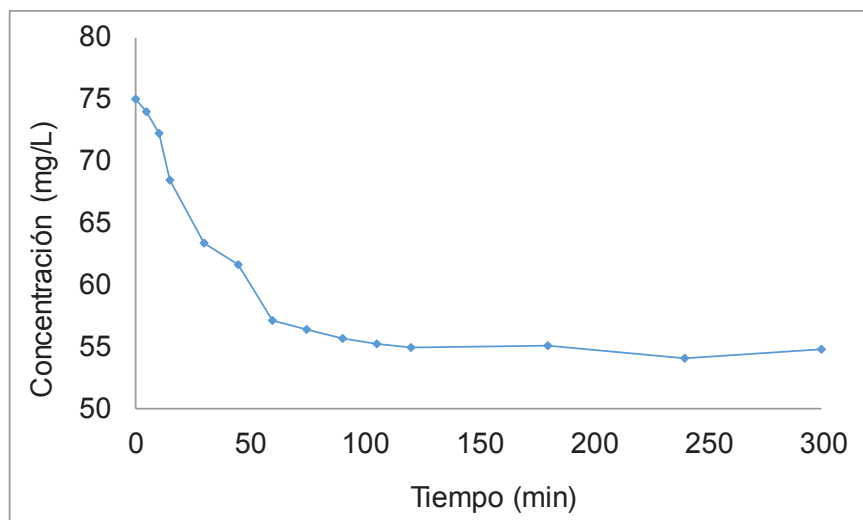
Como se observa en la Ec. 14, la capacidad de adsorción en equilibrio tiene un valor de  $48,59 \text{ mg g}^{-1}$ , el cual es bajo si se compara con cv modificada químicamente, puesto que para esta la capacidad de adsorción alcanza un valor de  $505,05 \text{ mg g}^{-1}$  (Vignesh-Kumar *et al.*, 2018a).

La figura 4 representa los datos de la variación de la concentración de plomo durante los ensayos de adsorción. Se observa el rápido descenso en la concentración de plomo en solución durante los primeros 50

minutos. De allí en adelante se observa que el proceso se ralentiza y a partir de los 120 minutos la variación

es muy baja, de modo que se puede considerar que el proceso alcanza el estado estable o equilibrio.

**Figura 4.** Variación de la concentración de plomo durante la adsorción (concentración inicial de plomo,  $C_0 = 75$ , pH =; dosis de adsorbente =  $0.1 \text{ g L}^{-1}$ )

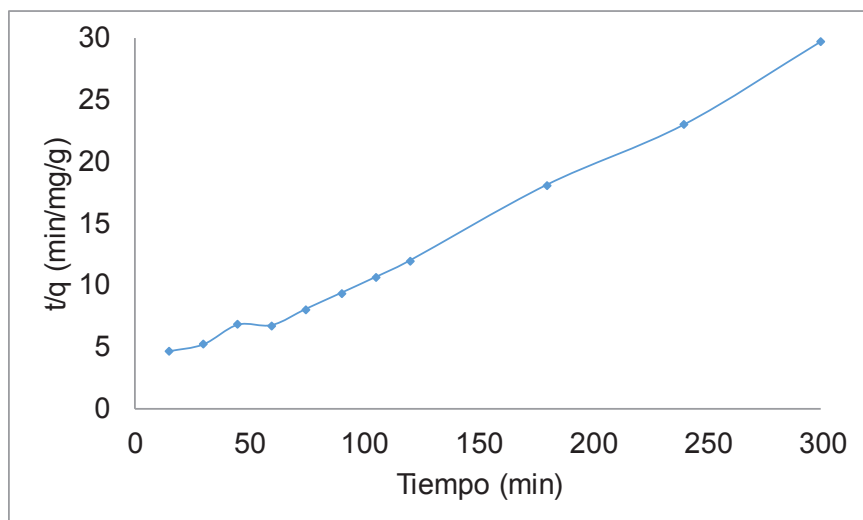


Fuente: elaboración propia.

Con los resultados del experimento se realizaron las respectivas gráficas y correlaciones para evaluar la tendencia cinética, permitiendo determinar que el modelo cinético de pseudo segundo orden es el

que mejor correlaciona los datos experimentales ( $R^2 = 0.9908$ ). La figura 5 es la representación de los datos en su forma lineal para el modelo de pseudo segundo orden.

**Figura 5.** Representación de la linealización ( $t/q$  Vs  $t/q$ ) de la ecuación cinética de pseudo segundo orden (concentración inicial de plomo,  $C_0 = 75$ , pH =; dosis de adsorbente =  $0.1 \text{ g L}^{-1}$ )



Fuente: elaboración propia.

Con la pendiente y el intercepto de la gráfica 5 se determinó que el coeficiente cinético alcanza un valor de  $0,00396 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$  y que la concentración de soluto en la superficie del material o capacidad de adsorción es igual a  $11,24 \text{ mg g}^{-1}$ . Con relación al ajuste de los datos de la cinética de pseudo segundo orden, se puede inferir que la velocidad de adsorción es controlada directamente por el fenómeno de transferencia de masa o adsorción directa, o por el hecho de compartir o intercambiar electrones entre el  $\text{Pb}^{2+}$  y la cv (Habiba *et al.*, 2018).

## CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó la cv de una empresa ladrillera como material adsorbente para la remoción de plomo en solución acuosa. Con base en el diseño experimental, se determinó que la adsorción se presenta con mayor efectividad (73,8 % de remoción), un pH de 4,79 y una concentración de  $\text{Pb}^{2+}$  de  $200 \text{ mg L}^{-1}$ , como condiciones iniciales del proceso. El equilibrio del proceso fue descrito con mayor precisión a partir del modelo de isoterma de Langmuir, indicando que el fenómeno tiende a presentarse en mono capa, lo cual típicamente se asocia a la adsorción de tipo químico. El análisis cinético del proceso se ajustó al modelo de pseudo segundo orden, hecho que sugiere nuevamente que la adsorción es de tipo químico.

De acuerdo con el tipo de superficies de respuesta obtenidas, se observó que el pH afecta el porcentaje de remoción de plomo pero no tiene efecto significativo sobre la capacidad de adsorción del material adsorbente; lo cual puede ser explicado por la presencia de hidróxido de calcio en la cv y, por lo tanto, de precipitación de hidróxido de plomo.

El uso de cv como material adsorbente permite realizar el aprovechamiento de un residuo de la industria ladrillera para el control de la contaminación por plomo en el agua, mostrando una máxima capacidad de adsorción o concentración de  $\text{Pb}^{2+}$  en la superficie de  $65,74 \text{ mg g}^{-1}$ . A pesar de que este no es un valor muy alto, el uso de cv resulta ser conveniente para el sector industrial considerando su bajo costo.

## REFERENCIAS

- Alinnor, I. J. (2007). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel*, *86*(5-6), 853-857. doi: 10.1016/j.fuel.2006.08.019
- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Environment Federation [WEF]. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th Ed). Washington: American Public Health Association.
- Basu, M., Guha, A. K., & Ray, L. (2017). Adsorption of Lead on Cucumber Peel. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 603-615. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.028
- Gao, W., & Fatehi, P. (2018). Fly ash based adsorbent for treating bleaching effluent of kraft pulping process. *Separation and Purification Technology*, *195*(December 2017), 60-69. doi: 10.1016/j.seppur.2017.12.002
- Georgescu, A. M., Nardou, F., Zichil, V., & Nistor, I. D. (2018). Adsorption of lead(II) ions from aqueous solutions onto Cr-pillared clays. *Applied Clay Science*, *152*(October 2017), 44-50. doi: 10.1016/j.clay.2017.10.031
- Habiba, U., Siddique, T. A., Lee, J. J. L., Joo, T. C., Ang, B. C., & Afifi, A. M. (2018). Adsorption study of Methyl orange by Chitosan/Polyvinyl Alcohol/Zeolite Electrospun Composite Nanofibrous Membrane. *Carbohydrate Polymers*, *191*(October 2017), 79-85. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.02.081
- Kuncoro, E. P., & Fahmi, M. Z. (2013). Removal of Hg and Pb in Aqueous Solution using Coal Fly Ash Adsorbent. *Procedia Earth and Planetary Science*, *6*, 377-382. doi: 10.1016/j.proeps.2013.01.049
- Liu, J., Mwamulima, T., Wang, Y., Fang, Y., Song, S., & Peng, C. (2017). Removal of Pb(II) and Cr(VI) from aqueous solutions using the fly ash-based adsorbent material-supported zero-valent iron. *Journal of Molecular Liquids*, *243*, 205-211. doi: 10.1016/j.molliq.2017.08.004
- Norris, P., Hagan, S., Cohron, M., Zhao, H., Pan, W. P., & Li, K. (2015). Application of fly ash as an adsorbent for Estradiol in animal waste. *Journal*

- of Environmental Management*, 161, 57-62. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.06.047
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición, Volumen 1, Recomendaciones*. Recuperado de: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full1\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full1_lowres.pdf)
- Qiu, Q., Jiang, X., Lv, G., Chen, Z., Lu, S., Ni, M., & Deng, X. (2018). Adsorption of heavy metal ions using zeolite materials of municipal solid waste incineration fly ash modified by microwave-assisted hydrothermal treatment. *Powder Technology*, 335, 156-163. doi: 10.1016/j.powtec.2018.05.003
- Ribeiro, R. F. L., Magalhães, S. M. S., Barbosa, F. A. R., Nascentes, C. C., Campos, I. C., & Moraes, D. C. (2010). Evaluation of the potential of microalgae *Microcystis novacekii* in the removal of Pb<sup>2+</sup> from an aqueous medium. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 947-953. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.03.097
- Sun, Y., Liu, Z., & Fatehi, P. (2018). Developing performance-property correlation for fly ash as adsorbent for pulping effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2502-2513. doi: 10.1016/j.jece.2018.03.054
- Vignesh-Kumar, T. H., Sivasankar, V., Fayoud, N., Oualid, H. A., & Sundramoorthy, A. K. (2018). Synthesis and characterization of coral-like hierarchical MgO incorporated fly ash composite for the effective adsorption of azo dye from aqueous solution. *Applied Surface Science*, 1-10. doi: 10.1016/j.apsusc.2018.01.060
- Wang, Y., Chen, Y., Xie, H., Zhang, C., & Zhan, L. (2016). Lead adsorption and transport in loess-amended soil-bentonite cut-off wall. *Engineering Geology*, 215, 69-80. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.11.002
- Xiyili, H., Çetintaş, S., & Bingöl, D. (2017). Removal of some heavy metals onto mechanically activated fly ash: Modeling approach for optimization, isotherms, kinetics and thermodynamics. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 288-300. doi: 10.1016/j.psep.2017.04.012
- Yus-Azila, Y., Mashitah, M. D., & Bhatia, S. (2008). Process optimization studies of lead (Pb(II)) biosorption onto immobilized cells of *Pycnoporus sanguineus* using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 99(18), 8549-8552. doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.056



# Contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre

## Environmental Pollution Caused by Non-ionizing Electromagnetic Waves from Wireless Technologies in Outdoor Environments

**Óscar Gerardo Barrera Monsalve**

Ingeniero Civil y especialista en Administración de la Construcción de la Universidad Francisco de Paula Santander  
Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura,  
Grupo de Investigación Gestión Integral del Territorio-GIT de la Universidad de Pamplona, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-8658-681X>  
oscargbarreram@gmail.com

**Jemay Mosquera Téllez**

PhD en Arquitectura de la State Academy of Kharkov Municipal Engineering  
Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura,  
Director del Grupo de Investigación Gestión Integral del Territorio-GIT de la Universidad de Pamplona, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-5989-5644>  
jemay.mosquera@hotmail.com

Fecha de recepción: 30 de julio del 2018

Fecha de aceptación: 15 de septiembre del 2018

**Sugerencia de citation:** Barrera Monsalve, O. y Mosquera, Téllez, J. (2018). Contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre. *Mutis*, 8(2), 57-72, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1404>

## RESUMEN

Este artículo aborda la contaminación ambiental ocasionada por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre a través del registro de indicadores como intensidad de campo eléctrico, intensidad de campo magnético, densidad de potencia y tiempo de exposición a estaciones base de telefonía móvil (EBTM en las frecuencias comprendidas entre 10 MHz y 8 GHz. El objetivo general de la investigación es estimar la contaminación ambiental generada por este tipo de ondas electromagnéticas mediante la selección de un área de estudio densamente poblada en una zona urbana que cuente con una EBTM en su extensión y el establecimiento de las magnitudes de los parámetros de ondas electromagnéticas no ionizantes en ambientes al aire libre. La metodología seguida fue el establecimiento del área a analizar y de los puntos sujetos a muestreo y toma de datos, con respecto a las variables intensidad de campo eléctrico (mV/m), intensidad de campo magnético (mA/m), densidad de potencia ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ) y tiempo de exposición (T) a EBTM. La información recolectada durante la etapa práctica fue procesada con el uso de software especializado. Por último, se realiza el respectivo análisis estadístico. El estudio concluye que la estimación de la contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre varía en función de la distancia a la EBTM, las condiciones topográficas del área de estudio y la densidad y tipología de las edificaciones presentes.



**Palabras clave:** electromagnetismo, ondas no ionizantes, magnetismo, medición, contaminación ambiental.

## ABSTRACT

This paper studies the environmental pollution caused by non-ionizing electromagnetic waves from wireless technologies in outdoor environments through the recording of indicators such as electric field strength, magnetic field strength, power density and exposure time to MPBS in the frequencies between 10 MHz and 8 GHz. The general objective of this research is to estimate the environmental pollution caused by this type of electromagnetic waves by selecting a densely populated study area within an urban zone that has an MPBS in its extension, and the establishment of the magnitudes of non-ionizing electromagnetic wave parameters in outdoor environments. The methodology followed was the establishment of the area and the points to be sampled and data collection of variables such as electric field intensity (mV/m), magnetic field strength (mA/m), power density ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ) and exposure time (T) to MPBS. The information collected during the practice stage was processed through the application of software. Finally, statistical analysis of information was carried out. This study concludes that the estimation of environmental pollution by non-ionizing electromagnetic waves caused by wireless technologies in outdoor environments varies according to the distance to the MPBS, topographic conditions of the study area, and density and typology of surrounding buildings.

**Keywords:** Electromagnetism, non-ionizing waves, measurement, environmental pollution.

## INTRODUCCIÓN

Desde la revolución industrial y la consolidación del sistema capitalista la concepción del desarrollo se sustentó en las condiciones de producción, generando una serie de afectaciones tanto para los recursos naturales como para las comunidades y sus modos de vida de habitar. Con la modernidad y los crecientes procesos de urbanización llevados a cabo durante la primera parte del siglo XX, aumentó la explotación a gran escala, la demandaba de bienes e insumos y las afectaciones socioambientales (Castillo-Sarmiento, Suarez-Gélvez, & Mosquera-Téllez, 2017). De esta manera, la humanidad se encuentra actualmente expuesta a una variedad de contaminantes, algunos fácilmente perceptibles, como la contaminación del aire o del agua, y otros casi invisibles, como la contaminación por ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas ganaron protagonismo desde los años sesenta del siglo pasado con el estudio de sus beneficios para el ser humano y su entorno. Sin embargo, con el pasar del tiempo y el aumento desmedido de su presencia en el ambiente, producto de la creación y uso de la telefonía móvil y las conexiones banda ancha, se acentuó la inquietud de sus posibles efectos negativos en el entorno y en el cuerpo humano. Es así como la Organización Mundial de la Salud (OMS, por medio de la Agencia Internacional para la

Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), en el documento “Monografías sobre la evaluación de los riesgos carcinogénicos para humanos” categorizó en el año 2013 a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia como grupo 2B, cuya definición corresponde a “Posiblemente carcinógeno para el ser humano” (IARC, 2013, p. 112).

La Comisión Internacional para la Protección Contra la Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, por sus siglas en inglés) es la encargada de brindar asesoría científica y orientación sobre los efectos en la salud y el medio ambiente de la radiación no ionizante (NIR, por sus siglas en inglés) para proteger a las personas y el ambiente ante dicha exposición perjudicial, referida específicamente a la radiación electromagnética asociada a fenómenos como la luz visible, la ultravioleta, la infrarrojo y las ondas de radio, así como a las ondas mecánicas, como las infrarrojas y las de ultrasonido. En la vida diaria, las fuentes comunes de NIR incluyen el sol, electrodomésticos, teléfonos móviles, wifi y hornos de microondas (ICNIRP, 2018). La ICNIRP utiliza como magnitud dosimétrica la tasa de absorción específica (SAR, en inglés), cuya unidad de medida es vatios por kilogramo y la cual depende de parámetros de exposición como frecuencia de la radiación, intensidad, polarización, configuración de la fuente radiante y del cuerpo, superficies de reflexión, tamaño, forma y propiedades eléctricas del cuerpo (OIT, 2001). La

definición específica de SAR corresponde a la medida de la relación de energía absorbida en el tiempo por unidad de masa de tejido corporal expuesto (Quintana & Sepúlveda, 2013).

En el informe “*Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*” de agosto de 2009, la ICNIRP declaró que tras una revisión integral de evidencia científica de seguridad de teléfonos móviles, se pudo concluir que la literatura científica publicada desde las normas de 1998 no ofrece evidencia de que exista ningún efecto adverso dentro de las restricciones básicas y que no se requiere una revisión inmediata de dichos resultados (ICNIRP, 2009). Adicionalmente, el informe aclara que los límites de exposición recomendados contienen márgenes de seguridad sustanciales, pues a estos se les aplicó un factor de reducción importante de 50 para el público general. Con base en evidencia científica, el nivel mínimo de exposición recomendado por la ICNIRP respecto a la Tasa Específica de absorción (SAR) es 4 W/kg, límite sobre el cual se considera puede producir efectos adversos a la salud al aplicar el factor de reducción; es decir, al dividir el límite entre 50, el valor establecido como suficiente para garantizar la seguridad del público es 0,08 W/kg.

Los límites establecidos por la ICNIRP se dividen en Ocupacional y Poblacional, siendo este último el correspondiente a la población en general expuesta en sitios públicos y espacios exteriores, con poca o nada de información de la potencia de exposición presente en los sitios (ICNIRP, 1998). Los niveles de referencia ICNIRP utilizan como unidades de trabajo la intensidad de campo eléctrico (mV/m), la intensidad de campo magnético (mA/m), la densidad de flujo magnético ( $\mu\text{T}$ ) y la densidad de potencia ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ). Al mismo tiempo, la población en general no posee los elementos de juicio para establecer cuál es el nivel de exposición a las ondas electromagnéticas o el nivel de contaminación por las mismas presentes en los lugares que normalmente frecuentan, debido a la existencia en las áreas urbanas de estaciones base de telefonía móvil (ebtm) ubicadas a determinada distancia según la necesidad de cobertura, las cuales, a su vez, están provistas de cierto número de antenas que emiten ondas electromagnéticas.

El estudio correspondiente a contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre establece la toma de mediciones de intensidad de campo eléctrico (mV/m), intensidad de campo magnético (mA/m) y densidad de potencia ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ) en una pequeña área urbana densamente poblada, que posea una EBTM en su interior y cuente con la presencia de viviendas, edificaciones y parques en el espacio urbanístico de la misma, facilitando así una idea de la contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes para las comunidades que habitan áreas con características similares.

## PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS AMBIENTES AL AIRE LIBRE

Las ondas electromagnéticas en espacios abiertos o al aire libre se propagan uniformemente en todas direcciones desde una fuente puntual. En el caso de las fuentes de emisión ubicadas en las áreas urbanas, los elementos que allí se encuentran (proyectos de infraestructura, edificaciones y zonas verdes, entre otros) hacen que se presenten propiedades tales como, refracción y absorción. La refracción se presenta cuando la onda electromagnética experimenta cambio en su dirección y velocidad al pasar de un medio a un objeto. El mecanismo de refracción ocurre cuando la onda incide de forma oblicua en el objeto (Martínez-Reina & Amado-González, 2012). Por su parte, la absorción ocurre cuando entre la onda y un objeto se presenta un rozamiento que hace que la energía mecánica se transforme en calor (Arribas-Garde *et al.*, 2014), tal como ocurre durante la exposición prolongada durante una llamada celular. Adicionalmente, las ondas electromagnéticas en espacios al aire libre experimentan una pérdida de energía proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente emisora y el punto de medición. La propagación al aire libre en el marco del presente estudio corresponde a las (EBTM).

## FUENTE EMISORA AMBIENTE AL AIRE LIBRE

Una antena se define como un dispositivo que forma parte de un sistema de comunicación, encargado de recibir y radiar las ondas electromagnéticas al espacio libre. Existen diversos tipos de antenas, pero todas tienen en común realizar la transición del medio alámbrico al inalámbrico, distribuyendo la ener-

gía radiada en distintas direcciones del espacio con un cierto carácter direccional dependiendo de su uso (Castellanos-Díaz & Talero-Niño, 2005). Es importante diferenciar las EBTM de las antenas, pues lo normal es que la primera sirva de soporte para la segunda, luego una estación base de telefonía móvil puede poseer varias antenas. Normalmente, el aumento del número de antenas en una estación base de telefonía móvil se debe a que más de un operador de telefonía móvil la utiliza o a que un cambio de tecnología hace necesario implementar una nueva línea de antenas en la estructura.

Las antenas, dependiendo de su tipo de aplicación y banda de frecuencia en la cual operan, cuentan con ciertas características que condicionan su funcionamiento, a saber: impedancia, intensidad de radiación, directividad y ganancia, área efectiva, polarización, ancho de banda y patrón de radiación.

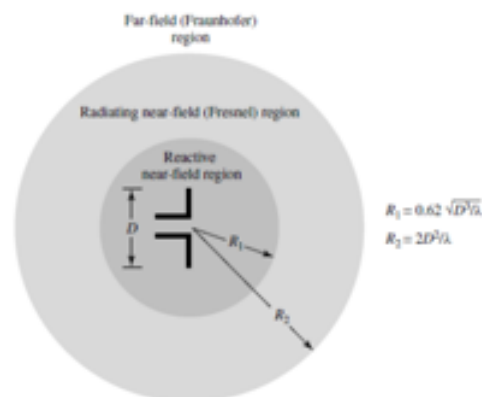
Los equipos de telefonía móvil se comunican mediante el uso de la EBTM más cercana, la cual provee cobertura a los usuarios situados dentro de su alcance; a estas pequeñas regiones se les conoce como células (Cruz, citado por Gallego-Serna, 2011), de donde deriva el nombre telefonía celular. La célula o celda, a su vez, se divide en sectores, pues no utiliza una antena que irradia señal equitativamente en todas las direcciones (antena omnidireccional) sino antenas que cubren cada 120 grados en planta cada una, si es de tres sectores, o cada 60 grados en planta cada una, si es de seis sectores. El tamaño de la célula o celda depende de factores como la potencia del equipo transmisor, la banda de frecuencia empleada, la altura y posición de la torre de soporte, el tipo de antena, la topografía del sector, la sensibilidad del radio receptor y la densidad del tráfico de llamadas.

En áreas donde existe un alto tráfico de llamadas (normalmente zonas urbanas) se presentan muchas conexiones al tiempo, por lo tanto, al poseer la estación un número limitado de conexiones, se hace necesario que el área que cubre cada estación sea menor, provocando una alta densidad de estaciones al tener que cubrir áreas más pequeñas. A nivel mundial, la red de antenas llega a ser tan densa que en Tokio hay una antena por cada 99, en Londres una por cada 261 s, en San Pablo una por cada 1.947, en Lima una por cada 3.462, en Buenos Aires una por cada 4.076 (Telecom Argentina, 2015) y en Bogotá

existe una antena por cada 731 habitantes (Asomovil). Es importante acotar que existen ciudades que no posee una mayor densidad de antenas debido a que la legislación vigente no lo permite.

Las antenas de comunicaciones son fuente de radiación y contemplan una serie de campos asociados a las características de emisión: intensidad de los campos electromagnéticos, la potencia de emisión y la longitud de onda. Los campos de radiación se reúnen en dos grandes grupos: campos lejanos (campos de radiación) y campos cercanos (campos inducidos), los cuales se dividen en dos subregiones: el campo cercano reactivo y el campo cercano radiactivo o región de Fresnel (figura 1).

Figura 1. Campos de radiación



Fuente: Henao-Céspedes, 2012.

El campo lejano, o región de Fraunhofer, es el más retirado de la fuente y se caracteriza por el predominio de la onda tipo plana, por lo cual los vectores de campo eléctrico  $E$  y los vectores de campo magnético  $H$  son ortogonales en un plano perpendicular al vector de densidad de potencia; por ende, se puede considerar la intensidad de campo eléctrico o la intensidad de campo magnético para realizar mediciones, teniendo en cuenta que en dicha región sus valores son directamente proporcionales.

Por su parte, en el campo cercano radiactivo o zona de Fresnel, la onda electromagnética no posee un comportamiento de onda plana, por lo tanto, se deben realizar mediciones de intensidad de campo eléctrico o la intensidad de campo magnético debido a que sus valores son totalmente independientes. El campo

cercano reactivo o campo próximo inducido es la región de campo cercano inmediatamente circundante a la antena.

### **INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO (E)**

El campo eléctrico está relacionado con la fuerza electrostática presente alrededor de una carga fuente mediante la cual se da interacción con otras cargas. Este campo es considerado la circunscripción donde se genera un movimiento que representa cada uno de sus puntos mediante una magnitud vectorial llamada intensidad de campo eléctrico  $E$ . La intensidad de campo eléctrico se mide en voltios sobre metro (V/m) (Andrade-Guerrero & Contreras-Ortiz, 2014).

### **INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO (H)**

El campo magnético es el campo de fuerza que se ejerce sobre los materiales. Un campo magnético puede ser causado por cargas en movimiento, por un flujo de corriente o un imán permanente. La intensidad de campo magnético es una medida vectorial que junto a la inducción magnética determina un campo magnético en cualquier punto del espacio. La intensidad de campo magnético se mide en amperios sobre metro (A/m) (Febles-Santana, 2015).

### **DENSIDAD DE POTENCIA (S)**

La densidad de potencia es la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación. Es la potencia radiante que incide perpendicular a una superficie, dividida por el área de la superficie y expresada en vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>).

La densidad superficial de potencia (DSP) es la potencia que pasa un área de 1 m<sup>2</sup>, se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>) y representa la cantidad de energía absorbida por una superficie expuesta a la radiación.

### **MEDICIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS**

La medición de campos electromagnéticos para el caso de antenas está regulada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), mediante la Recomendación IUT-T K.52 "Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas

a los campos electromagnéticos", y especificada en la recomendación IUT-T K.61 "Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas". Para el caso de enrutadores wifi y teléfonos móviles no existe una medición establecida y aceptada, aunque normalmente en los proyectos de investigación y académicos se utiliza el valor establecido por la IUT. Las recomendaciones para medición de campos electromagnéticos esta direccionada a la supervisión y control de radiación en lugares de carácter ocupacional.

La metodología establecida para la medición de campos electromagnéticos en Colombia (Resolución 1645 de 2005) dispone para estaciones radioeléctricas un procedimiento con los siguientes pasos:

- Establecer una hora adecuada de medición, de tal manera que refleje en lo posible un nivel normal de alto nivel de tráfico o de utilización.
- Iniciar la toma de medidas con la sonda a una distancia que presente una lectura significativa, tratando en lo posible de describir dos trayectos perpendiculares con respecto a la fuente radiante en forma de cruz con la sonda de medición ubicada a 1,70 metros de altura.
- En caso que la estación se encuentre ubicada en áreas circunvecinas de público general, se recomienda realizar un recorrido de medición por las áreas limítrofes determinando el nivel de lectura del instrumento.
- En caso que los valores medidos superen en los recorridos los límites de exposición de la norma K.52 se realizarán mediciones promedio de 6 minutos, con el fin de estudiar su estabilidad en el tiempo.
- Con la información recolectada se podrán realizar gráficas de toma de medidas, indicando los niveles de campo normalizados respecto a los límites establecidos de exposición.

En la medición de ondas electromagnéticas se debe tener claridad si el sitio objeto de estudio es irradiado por fuentes de emisión o inmisión. Como medición de emisión se denomina a la medición realizada con equipo banda angosta (medidores de intensidad



de campo y analizadores de espectros, entre otros), sintonizables a fuentes definidas. Por su lado, se denomina medición de inmisión a la que se realiza empleando instrumentos de banda ancha (detectores de radiación electromagnética no sintonizables), con sondas de medición E y H isotrópicas a fuentes indefinidas y en un rango amplio de frecuencias.

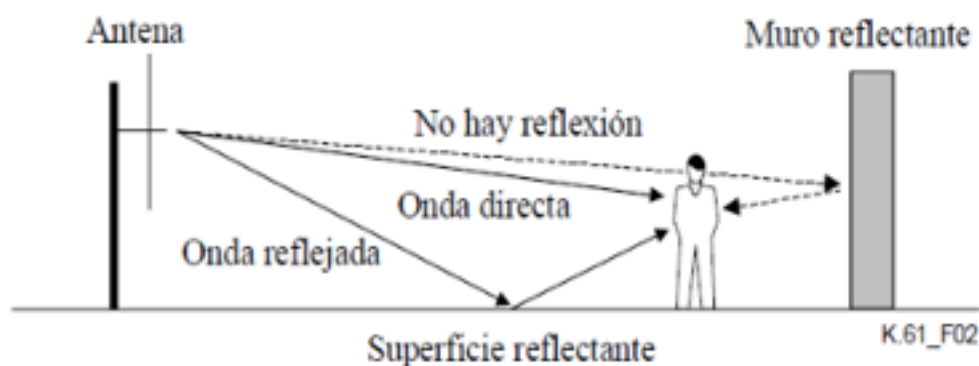
La mayoría de los dispositivos mide el campo eléctrico o el campo magnético. En el caso de campo reactivo, la distinción de los campos eléctrico y magnético es importante. En el caso de la región de campo lejano, es posible medir el componente de uno solo de los campos y así determinar la densidad de potencia relativa. Sin embargo, normalmente se utilizan los dispositivos de medición de campo eléctrico (recomendación IUT-T K.61).

Durante las mediciones, las cantidades básicas son difíciles de medir directamente, por lo que la mayoría de los documentos proporciona niveles derivados de referencia para el campo eléctrico, el campo magnético y la densidad de potencia. Los límites derivados se utilizan en situaciones en las que el campo electromagnético es afectado por la presencia de un cuerpo. Los límites normalmente se expresan como valores

eficaces de una onda sinusoidal promediada a lo largo de un periodo definido. Un ejemplo de ello son los límites de referencia ICNIRP, los cuales deben promediarse a lo largo de cualquier periodo de seis minutos en frecuencias por debajo de 10 GHz.

La intensidad del campo electromagnético varía con la posición espacial debido al efecto de la reflexión y la dispersión sobre las estructuras adyacentes. La escala de esta variabilidad es función de la longitud de onda y es importante considerarla para determinar los emplazamientos de máxima exposición y utilizar el promediado espacial de manera adecuada. Como las normas de exposición especifican los límites de exposición de las personas, debe considerarse el efecto del propio cuerpo sobre el diagrama de campo. La posición de una persona en un espacio la afectaría, pues absorbería la onda incidente creando una región de sombra e impidiendo una reflexión que, de producirse, incrementaría el campo en el emplazamiento donde se encuentra. Estos tipos de efectos en radiofrecuencias altas pueden dar lugar a una sobreestimación del campo durante las mediciones cerca de objetos reflectantes, como se observa en la figura 2 (recomendación IUT-T K.61).

Figura 2. Ilustración de una alteración multirrayecto debido a la presencia de un cuerpo humano



Fuente: recomendación IUT-T K.61.

Por último, es importante establecer que durante la medición la distancia juega un papel importante entre la fuente y el instrumento debido a que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia; es decir, a una distancia doble la intensidad de la onda electromagnética corresponde a un cuarto de la intensidad inicial, mientras que a una distancia triple la intensi-

dad de la onda electromagnética es equivalente a un noveno.

## MEDICIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS AL AIRE LIBRE

La medición de campos electromagnéticos al aire libre normalmente se realiza cerca de estaciones base con el fin de controlar los límites de exposición de las ondas emitidas por sus antenas. Las metodologías aplicadas son variadas, pero siempre enmarcadas dentro de las normas.

La medición para una estación base en ambiente al aire libre se divide en toma de medición horizontal y vertical. Las mediciones en sentido horizontal normalmente se establecen dentro de los 100 metros alrededor de la estación base, tomándose bien sea cada uno, cinco o diez metros, según la metodología establecida previamente. La medición en sentido vertical normalmente inicia a una altura de veinte centímetros sobre el nivel del suelo y puede llegar a dos metros de altura, tomándose cada veinte o cincuenta centímetros, según lo dispuesto por el investigador. La mayoría de los investigadores divide el área circundante a la antena en planta en cuatro ejes perpendiculares entre sí, sobre los que se desplazan tomando las mediciones anteriormente descritas.

El tiempo de medición se toma normalmente durante un periodo de seis minutos; sin embargo, algunas investigaciones calculan la duración recomendada dependiendo de la frecuencia a analizar y sobre la base de las tablas establecidas por los organismos internacionales.

## CONTEXTO DEL PROYECTO

El contexto del proyecto se desarrolla en el marco del método cualitativo, basado en el análisis del estado del arte y estableciendo la importancia de entregar una panorámica de la contaminación electromagnética circundante al público en general. Por otra parte, en el ambiente al aire libre se realizan diferentes mediciones cuantitativas a estaciones base de telefonía móvil mediante puntos de medición distribuidos. Una vez realizadas las mediciones, se establecen comparaciones entre contaminación electromagnética al aire libre en los diferentes puntos tomados.

## Población y área objeto de estudio

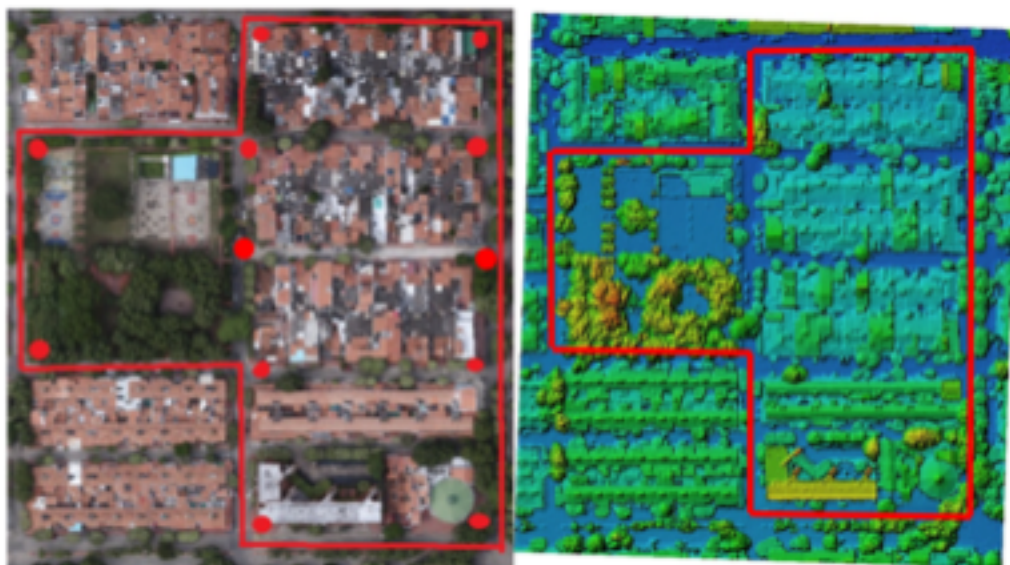
La selección de la población y el área objeto de estudio se desarrolla en el marco del método cualitativo, cuyo objetivo es establecer una distribución de puntos de medición en un sector densamente poblado con alta densidad de EBTM, lo cual permite determinar un comparativo entre la contaminación producto de la EBTM entre los diferentes puntos del ambiente al aire libre.

La población seleccionada es la ciudad de Cúcuta en el departamento de Norte de Santander (Colombia), puesto que al ser esta una ciudad intermedia posee una extensa red de EBTM y una alta densidad poblacional que se evidencia en algunos sectores, además de presentar una topografía regular constante y plana en la mayor parte del contexto urbano y bajas precipitaciones en temporadas de lluvias, características que no ionizan el ambiente ni afectan la toma de mediciones.

El área objeto de estudio para las mediciones comparativas al aire libre dentro de la ciudad de Cúcuta corresponde al barrio Los Pinos, el cual posee condiciones idóneas representadas en una muestra urbana de tipo residencial, comercial e institucional, así como en características que ofician como constantes y permiten disminuir las variables para la toma de mediciones y su posterior análisis.

El barrio Los Pinos es producto del desarrollo urbanístico planificado que se dio en la ciudad de Cúcuta en los años 70 del siglo pasado, con manzanas ortogonales, calles planas y rectas, viviendas fabricadas con sistema constructivo constante (figura 3) a base de pisos en tableta de concreto, que con el tiempo dieron paso a la cerámica, muros en mampostería y cubiertas en placa maciza, y una excelente arborización que crea una relación armónica ser humano-naturaleza (Mosquera, 2006) poco vista en algunos barrios la ciudad. Lo que en un principio se proyectó como un barrio residencial para estrato medio de la ciudad, pronto se uniría a la dinámica de crecimiento y albergaría un parque deportivo y recreacional de uso público, un colegio privado, templos de origen católico romano y cristiano y un comercio integrado principalmente por restaurantes y almacenes de ropa. Adicionalmente, el barrio Los Pinos se encuentra en un sector neurálgico de la ciudad, pues en sus inmediaciones se encuentran el Hospital Universitario Erasmo Meoz, las

**Figura 3.** Fotografía aérea, delimitación y puntos de medición al aire libre propuestos (a); y fotografía altimetría Barrio Los Pinos, Cúcuta (b)



Fuente: elaboración propia.

facultades de Comunicación Social y Medicina de la Universidad de Pamplona, la sede principal de la Universidad Francisco de Paula Santander, la Avenida Los Libertadores, el Canal de aguas lluvias Bogotá, la Avenida Guaimaral (Avenida 11E) y la Avenida Los Pinos (Calle 2E).

Adicionalmente, el barrio Los Pinos tiene una característica muy importante para el propósito del presente estudio: la ubicación de una Estación Base de Telefonía Móvil (EBTM) en lo que antiguamente fuese una vivienda (figura 4).

**Figura 4.** Fotografía 3D Barrio Los Pinos (Cúcuta)



Fuente: elaboración propia.

### Magnitudes para la medición de campos electromagnéticos

La medición de campos electromagnéticos está enmarcada en el método cuantitativo. La medición es el trabajo de campo correspondiente a la toma de intensidad de campo eléctrico (E) en V/m, intensidad de campo magnético (H) en A/m y densidad de potencia en W/m<sup>2</sup>.

Las ondas electromagnéticas en un punto de medición pueden presentar aportes por cada eje del espacio. Además, al realizar mediciones a fuentes de inmisión por cada uno de los ejes X, Y y Z, se pueden obtener valores para cada una de las magnitudes; razón por la cual en el presente proyecto se busca tomar la magnitud como un único valor. Por lo tanto, el valor asumido corresponde a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada eje.

En la medición de campos eléctricos, cuando se desea un valor promedio en un lapso de tiempo, se maneja el concepto de valor medio temporal establecido en la recomendación UIT-TK.61 para frecuencias por

debajo de 10 GHz, como es el caso de los equipos dirigidos al estudio de ambientes internos en edificaciones. Para el presente caso, se trabajó con el promedio máximo a fin de obviar los valores picos inferiores de la onda durante la medición.

### Periodo de medición

El periodo de medición establecido en el marco de esta investigación es de seis minutos para frecuencias por debajo de los 10 GHz durante cada una de las mediciones realizadas (UIT-TK.61).

### Equipo de medición

El equipo de medición seleccionado es el medidor de intensidad de RF CEM EXTECH INSTRUMENTS Modelo 480846 escala de frecuencia de 10 MHz a 8 GHz, el cual es un medidor de banda ancha para monitorear la radiación de alta frecuencia, permite la obtención de medidas isotrópicas y es un sensor de medición de tres canales.

Figura 5. Equipo medidor de intensidad de RF CEM EXTECH INSTRUMENTS Modelo 480846



Fuente: elaboración propia.

### Horario para la toma de mediciones

Teniendo en cuenta que el proyecto posee como objetivo realizar mediciones con la menor afectación por ondas electromagnéticas naturales, como las producidas por el Sol, las medidas se realizaron en horas de la

noche. De esta manera, las mediciones fueron realizadas en el horario comprendido entre 6:00 y 9:00 p. m.

### Medición al aire libre en el barrio Los Pinos

La medición al aire libre en Los Pinos se realizó mediante la toma de datos en doce puntos diferen-



tes correspondientes a las esquinas de las cuadras que comprenden el barrio (figura 3). Normalmente, durante las tres horas de medición establecida por día solo se pudo lograr hacer un recorrido de los doce puntos de medición al aire libre. El procedimiento establecido es el siguiente:

- Toma de datos entre 6:00 y 9:00 p. m.
- El operador del equipo debe estar desprovisto de equipos electrónicos y equipos de telefonía móvil.
- El operador georreferencia los puntos mediante el uso de un GPS
- El operador se ubica en cada punto, dirigiendo el equipo y su respectiva antena isotrópica al norte magnético.
- El operador eleva el equipo a una altura de 1,50 metros con la mano erguida separada del cuerpo a partir de su encendido.
- El operador establece en el equipo la toma de los valores promedio máximo de cada una de las intensidades de campo y la densidad de potencia.
- El tiempo de medición es de seis minutos, de tal forma que una vez trascurren se toman en bitácora los valores captados por el equipo.
- Si inmediatamente antes o durante la medición se enciende el ícono para cambio de batería del equipo, no se tiene en cuenta el último dato captado y se procede rápidamente a la suspensión del proceso de medición, al cambio de la batería y al reinicio del proceso de medición desde el punto en el cual se generó la suspensión.

Figura 6. EBTM barrio Los Pinos (a), georreferenciación de un punto (b) y medición al aire libre EBTM (c)



Fuente: elaboración propia.

### Resultados de las mediciones al aire libre

Las mediciones desarrolladas en el marco del presente estudio comprendieron la toma de los valores de intensidad de campo eléctrico, intensidad de campo magnético y densidad de potencia captados durante un periodo de seis minutos, correspondientes a 3.600 datos en cada punto. Su conversión en un único valor promedio máximo por punto presentó los resultados señalados en la tabla 1 y la figura 7.

Al observar la fuente radiante o EBTM se identifica fácilmente el punto 7 como el punto de medición más cercano, el cual no es el punto más elevado, de acuerdo con la interpretación de la gráfica de magnitudes.

Lo anterior se debe a la cercanía de este punto con la antena, ya que la proyección de la antena funciona como la luz de un faro, la cual no alumbró su base, ni un radio circundante a esta. Los valores más elevados están en el punto 8, el cual se encuentra a una distancia de 64,8 metros y es el que presenta los mayores valores, junto con los puntos 6 y 5, ubicados al otro lado del parque a una distancia de 120,1 metros y 169,9 metros de la EBTM, respectivamente.

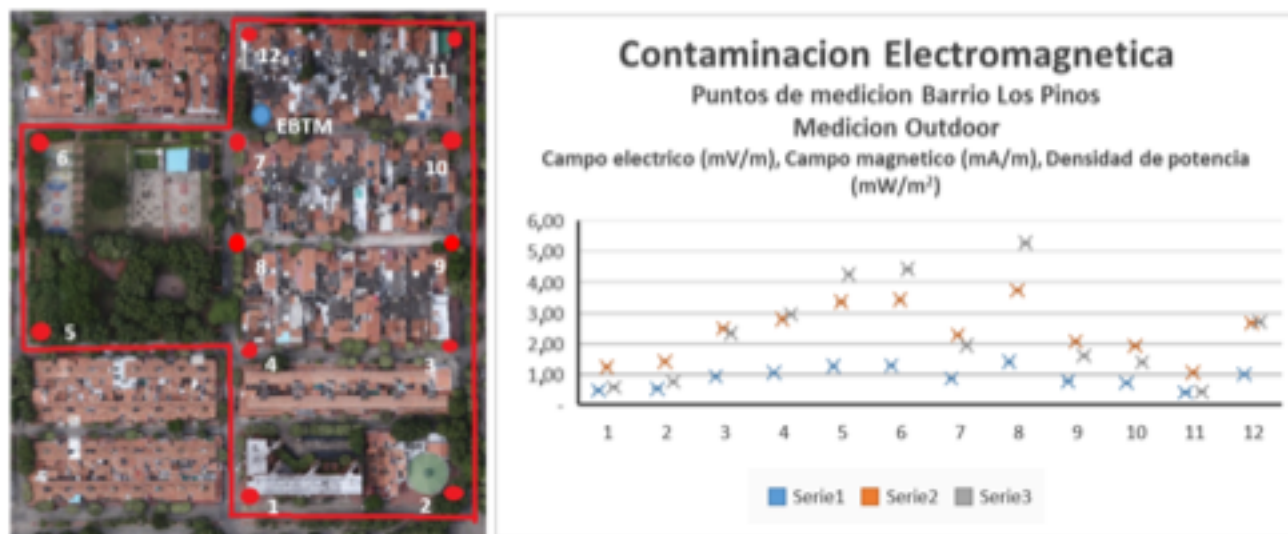


**Tabla 1.** Valor promedio máximo en los puntos de medición al aire libre del barrio Los Pinos

FECHA	MEDICION	COORDENADAS		DIRECCION	Intensidad C Electrico (mV/m)	Intensidad C Magn. (mA/m)	Densidad de Potencia (μW/m2)
6/10/2017	1	N 7° 54' 01,4"	W 72° 29' 28,2"	Calle 2N con Avenida 7E	0,4673	1,239	0,5792
6/10/2017	2	N 7° 54' 01,3"	W 72° 29' 34,6"	Calle 2N con Avenida 9E	0,5347	1,418	0,7586
6/10/2017	3	N 7° 54' 04,3"	W 72° 29' 34,6"	Avenida 9E CON Calle 3N	0,9386	2,485	2,336
6/10/2017	4	N 7° 54' 04,2"	W 72° 29' 38,4"	Avenida 7E CON Calle 3N	1,055	2,800	2,956
6/10/2017	5	N 7° 54' 04,2"	W 72° 29' 42,1"	Avenida 6E CON Calle 3N	1,266	3,359	4,255
6/10/2017	6	N 7° 54' 08,1"	W 72° 29' 42,1"	Avenida 6E CON Calle 4AN	1,291	3,425	4,423
6/10/2017	7	N 7° 54' 07,9"	W 72° 29' 38,2"	Avenida 7E CON Calle 4AN	0,8574	2,274	1,949
6/10/2017	8	N 7° 54' 06,7"	W 72° 29' 34,2"	Avenida 7E CON Calle 4N	1,410	3,740	5,275
6/10/2017	9	N 7° 54' 08,4"	W 72° 29' 38,9"	Avenida 9E CON Calle 4N	0,7802	2,069	1,614
6/10/2017	10	N 7° 54' 07,7"	W 72° 29' 34,4"	Avenida 9E CON Calle 4AN	0,7254	1,924	1,395
6/10/2017	11	N 7° 54' 09,8"	W 72° 29' 34,8"	Avenida 9E CON Calle 5AN	0,4005	1,062	0,4254
6/10/2017	12	N 7° 54' 09,8"	W 72° 29' 38,4"	Avenida 7E CON Calle 5AN	1,009	2,676	2,700

Fuente: elaboración propia.

**Figura 7.** Valor promedio máximo de la contaminación electromagnética en el barrio Los Pinos. Medición al aire libre, Campo eléctrico o serie 1 (V/m), campo magnético o serie 2 (mA/m) y densidad de potencia o serie 3 (μW/m²)



Fuente: elaboración propia.

De esta manera surge la siguiente inquietud: ¿es posible afirmar que los valores elevados se deban a radiación electromagnética de frecuencias entre 10 MHz y 8 GHz? En relación con dicho interrogante, se observa que la densidad de potencia es baja cuando la fuente radiante es un equipo sin tecnología inalámbrica, la densidad es elevada, la fuente radiante es un equipo con tecnología inalámbrica, o en este caso una EBTM, como se evidencia en los puntos de valores más ele-

vados, en la cual se identifica que la densidad de potencia es la magnitud de mayor rango.

Otra inquietud de carácter técnico es la siguiente: si el punto 4 dista menos de la EBTM que los puntos 5 y 6, ¿por qué estos últimos tienen mayores magnitudes? En este caso, la aclaración consiste en que los puntos 5 y 6 están ubicados al otro lado del parque y presentan pocos objetos que causen apantallamiento, de tal

forma que le permiten a la onda desplazarse sin mayor obstrucción. La situación del punto 4 es la contraria, está cerca a la fuente radiante pero existen edificaciones que causan reflexión, difracción y dispersión.

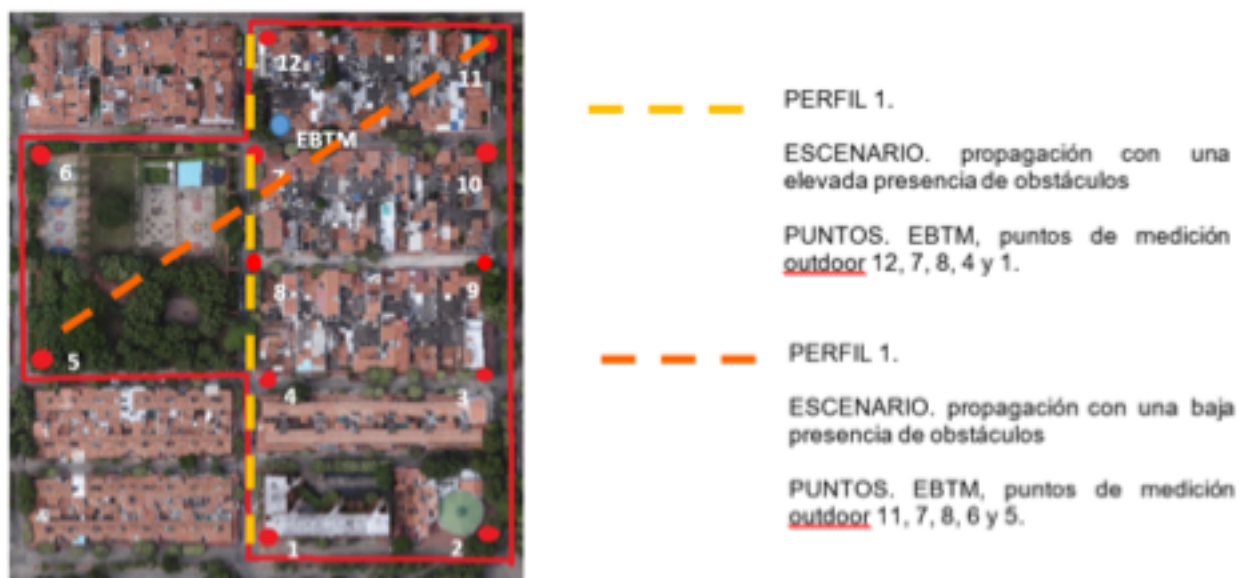
## Discusión

El ambiente al aire libre del barrio Los Pinos se puede tipificar como el comportamiento de la contaminación electromagnética en los sectores circundantes a las EBTM en un radio de 120 metros.

En el ambiente al aire libre se pueden presentar dos escenarios muy frecuentes (perfil 1 y 2 de la figura 8).

El primero corresponde a una propagación con una fuerte presencia de obstáculos que generan apantallamiento y, por ende, una disminución en la contaminación electromagnética. Este escenario se presenta cuando los obstáculos son edificaciones, principalmente en mampostería, las cuales dificultan el libre paso de las ondas (figura 9). El segundo escenario planteado corresponde a una propagación con poca presencia de obstáculos que no generan apantallamiento, como parques, zonas verdes, parqueaderos a cielo abierto, entre otros, lo que permite a las ondas desplazarse sin ninguna restricción, presentando una contaminación electromagnética elevada si está dentro del radio de 120 metros de la EBTM.

Figura 8. Perfiles del análisis de contaminación electromagnética al aire libre

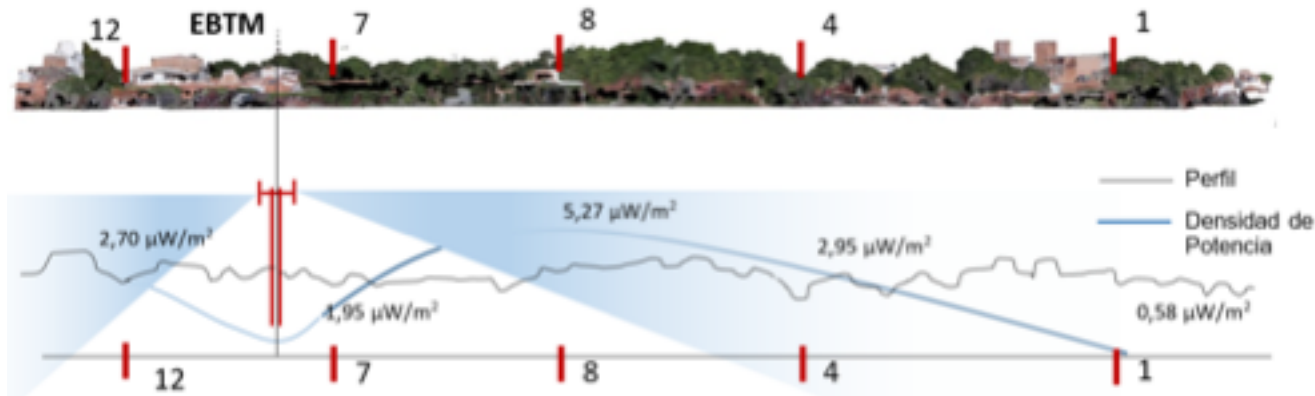


Fuente: elaboración propia.

En el perfil 1, correspondiente a la figura 9, tomando la EBTM y los puntos de medición 12, 7, 8, 4 y 1 del barrio Los Pinos (figura 8), se muestra cómo en presencia de viviendas y edificaciones –que para el presente caso corresponden a casas de 1 y 2 pisos entre los puntos 12 y 4 y edificaciones de 4 pisos entre el punto 4 y 1– la densidad de potencia disminuye considerablemente (representa por la curva azul) debido al efecto de apantallamiento producto de las casas y edificaciones ubicadas en el trayecto.

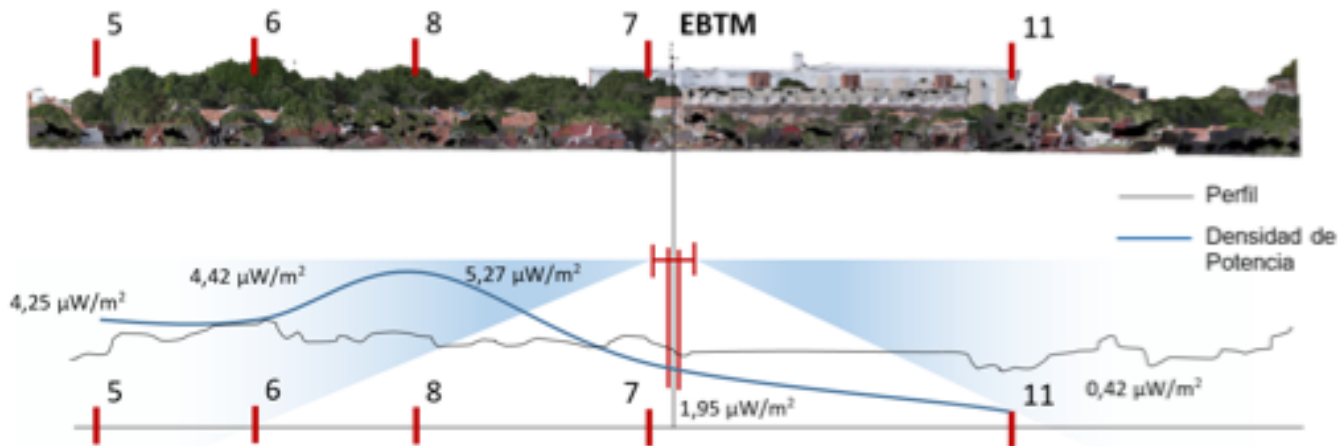
En el perfil 2, correspondiente a la figura 10, tomando para este caso el punto de la EBTM y los puntos de medición 11, 7, 8, 6 y 5 del barrio Los Pinos (figura 8) –y ubicando todos sobre una sola línea recta bajo el precepto que las antenas ubicadas en la EBTM irradian de manera constante los puntos de forma radial–, se observa que los puntos de medición comprendidos entre el punto 5 y el 8, correspondientes al parque Los Pinos, poseen valores mayores de densidad de potencia y, por tanto, mayor contaminación electromagnética. En el caso de los puntos de medición 7 y 11, ubicados entre viviendas y edificaciones, se exhiben los

Figura 9. Perfil 1: densidad de potencia con apantallamiento de casa y edificaciones



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Perfil 2 densidad de potencia sin apantallamiento de casas y edificaciones.



Fuente: elaboración propia.

valores de densidad de potencia más baja. Por ende, se puede afirmar que poseen una menor contaminación ambiental por ondas electromagnéticas.

Por último, una vez analizados los anteriores planteamientos, se puede afirmar que, en el caso específico del barrio Los Pinos, existe mayor contaminación por ondas electromagnéticas en el parque que en las calles internas del mismo, sin importar si están próximas a la EBTM, debido al efecto de apantallamiento de las edificaciones.

## CONCLUSIONES

Los acelerados procesos de urbanización incrementan la cantidad e intensidad de los contaminantes que ejercen efectos negativos en la salud y la calidad de vida de los habitantes de los cada vez más grandes entornos urbanos. Teniendo en cuenta que, a diferencia de la contaminación atmosférica por residuos sólidos o la contaminación del agua, algunos contaminantes como las ondas electromagnéticas no se aprecian fácilmente, se hace necesario adelantar investigaciones exhaustivas tendientes a confirmar o desvirtuar sus efectos negativos en los entornos habitados por el ser humano.

Lo anterior adquiere mayor relevancia si se tiene en cuenta que en las últimas décadas las ondas electromagnéticas han tenido un incremento considerable que de la mano de los crecientes procesos de densificación y consolidación urbana y del gigantesco crecimiento de la telefonía móvil y las conexiones de banda ancha en términos de cantidad, cobertura, intensidad de uso y aplicación a todas las funciones del hombre.

Como respuesta a esa tendencia global predominante, también se encuentra en ascenso la preocupación individual, colectiva e institucional sobre los riesgos que ejercen los campos electromagnéticos de radiofrecuencia en la salud de las personas y la calidad del ambiente, específicamente en lo concerniente a la exposición a la radiación electromagnética producto del abundante uso de telefonía móvil y de la creciente necesidad de conectividad para el acceso a internet, representados en el desmedido aumento de estaciones base de telefonía móvil en las ciudades.

En ese sentido, se requieren elementos de juicio para reconocer e interpretar adecuadamente los niveles de exposición a las ondas electromagnéticas y la contaminación que estas ejercen en lugares de uso y ocupación frecuente, tales como los diferentes elementos representativos del espacio público, entre los que se encuentran un sinnúmero de espacios al aire libre apetecidos por las comunidades para el desarrollo de actividades cotidianas de integración, recreación, ocio y esparcimiento. Máxime si se tiene en cuenta que cerca de dichos espacios, generalmente, se encuentran ubicadas EBTM para dar respuesta a la necesidad de cobertura que demanda la ciudad.

La elección de la ciudad y el área objeto de estudio, como es el caso de Cúcuta y el parque deportivo y recreacional de uso público ubicado en el barrio Los Pinos, responde a criterios estratégicos comunes a muchas ciudades y espacios urbanos abiertos, tales como densidad poblacional, regularidad del relieve, bajo índice de precipitación (que no afecta la toma de mediciones) y usos del suelo de tipo residencial, comercial e institucional, los cuales no solo permiten reducir la cantidad de variables de análisis y agilizar el proceso diagnóstico, sino que además admiten la posibilidad de hacer extensivos los resultados de la investigación a muchos contextos urbanos con características similares.

La estimación de la contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre se encuentra estrechamente ligada al tipo de fuentes de emisión, número de fuentes, distancia a las fuentes, ubicación del espacio en estudio y densidad de edificaciones que confinan el sitio objeto de estudio. Así mismo, este tipo de contaminación se encuentra cercanamente relacionada con la densidad de edificaciones u obstáculos y con los materiales de ingeniería empleados en su construcción.

Los resultados de esta investigación señalan que el área urbana ubicada a una distancia de 60 metros de una EBTM presenta una mayor contaminación electromagnética por ondas no ionizantes en zonas no provistas de edificaciones que en aquellas edificadas. Por lo anterior, el mayor valor de contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes en el barrio Los Pinos de la Ciudad de Cúcuta se presentó en el parque o área de esparcimiento, con un valor de densidad de potencia de  $5,27 \mu\text{W}/\text{m}^2$ .

En un ambiente al aire libre con alta densidad de edificaciones y espacio público, en los 120 metros circundantes a la EBTM las mediciones de contaminación ambiental son más elevadas en el área de esparcimiento a cielo abierto y, por ende, se presenta mayor contaminación. La relación de la contaminación ambiental de la zona densamente edificada con respecto a zonas poco edificadas es de 1:10.

De acuerdo con lo expuesto, la estructura regular de un barrio convencional, representada en la disposición de viviendas, edificaciones de uso complementario y parques, no solo facilita el análisis de la contaminación ambiental por ondas electromagnéticas no ionizantes para las comunidades que habitan áreas similares, sino que también genera el reconocimiento de que el excesivo e inadecuado emplazamiento de EBTM en los entornos residenciales hace que los espacios al aire libre, generalmente relacionados con el mejoramiento de la calidad de vida, no cumplan con su función primordial de garantizar el derecho de los ciudadanos a un ambiente sano.



## REFERENCIAS

- Andrade-Guerrero, D. M., & Contreras-Ortiz, C. F. (2014). *Medición y análisis de nivel de exposición a radiaciones no ionizantes (RNI) en ambientes indoor en la ciudad de Cuenca, dentro del espectro radioeléctrico en la banda de frecuencia de telefonía celular* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Arribas-Garde, E., Barrera-Kalhil, J., Beléndez-Vázquez, A., González-Rubio, J., & Nájera-López A. (2014). ¿Absorbe nuestro cuerpo las ondas electromagnéticas? *Lat. Am. J. Sci. Educ.*, 1, 1-12.
- Asociación de la Industria Móvil de Colombia [Asomóvil]. (2016). <https://cintel.co/wp-content/uploads/2016/04/Pres-Nancy-Gutierrez-3C.pdf>.
- Castellanos-Díaz, E., & Talero-Niño, J. B. (2005). Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados: Herramienta software en Matlab para predicción y simulación. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(6), 130-137.
- Castillo-Sarmiento, A. Y., Suárez-Gélvez, J. H., & Mosquera-Téllez, J. (2017). Naturaleza y sociedad: relaciones y tendencias desde un enfoque eurocéntrico. *Luna Azul*, 44, 348-371. doi: 10.17151/luaz.2017.44.21
- Comisión Internacional para la Protección Contra la Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (1998). *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)*. Oberschleissheim: ICNIRP.
- Comisión Internacional para la Protección Contra la Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (2009). *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*. Oberschleissheim: ICNIRP.
- Comisión Internacional para la Protección Contra la Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (2018). <https://www.icnirp.org/en/home/home-read-more.html>.
- Febles-Santana, V. M. (2015). *Efectos radiaciones no ionizantes en el cuerpo humano* (tesis de maestría). Universitat Oberta de Catalunya, España.
- Gallego-Serna, L. M. (2011). *Lineamientos para la gestión del riesgo de las áreas urbanas expuestas a las radiaciones electromagnéticas emitidas por las estaciones base de telefonía móvil estudio de caso: Municipio de Cartago Valle* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Henaó-Céspedes, V. (2012). *Propuesta metodológica para medición de la contaminación electromagnética y su aplicación en la elaboración de un mapa de riesgo de la ciudad de Manizales* (tesis de postgrado). Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2013). *Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 112. Lyon: IARC.
- Martínez-Reina M. D., & Amado-González, E. (2012). Densidad e índice de refracción de mezclas binarias sulfolano+tolueno: correlación y predicción del volumen de exceso molar. *Avances Investigación en Ingeniería*, 9(1), 25-38
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (31 de enero de 2005). Decreto 195 de 2005 por el cual se adopta límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: MinTic.
- Mosquera, J. (2006). Arquitectura y desarrollo. *Revista científica UNET*, 18(2), 152-161.
- Organización Internacional del Trabajo [OIT]. (2001). Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. OIT.
- Quintana, A., & Sepúlveda, O. (2013). *Niveles de radiación de campo electromagnético presentes en las antenas WIFI Omnidireccionales* (tesis de pregrado). Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.
- Telecom Argentina. (2018). ¿Cómo funciona un sistema de telefonía móvil? Recuperado de [https://institucional.telecom.com.ar/antenas/images/triptico\\_antenas\\_como\\_funciona.pdf](https://institucional.telecom.com.ar/antenas/images/triptico_antenas_como_funciona.pdf).



Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2018). IUT-T K.61. *Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas*. Ginebra: UIT.

# Dinámica no lineal del mercado del café en Colombia

## Non-linear Dynamics of the Coffee Market in Colombia

**Cristian Felipe Jiménez Varón**

Ingeniero Químico e Industrial de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales  
Grupo de Investigación en Física y Matemáticas con Énfasis en la Formación de Ingenieros  
Profesor de la Universidad Autónoma de Manizales, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-7471-3845>  
[cristian.jimenezv@autonoma.edu.co](mailto:cristian.jimenezv@autonoma.edu.co)

**Reinel Tabares Soto**

Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Ingeniero en Sistemas y Computación de la Universidad de Caldas,  
M.Sc. Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Colombia  
Grupo de Investigación Automática  
Profesor de la Universidad Autónoma de Manizales, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-4978-5211>  
[rtabares@autonoma.edu.co](mailto:rtabares@autonoma.edu.co)

Fecha de recepción: 1 de noviembre del 2018  
Fecha de aceptación: 22 de noviembre del 2018

**Sugerencia de citación:** Jiménez-Varón, C. F., & Tabares-Soto, R. (2018). Dinámica no lineal del mercado del café en Colombia. *Mutis*, 8(2), 73-83. doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1405>

## RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo modelar las variables de oferta, demanda y *stock* del mercado del café verde colombiano comercializado como *commodity*. A partir de estas variables se formula un modelo de sistemas dinámicos usando ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales permiten observar el comportamiento del mercado de este producto. El análisis realizado tiene en cuenta algunos parámetros, como las tasas de exportación e importación, estimados a partir de datos históricos sobre el mercado del café reportados por las entidades oficiales. En el documento se muestra la formulación del modelo, seguido por el cálculo de los puntos de equilibrio y su estabilidad. Por último, se presenta la simulación de las variables de estado.

**Palabras clave:** sistemas dinámicos, modelo matemático, mercado del café.

## ABSTRACT

The objective of this paper is to model the supply, demand and stock variables of the Colombian green coffee market commercialized as a commodity. Based on these variables, a model of dynamic systems is formulated using ordinary differential equations, which allow observing the behavior of the Colombian coffee market. The



analysis takes into account some parameters, such as export and import rates, estimated from historical data on the coffee market reported by official entities. The document shows the formulation of the model, followed by the calculation of the equilibrium points and their stability. Finally, simulation of state variables is presented.

**Keywords:** Dynamical systems, mathematical model, coffee market.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mercado del café presenta un comportamiento volátil en el tiempo debido a las variables que definen su economía. A causa de esto, en las últimas décadas, entidades estatales y privadas han desarrollado diferentes investigaciones enfocadas al análisis económico del mercado del café. Estas, en su mayoría, han sido investigaciones sociales, económicas y de mercadeo. Sin embargo, desde el campo de los sistemas dinámicos no se encuentran suficientes reportes sobre el tema.

El presente artículo plantea un modelo del mercado del café colombiano construido a partir del análisis de su panorama nacional e internacional. Este trabajo lleva a cabo un estudio de tipo cualitativo con ecuaciones diferenciales, con el objetivo de generar información que pueda ser de utilidad para los agentes que toman decisiones en dicho mercado.

Las variables involucradas en el modelado son: la demanda nacional (caracterizada por el consumo tradicional del café a nivel doméstico), la demanda internacional (proveniente en su mayoría de países norteamericanos y algunos europeos, como Alemania), la oferta nacional, las importaciones de café para abastecer parte de la demanda local y el *stock* de café (bodegas y almacenamiento debido a periodos de cosecha y de recepción de cultivos previo a su exportación o comercialización en el mercado nacional) (Lis-Gutiérrez *et-al.* 2012).

Después del presente apartado introductorio, el documento se organiza de la siguiente manera: la segunda sección explica la construcción del modelo propuesto; el tercer apartado presenta el cálculo de puntos de equilibrio y el análisis de estabilidad; la cuarta sección muestra las simulaciones del modelo; y la quinta sección expone las conclusiones generadas a partir de los hallazgos de esta investigación.

## CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DEL MERCADO ECONÓMICO DEL CAFÉ: INVERSIÓN CONSTANTE EN LA OFERTA

En esta sección se expondrán los elementos necesarios para comprender las características más relevantes sobre el mercado económico del café arábigo colombiano. Además, se formulará un modelo matemático que desde los sistemas dinámicos permita abstraer características de la realidad del mercado económico del café en Colombia. El modelo estará formado por tres ecuaciones diferenciales correspondientes a las variables de oferta, demanda y *stock*. Posteriormente, se considerará una ecuación para la variable ventas, la cual se encuentra implícita en la ecuación de *stock*. Una vez formulado el modelo, se realizarán los cálculos correspondientes a los puntos de equilibrio y el análisis de su estabilidad. Finalmente, se estudiarán los retratos de fase del sistema.

Teniendo en cuenta que Osorio, Aramburo y Morales (2011) sostienen que es relevante considerar que la construcción del modelo y su interpretación se encuentran influenciados por la relación de las variables del mismo, el sistema construido para esta investigación se basa en experiencias anteriores para modelar diferentes mercados económicos. Adicionalmente, como base del modelo presentado, se considerará el modelo propuesto por (Valencia Calvo, *et-al.*, 2016), el cual fue aplicado al sector eléctrico colombiano.

### Consideraciones generales sobre el modelo

Las variables consideradas en este trabajo corresponden a políticas actuales del mercado económico del café colombiano comercializado como *commodity*. A continuación, se mencionan algunas consideraciones para el modelamiento propuesto:

- El modelo considera tres variables de estado: la oferta, la demanda y el *stock*.

- El modelo considera únicamente el café verde colombiano comercializado como *commodity*.
- Como hipótesis de formulación del modelo, se consideró la variación del precio como constante, es decir, no se considerará el precio como variable de estado del modelo aquí descrito.
- La estimación de los parámetros necesarios para el modelo (tasas de exportación, importación y ventas) son tomados de datos históricos reportados por entidades oficiales de información del café tales como la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) y la Organización Internacional del Café (OIC).

## Caracterización de las variables del modelo

### La oferta de café de Colombia

En el mercado económico del café de Colombia, la oferta es definida como el total de la producción de un año cafetero específico (ICO, 2011). Por su parte, la oferta exportable corresponde a la oferta total descontando el consumo nacional y las existencias, las cuales son necesarias para mantener el flujo de exportaciones, considerando que 80 % del café producido en Colombia tiene como destino los mercados de exportación. Adicionalmente, con el fin de abastecer la demanda interna, es importante señalar que dentro del inventario se tienen en cuenta las existencias de años anteriores (o cosechas no vendidas) y las importaciones (Domínguez, 2013).

### Demanda del mercado del café

En Colombia, la demanda del mercado del café se ve influenciada por dos grandes factores: el mercado internacional, y la demanda interna para su consumo doméstico. Dicha demanda incluye la compra de café verde a otros países productores para abastecer el consumo interno, el cual ha mantenido una tendencia creciente en los últimos años (Uu & Nam, 2017).

### El *stock* de café

En cuanto a las existencias de café, la OIC hace una diferencia entre existencias retenidas en países importadores (comúnmente denominadas inventarios) y las existencias retenidas en países producto-

res (conocidas simplemente como existencias o *stock*) (ICO, 2011).

Según (Lis-Gutiérrez et al. 2012), con base en reportes de la OIC, las existencias totales a escala global pasaron de representar 31,58 % en 2005/06 a 17,03 % en 2009/10, cuya mayor parte correspondió a las existencias de arábica con respecto a la producción de esta misma variedad (37,62 % y 21 %, en 2005/06 y 2009/10, respectivamente). Además, estos autores indican que la tendencia decreciente de las existencias puede ser resultado del incremento en el precio internacional antes de 2012; hecho que incentivó las exportaciones, al igual que el consumo interno de los países productores, el cual incrementó 3,6 %.

## Modelo matemático: ecuaciones del modelo

### Ecuación de la oferta

Según la (FNC, 2014), el parque cafetero llegó en 2015 a 941.000 hectáreas conformadas por 4.835 millones de árboles plantados, alcanzando una densidad de siembra de 5.484 árboles por hectárea y una edad promedio de 7,1 años. Actualmente, el 97 % de las plantaciones son tecnificadas, el 83 % están en etapa joven y 85 % se encuentra en edad productiva (más de 2 años). Además, 71 % se encuentran sembradas con variedades resistentes a la roya.

A continuación, se expone la ecuación para la oferta del café arábigo colombiano comercializado como *commodity*. Este análisis se lleva a cabo desde dos perspectivas: la producción generada por la capacidad e infraestructura interna y las importaciones de café crudo para comercialización interna. La ecuación de oferta se muestra a continuación:

$$\dot{x}_1 = -rx_1 + \frac{c}{x_1}, \quad x_1 \neq 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde,  $r \in \mathbb{R}^+$  corresponde a la tasa de descenso de la producción,  $x_1 \in \mathbb{R}^+$  representa la oferta y  $c \in \mathbb{R}^+$  la tasa de café importado. En esta ecuación la tendencia se considera en descenso a una tasa constante, denominada  $r$ , pues ante una afectación fuerte por alguna enfermedad sobre los cultivos estos tenderían a desaparecer

La ecuación de la oferta tiene en cuenta dos componentes. El primero está relacionado con la producción

generada con la capacidad instalada interna. Este factor es atribuido a las zonas de cultivo de café arábigo dentro del terreno colombiano y es influenciado en el tiempo por diferentes factores, tales como la broca, la roya y la edad de las siembras, variables que afectan los cultivos y, por ende, la capacidad de producción que finalmente conforma la oferta de café colombiano. Por otra parte, el segundo componente que define la oferta es la tasa de importaciones de café verde comprado a otros países productores para satisfacer la demanda interna, lo cual resulta de gran relevancia, considerando que, aunque Colombia es un país productor, durante la última década las tasas de importación de este producto se han ubicado por encima del 80 % del café consumido a nivel nacional, de acuerdo con informes de medios nacionales (Domínguez, 2013).

### Inversión en la oferta

Por su parte, la oferta es analizada desde dos componentes: la capacidad instalada interna de producción y el café importado para consumo interno. Como tercer elemento, se incorpora a la ecuación de oferta un término lineal correspondiente a la inversión, ya sea realizada por entes gubernamentales o no, lo cual permite mejorar la capacidad de producción.

La ecuación para la inversión de la oferta se muestra a continuación:

$$\dot{x}_1 = -rx_1 + \frac{c}{x_1} + \lambda Y \quad (\text{Ec. 2})$$

donde,  $\lambda \in \mathbb{R}^+$  corresponde al factor de conversión para la inversión en la oferta y a la inversión en infraestructura interna para la producción de café.

### Ecuación de la demanda

La ecuación de la demanda se construye a partir de dos panoramas: el nacional, constituido por políticas de consumo local, y el internacional, caracterizado por las políticas de exportación del café arábigo colombiano a diferentes clientes. La ecuación de demanda se muestra a continuación:

$$\dot{x}_2 = ax_2 \left(1 - \frac{x_2}{w_1}\right) + bx_2 \left(1 - \frac{x_2}{w_2}\right), \quad w_1, w_2 \neq 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

donde  $x_2 \in \mathbb{R}^+$  corresponde a la demanda,  $a \in \mathbb{R}^+$  es la tasa de consumo interno,  $b \in \mathbb{R}^+$  es la tasa de producción de café para exportación,  $w_1 \in \mathbb{R}^+$  es la capacidad máxima de demanda nacional (demanda interna) y  $w_2 \in \mathbb{R}^+$  la capacidad máxima de demanda internacional (demanda externa).

El primer término del miembro derecho corresponde a la demanda nacional de café verde que se comercializará para el consumo doméstico de Colombia, el cual llegó a 1,7 millones de sacos en 2015, con un incremento cercano a 4 % frente a 2014 (FNC, 2014). Este incremento se explica por un aumento en el segmento de los consumidores jóvenes y una mayor frecuencia de consumo diario tanto dentro como fuera del hogar. El segundo término corresponde a la demanda internacional, cuyos principales destinos son Estados Unidos (41,7 %), seguido de Europa (32,4 %) y Japón (10,5 %); este último es considerado el principal cliente para los cafés especiales (FNC, 2014). Adicionalmente, resulta pertinente mencionar que la demanda internacional de café representa más del 80 % de la producción nacional y que esta mantiene una baja tasa de cambio (parámetro  $b$ ), pues generalmente la demanda variable está concentrada en el mercado local y la tasa de cambio de la demanda para consumo interno es mayor con respecto a la producción (parámetro  $a$ ).

Con el fin de simplificar la ecuación para la demanda, se tiene que la capacidad de demanda máxima  $w$  es en total la demanda interna y la externa. Sin embargo, esta última es prácticamente su totalidad, por lo cual la demanda máxima del modelo se puede aproximar a la demanda externa. Así, la ecuación simplificada de la demanda obtenida es:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= (a + b)x_2 \left(1 - \frac{x_2}{w}\right), \quad w \neq 0 \\ \text{Si } \rho &= a + b \\ \dot{x}_2 &= \rho x_2 \left(1 - \frac{x_2}{w}\right), \quad w \neq 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde  $x_2 \in \mathbb{R}^+$  representa la demanda,  $a \in \mathbb{R}^+$  la tasa de consumo interno,  $b \in \mathbb{R}^+$  la tasa de producción de café para exportación y  $w \in \mathbb{R}^+$  la capacidad máxima de la demanda.



### Ecuación del stock

Es importante resaltar que la variación de la producción total se ve afectada por las ventas como puede evidenciarse en la siguiente fórmula:

$$\underbrace{\dot{x}_3 + \dot{x}_1}_{\text{Variación de la producción total}} = \underbrace{-Lx_4}_{\text{ventas}}$$

De esta manera, es posible generar la siguiente ecuación:

$$\dot{x}_3 = -\dot{x}_1 - Lx_4 \quad (\text{Ec. 5})$$

donde,  $x_3 \in \mathbb{R}$  corresponde a la variable *stock*,  $x_1 \in \mathbb{R}^+$  a la oferta,  $L \in \mathbb{R}^+$  a la tasa de ventas y  $x_4 \in \mathbb{R}^+$  a las ventas.

### La comercialización del café verde: las ventas

En el proceso de comercialización del café intervienen diferentes agentes del mercado, quienes ocupan un papel importante dentro de la cadena de valor de este producto. La FNC y el estudio de (Lis-Gutiérrez *et al.* 2012), particularmente, mencionan que los principales agentes del mercado son:

- *Caficultores*. La FNC considera a un caficultor como el propietario o poseedor de un predio que cumpla con las siguientes condiciones: i) poseer un área sembrada igual o superior a media hectárea; y que el área señalada cuente con al menos 1.500 árboles plantados (Lis-Gutiérrez *et-al.*, 2012).
- *Exportadores*. Dentro del mercado del café colombiano, se consideran exportadores a todas aquellas firmas que se encargan de la actividad de comercialización extranjera del café verde, el café procesado o cafés especiales producidos en Colombia.
- *Empresas torrefactoras*. En el mercado del café colombiano, las empresas torrefactoras son aquellas encargadas de los procesos de adecuación de los granos, descascarillado, tostión y molido del café.

(Lis-Gutiérrez *et-al.*, 2012), con base en cifras de la OIC (2011) y la FNC (2011), mencionan que en 2012 existía un total de 96 firmas exportadoras, las cuales se localizaban en el 42,4 % de los departamentos (14 de los 33), con un mayor presencia en la ciudad de Bogotá y el departamento de Caldas. La mayoría de dichas fir-

mas exportan café verde (84 de las 96), 50 exportan café tostado y 13 café soluble.

En el año cafetero 2016-17 la producción cafetera colombiana permaneció constante en 14,2 millones de sacos anuales. Este comportamiento también lo mantuvo el nivel de consumo interno, el cual estuvo en un valor de 1,7 millones de sacos. Finalmente, se observó un leve aumento en el nivel de importaciones para consumo interno, el cual pasó de 0,3 millones de sacos en 2016 a 0,4 millones en 2017, cifra que no se daba desde el 2014, lo cual evidenció un aumento en el nivel de exportaciones para el 2017 hacia los 13 millones de sacos anuales FNC (2017).

### La ecuación de ventas

La ecuación que modela el comportamiento de las ventas de café se construye a partir del análisis de dos escenarios.

En el primero, el mercado del café tiene una baja demanda (variable  $x_2$ ) y tanto la oferta (variable  $x_1$ ) como el *stock* (variable  $x_3$ ) superan con exceso la demanda del momento. Esta situación ( $x_2 < x_1 + x_3$ ) se caracteriza por una disponibilidad de existencias para ser agotadas y una alta producción con respecto a la demanda, la cual controla las ventas. Además, se señala que el precio de venta es denominado normal (parámetro  $P_n$ ), pues deben bajar los precios de venta para que se dé la comercialización para así agotar las existencias de inventario y posteriormente la producción.

En el segundo, la demanda es alta y la oferta y el *stock* no alcanzan a satisfacer la demanda de café del momento. Esta situación ( $x_2 > x_1 + x_3$ ) se caracteriza por una demanda alta, por lo tanto, el *stock* y la oferta no alcanzan a satisfacerla, ya que éstas últimas definen el proceso de ventas que corresponden a la capacidad de responder la demanda. Así mismo, el precio de venta es denominado alto (parámetro  $P_h$ ), pues el proceso de venta se realiza con el mejor postor, aprovechando la situación de escasez del producto.

Con base a los escenarios mostrados, se obtiene la siguiente ecuación:

$$x_4 = \begin{cases} p_n x_2 & \text{si } x_2 < x_1 + x_3 \\ p_h (x_1 + x_3) & \text{si } x_2 > x_1 + x_3 \end{cases} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde  $p_n \in \mathbb{R}^+$  es el precio normal de venta,  $p_h \in \mathbb{R}^+$  el precio alto de venta,  $x_1 \in \mathbb{R}^+$  la oferta,  $x_2 \in \mathbb{R}^+$  representa la demanda,  $x_3 \in \mathbb{R}$  el *stock* y  $x_4 \in \mathbb{R}$  las ventas.

### Modelo matemático condensado

La tabla 1 presenta el modelo matemático condensado del mercado del café de Colombia para las variables de estado: oferta, demanda y *stock*.

Ecuación de oferta	$\dot{x}_1 = -rx_1 + \frac{c}{x_1}$ <i>con</i> $x_1 \neq 0$
Ecuación de demanda	$\dot{x}_2 = ax_2 \left(1 - \frac{x_2}{w_1}\right) + bx_2 \left(1 - \frac{x_2}{w_2}\right)$ <i>con</i> $w_1, w_2 \neq 0$
Ecuación simplificada de la demanda	$\dot{x}_2 = (a + b)x_2 \left(1 - \frac{x_2}{w}\right)$ <i>con</i> $w \neq 0$
Ecuación del <i>stock</i>	$\dot{x}_3 = -\dot{x}_1 - Lx_4$
Ecuación de ventas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si <math>x_2 &lt; x_1 + x_3</math> <math>x_4 = p_n x_2</math></li> <li>- Si <math>x_2 &gt; x_1 + x_3</math> <math>x_4 = P_h(x_1 + x_3)</math></li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

### Parámetros utilizados en el modelo

En la tabla 2 se presenta el listado de parámetros utilizados en la formulación del modelo, las descripciones, valor y unidad de cada uno, los cuales son punto de referencia para todos los análisis realizados en las secciones posteriores.

Es necesario tener presente que los parámetros son determinados a partir de datos históricos reportados por organismos oficiales del sector cafetero, tales como la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) y la Organización Internacional del Café (OIC). En la tabla 2 vemos una explicación más detallada sobre la obtención de estos parámetros.

### CÁLCULO DE PUNTOS DE EQUILIBRIO

En esta sección se muestran los cálculos de puntos de equilibrio del modelo propuesto en este artículo únicamente para la región

Tomando en cuenta el modelo,

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -rx_1 + \frac{c}{x_1} + \lambda Y \\ \dot{x}_2 = (a + b)x_2 \left(1 - \frac{x_2}{w}\right) \\ \dot{x}_3 = -\dot{x}_1 - Lx_4 \end{cases} \quad (\text{Ec. 7})$$

junto con

$$x_4 = \begin{cases} p_n x_2 & \text{si } x_2 < x_1 + x_3 \\ p_h(x_1 + x_3) & \text{si } x_2 > x_1 + x_3 \end{cases}$$

(Ec. 8)

**Tabla 2.** Parámetros del modelo del mercado del café de Colombia para las variables de estado: oferta, demanda y stock

Parámetro	Definición	Símbolo	Valor estimado	Unidad
Tasa de descenso de la producción	Caída de la producción debido a factores ajenos a la capacidad instalada.	$r$	0,2962	Millones de sacos de 60 kg/millones de sacos de 60 kg (adimensional)
Tasa de consumo interno	Expresa la cantidad de la demanda de café que se vende en el interior del país.	$a$	2,2559	Millones de sacos de 60 kg/millones de sacos de 60 kg (adimensional)
Tasa de producción de café para exportación	Expresa la cantidad de café demandada a nivel internacional.	$b$	0,0304	Millones de sacos de 60 kg/millones de sacos de 60 kg (adimensional)
Tasa de café importado	Expresa la cantidad de café que llega al país para consumo interno (importación).	$c$	0,116	Millones de sacos de 60 kg/millones de sacos de 60 kg (adimensional)
Tasa de ventas	Crecimiento o decrecimiento de las ventas de café por cualquier fuente (mercado externo o interno).	$L$	0,002546	Millones de sacos de 60 kg/millones de sacos de 60 kg (adimensional)
Factor de conversión para inversión en la oferta	Conversión para la inversión en la oferta	$\lambda$	0,00252	Millones de sacos de 60 kg/millones de dólares
Inversión en infraestructura interna para la producción de café	Inversión en capacidad instalada interna de producción.	$Y$	2.000	Millones de dólares
Precio normal	Precio normal para la función de ventas.	$p_n$	108.68	USD cent/lb
Precio alto	Precio alto para la función de ventas.	$p_h$	169.79	USD cent/lb
Capacidad máxima de demanda	Capacidad máxima de demanda para Colombia.	$w$	20	Millones de sacos de 60 kg

Fuente: elaboración propia

Para calcular los puntos de equilibrio se procede a resolver el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}
 0 &= -rx_1 + \frac{c}{x_1} + \lambda Y \\
 0 &= (a + b)x_2 \left(1 - \frac{x_2}{w}\right) \\
 0 &= -\dot{x}_1 - Lx_4
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 9}$$

Se debe observar que al estar representada la variable (ventas) como una función definida a tramos, los puntos de equilibrio a obtener estarían en dos regiones. En esta sección, solo se considerarán los puntos de equilibrio encontrados en la región, obteniendo así los siguientes puntos de equilibrio:

$$\begin{aligned}
 &(x_1^*, 0, -x_1^*) \\
 &(x_1^{**}, 0, -x_1^{**}) \\
 &(x_1^*, w, -x_1^*) \\
 &(x_1^{**}, w, -x_1^{**})
 \end{aligned}$$

donde,

$$x_1^* = \frac{-\lambda Y + \sqrt{\lambda^2 Y^2 - 4rc}}{-2r}$$

Y

$$x_1^{**} = \frac{\lambda Y + \sqrt{\lambda^2 Y^2 + 4rc}}{2r}$$

Además, al evaluar el valor de los parámetros se tiene:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= (-0.02, 0, 0.02) \\
 p_2 &= (17.03, 0, -17.03) \\
 p_3 &= (-0.02, 20, 0.02) \\
 p_4 &= (17.03, 20, -17.03)
 \end{aligned}$$

Al respecto, se debe tener en cuenta que, al estar los puntos de equilibrio en la región  $(x_2 > x_1 + x_3)$  y al considerar que en el equilibrio  $x_1 = x_3$ , los puntos de equilibrio  $P_1$  y  $P_2$  son virtuales, puesto que se encuentran en la superficie de conmutación (Colombo *et al.*, 2012; Escobar, 2013).

Los puntos de equilibrio  $P_1$  y  $P_3$  no pueden ser aplicados a la realidad de este mercado, pues la oferta no puede adquirir valores negativos; es decir, estos puntos de equilibrio son no admisibles (Bernardo *et al.*, 2007, 2008; Redondo-Ortegón, 2012).

### Determinación de la estabilidad de los puntos de equilibrio calculados

Considerando los puntos de equilibrio determinados en la sección anterior, se procede a determinar la estabilidad de los mismos, haciendo uso de la matriz jacobiana y de los teoremas de estabilidad expuestos en Bernardo *et al.* (2008) y Leine y Van-Campen (2006).

La matriz jacobiana del modelo expuesto en este artículo se representa como:

$$J(x_1, x_2, x_4) = \begin{pmatrix} -r - \frac{c}{x_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & (a+b) - 2\frac{(a+b)}{w}x_2 & 0 \\ r + \frac{c}{x_1^2} - p_h L & 0 & -Lp_h \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 10})$$

obteniendo los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -Lp_h \\ \lambda_2 &= -r - \frac{c}{x_1^2} \\ \lambda_3 &= (a+b) - x_2 \left( \frac{2(a+b)}{w} \right) \end{aligned}$$

Al evaluar los valores de los parámetros y determinar el signo de los valores propios se obtiene que  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son siempre negativos y que la estabilidad va a depender de  $\lambda_3$ :

- Para el punto de equilibrio se tiene: correspondiente a un punto de silla.
- Para el punto de equilibrio se tiene: correspondiente a un punto de equilibrio estable.

Al ser no admisibles, los puntos de equilibrio no son incluidos en el análisis de estabilidad.

## SIMULACIONES Y ANÁLISIS DEL MODELO OBTENIDO

A continuación, se muestran algunas simulaciones y análisis para el modelo obtenido. Las simulaciones fueron realizadas para el sistema de ecuaciones diferenciales expuesto en la tabla 1, mediante el programa MATLAB®. Para la solución de las ecuaciones diferenciales se utiliza la función ODE45 que ya está implementada en dicha herramienta (Tabares-Soto, 2016).

A partir de una condición inicial se grafica el comportamiento que presenta las diferentes variables de estado del problema. Para la variable oferta se generó la simulación sin tener en cuenta la inversión, incorporando posteriormente este parámetro en el modelo (figura 1).

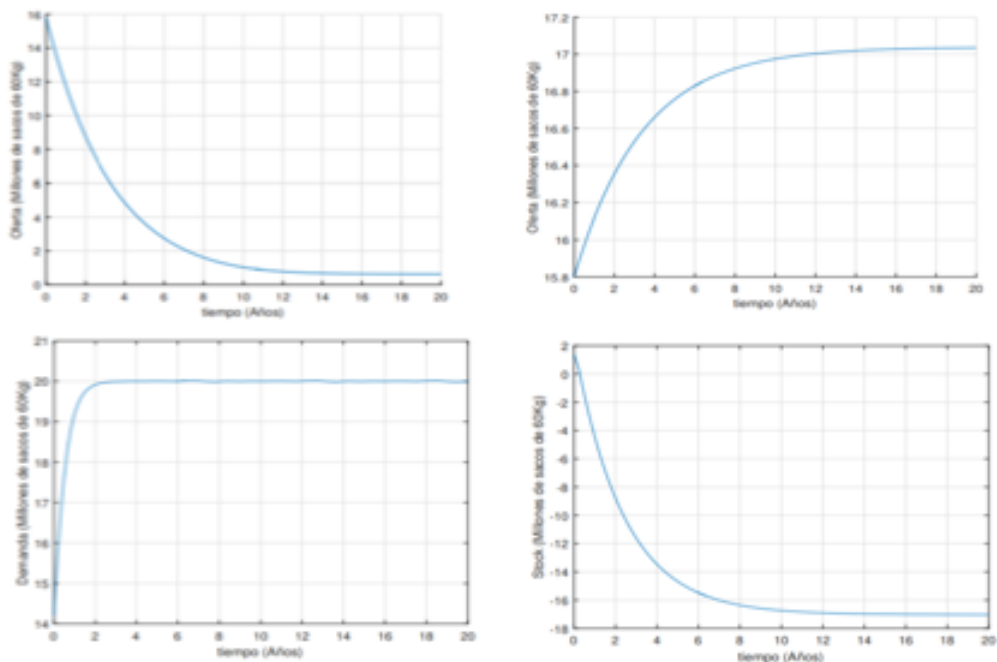
Considerando el desgaste de la oferta debido a factores como enfermedades de los cultivos y mantenimientos en la industria, entre otros, tanto el gremio cafetero como el Gobierno Nacional se ven en la necesidad de invertir para asegurar que la producción en este sector alcance los niveles esperados y así evitar que su comportamiento en el tiempo sea decreciente y presente tendencias a la desaparición.

Teniendo en cuenta que el mercado del café se caracteriza por su rápido dinamismo, las tasas de inversión en este sector se hacen cada vez más elevadas en la medida que la dinámica de comercialización se agiliza como resultado del desgaste de los cultivos, los equipos y la maquinaria. En general, la industria cafetera es cada vez mayor, por lo que las iniciativas de inversión que pretenden mejorar la oferta son un factor relevante para este sector.

En cuanto a la demanda, se puede observar un comportamiento creciente de tipo logístico. En la figura 1 se observa que la variable crece hasta su valor máximo, determinado por el parámetro  $w$ , el cual está constituido por la demanda nacional más la internacional, siendo esta última superior al 80 % del total (Uu & Nam, 2017).

Finalmente, la variable *stock* evidencia la disminución de los inventarios disponibles hasta ser agotados. Prontamente, se da la aparición de inventarios negativos, lo cual es ocasionado por el aumento de la demanda y las ventas efectivas. El inventario negativo representa las ventas que se darán debido a las mejoras en la capacidad instalada, lo que compromete ventas a futuro.

**Figura 1:** Simulaciones numéricas respecto del tiempo de las variables oferta sin inversión (superior izquierda), oferta con inversión (superior derecha), demanda (inferior izquierda) y stock (inferior derecha)



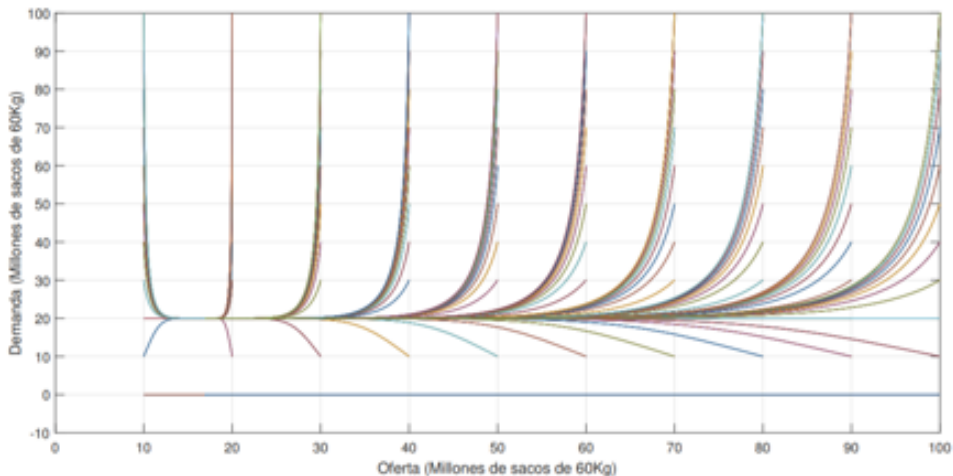
Fuente: elaboración propia.

### Retrato de fase para las variables oferta y demanda

Se muestra el retrato de fase para el modelo en cuanto a las variables de estado oferta y demanda, con el objetivo de interpretar el flujo que adoptan las diferentes trayectorias del sistema al partir de un conjunto ar-

bitrario de condiciones iniciales. En la figura 2 se presenta el retrato de fase para las variables oferta y demanda, en el cual se puede observar cómo, a partir de distintas condiciones iniciales, el flujo lleva al sistema a conseguir un punto de equilibrio de tipo estable aproximadamente en la coordenada (17, 20) correspondiente al punto de equilibrio obtenido para el modelo.

**Figura 2.** Retrato de fase de las variables oferta y demanda



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una revisión detallada de las principales variables que afectan el mercado económico del café colombiano, con el propósito de identificar las características más relevantes del mercado presentadas en el modelo tridimensional planteado para las variables oferta, demanda y *stock*.

Por medio de la solución del modelo, se mostraron diferentes análisis para cada una de las variables. Para la oferta ( $x_1$ ), se observó que la producción representa un componente con gran influencia sobre el mercado, ya que la capacidad instalada interna adquiere un comportamiento decreciente en el tiempo, lo que indica que en un tiempo finito la oferta tiende a desaparecer debido a cuestiones de mantenimiento y falta de inversión.

Posteriormente, se incorporó un término lineal correspondiente a una inversión constante con el objetivo de modificar el comportamiento de la oferta. Luego, se encontró que la demanda para el sector cafetero colombiano es gobernada por la demanda de carácter internacional y que permanece en aumento hasta su capacidad máxima, dada por el parámetro  $w$ , permitiendo proponer una ecuación diferencial de tipo logístico.

En este modelo se encuentra que para la región donde  $x_2 > x_1 + x_3$  el sistema presenta cuatro puntos de equilibrio, de los cuales dos ( $P_2$  y  $P_4$ ) son los únicos admisibles para el modelo, pues los puntos  $P_1$  y  $P_3$  se obtienen para una oferta con valor negativo, como se mencionó anteriormente.

En los puntos de equilibrio se obtiene uno de tipo silla cuando la demanda es 0, lo que explica que las trayectorias del sistema son salientes en dicho punto. Por otro lado, cuando la demanda toma el valor de la capacidad máxima de la misma, correspondiente a 20 millones de sacos de 60 kg, se obtiene un punto de equilibrio de tipo estable, comportamiento señalado en el retrato de fase (Guardia *et al.*, 2011).

## REFERENCIAS

- Arias, F. (29 de marzo de 2016). Venta de café mueve \$3,5 billones en Colombia. *El Colombiano*. Recuperado de <http://www.elcolombiano.com/negocios/cafe-consumo-sigue-en-aumento-en-colombia-XM3824624>
- Bernardo, M., Budd, C., Champneys, A. R., & Kowalczyk, P. (2008). *Piecewise-smooth Dynamical systems. Theory and Applications*. London: Springer-Verlag.
- Bernardo, M., Nordmark, A., Olivar, G., Kuznetsov, Y. A., Rinaldi, S., & Gragnani, A. (2007). Discontinuity-induced bifurcations of equilibria in piecewise-smooth and impacting dynamical systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 8, 18. doi: 10.1142/S0218127403007874
- Colombo, A., Bernardo, M., Hogan, S. J., & Jeffrey, M. R. (2012). Bifurcations of piecewise smooth flows: Perspectives, methodologies and open problems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 241(22), 1845-1860. doi: 10.1016/j.physd.2011.09.017
- Domínguez, J. C. (16 de abril de 2012). Reportan aumento de importaciones de café al país. *El Tiempo*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/DR-43675>.
- Domínguez, J. C. (18 de marzo de 2013). El 80% del café que bebemos es importado. *Portafolio*. Recuperado de <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/80-cafe-bebemos-importado-73622>.
- Escobar, C. M. (2013). *Contribución al estudio de los sistemas no suaves* (tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Federación Nacional de Cafeteros [FNC] (2004). *Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2004*. Bogotá: FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros [FNC] (2011). *Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2011*. Bogotá: FNC.
- Guardia, M., Seara, T. M., & Teixeira, M. A. (2011). Generic bifurcations of low codimension of planar Filippov Systems. *Journal of Differential Equations*, 250(4), 1967-2023. doi: 10.1016/j.jde.2010.11.016
- International Coffee Organization [ICO]. (2011). *Informe sobre el mercado de café 2011*. London: International Coffee Organization.
- Jiménez-Varón, C. F. (2018). *Dinámica no suave en un modelo de mercado del café de Colombia* (tesis

de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Leine, R. I., & van-Campen, D. H. (2006). Bifurcation phenomena in non-smooth dynamical systems. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 25(4), 595-616. doi: 10.1016/j.euromechsol.2006.04.004

Lis-Gutiérrez, J. P., Campo-Robledo, J. A., & Herrera-Saavedra, J. P. (2012). *Estudio sobre el sector del Café en Colombia* (número 5, diciembre). Superintendencia de Industria y Comercio.

Piedrahita-Arcila, I. (2011). Relaciones entre lo local y lo global en un contexto rural colombiano: el caso de Asprocafé Ingrumá. *Diálogos de derecho y política*, 2(7), 1-20.

Redondo-Ortegón, J. M. (2012). *Modelado de mercados de electricidad* (tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Tabares-Soto, R. (2016). *Programación paralela sobre arquitecturas heterogéneas* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Uu, E. E., & Nam, V. (2017). *Los precios del café llegan a la cifra más alta en cuatro meses , pero después bajan debido a que el mercado está bien abastecido* (agosto 2017). Londres: OIC.

Valencia-Calvo, J., Franco-Cardona, C. J., Olivartost, G., & Dynner-Rezonzew, I. (2016). Enfoque metodológico para el estudio y representación de comportamientos complejos en mercados de electricidad. *Ingeniería y Ciencia*, 12(24), 195-220. doi: 10.17230/ingciencia.12.24.9

# Propuesta de modelo en dinámica de sistemas para la toma de decisiones en la selección de proyectos verdes

## A Systems Dynamics Model for Decision-making in the Selection of Green Projects

**Julián Andrés Castrillón Gómez**

Ingeniero Electrónico, candidato a Doctor en Ingeniería  
Grupo de Investigación ABC Dynamics, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-1598-137X>  
[jacastrillong@unal.edu.co](mailto:jacastrillong@unal.edu.co)

**Johnny Valencia Calvo**

Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería y Doctor en Ingeniería (Ciencias de la Computación y de la Decisión)  
de la Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-1821-2039>  
[jvalencia@udem.edu.co](mailto:jvalencia@udem.edu.co)

Fecha de recepción: 1 de noviembre del 2018

Fecha de aceptación: 19 de noviembre del 2018

**Sugerencia de citación:** Castrillón Gómez, J. A., y Valencia Calvo, J. (2018).

Propuesta de modelo en dinámica de sistemas para la toma de decisiones en la selección de proyectos verdes.

*Mutis*, 8(2), 84-94 doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1407>

## RESUMEN

La época de posconflicto que vive Colombia, luego de la firma de los acuerdos de paz entre el gobierno y los grupos armados, ha causado un creciente interés por las necesidades sociales, ambientales y económicas de las comunidades afectadas por el conflicto armado, conocidas en la actualidad como “sujetos de reparación colectiva”. Este interés se refleja en las continuas convocatorias del Gobierno Nacional y las gobernaciones locales, dirigidas a empresas y a la comunidad científica, que buscan contribuir a los retos regionales en materia de medio ambiente, biodiversidad y construcción de paz para estas comunidades. Ante el nuevo panorama, se requiere que los procesos de selección de las propuestas y la toma de decisiones se transformen, para que, además de elegir el mejor proyecto, se involucre a la comunidad de forma activa durante el proceso de convocatoria y se causen en ella beneficios relacionados con el aprendizaje social y la apropiación del conocimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente artículo propone la creación de una metodología que involucre diferentes métodos científicos que permitan la participación de la comunidad y el conocimiento de la dinámica social, ambiental y económica, a fin de que el proceso de toma de decisiones en las convocatorias o procesos de



selección de proyectos verdes se realice con base en el análisis de la información extraída de la misma comunidad. Como técnicas para el desarrollo de la nueva metodología de evaluación y priorización de proyectos verdes, se propone la integración del modelado en sistemas dinámicos, el modelado participativo y el proceso analítico de redes (ANP) para la toma de decisiones. Con los hallazgos de la presente investigación se espera contribuir desde el campo científico al desarrollo de un modelo sostenible y participativo que pueda ser aplicado a la toma de decisiones, así como facilitar la toma de decisiones en los procesos de selección de proyectos verdes que se realizan en el marco del posconflicto en Colombia, desde un enfoque práctico.

**Palabras clave:** proyectos verdes, evaluación y priorización, participación de la comunidad, toma de decisiones, posconflicto.

## ABSTRACT

Post-conflict era in Colombia after the enactment of the peace agreements between the government and armed groups has caused a growing interest in the social, environmental and economic needs of the communities affected by armed conflict, today known as “collective reparation subjects”. This interest is perceived through the continuous calls by national and local governments to companies and the scientific community, which seek to contribute to the regional challenges in terms of environmental conservation, biodiversity, and peacebuilding within these communities. Considering this new scenario, selection and decision-making processes on this issues need to be transformed, so that, in addition to selecting the best projects, communities are actively involved, thus generating benefits related to social learning and knowledge appropriation.

Therefore, the aim of this research is to propose a methodology that involves different scientific methods for enabling community participation and knowledge construction on social, environmental and economic dynamics, in order to incorporate the analysis of information directly obtained from communities in decision-making processes for the selection of green projects. For the development of the proposed methodology for green projects assessment and prioritization, we suggest the integration of dynamic systems modeling, participatory modeling and the analytical network process (ANP). With our results we expect to contribute from a scientific perspective to the development of a sustainable and participatory model that can be applied in decision-making processes. In addition, from a practical approach, we expect this work facilitates decision-making in the selection processes of green projects taking place in post-conflict areas in Colombia.

**Keywords:** Green projects, evaluation and ranking, community participation, decision-making, post-conflict.

## INTRODUCCIÓN

Ante la nueva realidad que atraviesa Colombia tras la firma del acuerdo de paz con la guerrilla de las FARC y la búsqueda de acuerdos con otros grupos armados, surge un gran interés por el medio ambiente y su conservación. Dicho interés se presenta en especial en las zonas más afectadas por el conflicto armado las cuales han sido identificadas como sujetos de reparación colectiva en el proceso de posconflicto (Unidad Para las Víctimas, 2016). Este nuevo panorama exige que las convocatorias encargadas de evaluar y priorizar los proyectos o iniciativas verdes se transformen, no solo para seleccionar aquel con las mejores calificaciones, sino para que, a través del

proceso de selección y toma de decisiones, se logre involucrar a la comunidad afectada, permitiendo la generación de bienestar y aprendizaje social y contribuyendo a la generación de políticas sociales y ambientales que ayuden a llenar vacíos existentes.

En el presente artículo se propone la creación de una metodología que facilite la toma de decisiones en las convocatorias (procesos de selección) de proyectos verdes, mediante el empleo de métodos científicos que, primero, permitan la participación de la comunidad en el proceso, segundo, generen aprendizaje y bienestar social y, tercero, permitan a los expertos evaluadores un proceso de toma de

decisiones informado a través del conocimiento de la dinámica social, económica y ambiental de la región.

El artículo inicia con la presentación de algunos antecedentes y razones dentro del contexto colombiano por las que debería considerarse un cambio en la toma de decisiones para la selección de proyectos verdes. La siguiente sección presenta la revisión de literatura relevante y la definición de las bases teóricas sobre las que se fundamenta la propuesta. Posteriormente, se da a conocer el modelo propuesto en dinámica de sistemas y, a manera de ejemplo, se analizan algunos de sus flujos. La parte final del documento desarrolla la discusión de los hallazgos y presenta las conclusiones del estudio.

## LA IMPORTANCIA DE LA TOMA DE DECISIONES EN LA SELECCIÓN DE PROYECTOS VERDES

El asunto considerado en el presente artículo nace de la revisión efectuada a diferentes procesos de selección que se realizan en Colombia con el fin de evaluar y priorizar proyectos verdes. Como resultado de esta investigación, se encuentran varios factores que han hecho que cada vez sea más frecuente la oposición de la comunidad a estos proyectos, entre los cuales se encuentran, en primer lugar, factores asociados a la escasa participación de la comunidad y el desconocimiento de la dinámica ambiental, social y económica de la región; y en segundo lugar, factores asociados a la unificación del modelo con que se evalúan los proyectos, siendo este igual para todo tipo de proyectos y comunidades, omitiendo la forma como se ve afectada determinada comunidad por el desarrollo de proyectos que pudieren no ser de su completo interés o que no cumplen con sus expectativas.

Los procesos de selección de proyectos anteceden a la toma de decisiones por parte de los entes gubernamentales, por lo que es crucial contar con una metodología clara que responda a las necesidades sociales, económicas y ambientales de todas las partes interesadas, tales como el gobierno, la comunidad y las demás instituciones financiadoras, además de aquellas organizaciones que promueven la protección del medio ambiente.

Por lo anterior, el presente artículo se centra específicamente en la evaluación técnico-científica de los proyectos, mas no en el cumplimiento de aspectos financieros, administrativos y legales, por ejemplo, requeridos para la participación en el proceso de selección.

### Consideraciones

Gracias a los acuerdos de paz logrados en Colombia en los últimos años, el interés por el medio ambiente por parte del gobierno, organizaciones privadas y otras no gubernamentales ha crecido a tal punto que pueden observarse diferentes convocatorias que buscan financiar o patrocinar los mejores proyectos verdes. Algunas de estas convocatorias corresponden a iniciativas de gobiernos departamentales y municipales, mientras que otras se realizan con el apoyo de instituciones extranjeras como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), siendo canalizadas a través del Gobierno Nacional por medio de Colciencias, entidad encargada de llevar a cabo los procesos de selección, en la mayoría de los casos.

Dada la extensión de los procesos de selección y el interés propio de esta investigación, se ha delimitado el problema a los siguientes aspectos:

**Evaluación de proyectos:** el presente artículo se centra en el estudio de los métodos científicos que pueden ser aplicados a los procesos de selección (convocatorias) de proyectos verdes en Colombia, de manera que se complemente la evaluación técnica (científica) y se facilite el proceso de toma de decisiones (priorización).

**Social:** esta investigación estará enfocada en los proyectos verdes dirigidos especialmente a las comunidades categorizadas como sujeto de reparación colectiva en el posconflicto y que además padecen condiciones de pobreza extrema y problemas de salud pública, entre otros, pero que a su vez son de gran interés para las instituciones privadas, ONG y el Gobierno Nacional debido a su alto potencial ambiental y económico para el desarrollo del país (Defensoría del Pueblo, 2014).

**Ambiental:** para este proyecto se tendrá en cuenta, específicamente, aquellas convocatorias y proyectos relacionados con el uso del agua y el uso del suelo,



dos de los problemas actuales que afectan con mayor frecuencia algunas comunidades de Colombia, y que causan mayor preocupación debido a sus efectos sobre la población y la economía de las regiones (Defensoría del Pueblo, 2014; El Tiempo, 2015; UNESCO & Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2006).

## **Estrategias (causas y consecuencias)**

### **Causas**

Para determinar las causas del problema se consultaron los términos de referencia de diferentes convocatorias de proyectos verdes realizadas por instituciones como Colciencias, el Gobierno Nacional (programa Ideas para el cambio), la Gobernación de Boyacá (programa Boyacá BIO, en unión con Colciencias y el Instituto Humboldt), y el Municipio de Medellín (convocatoria iniciativas empresariales sostenibles 2018. Programa emprendimiento sostenible metropolitano).

Para el objeto de esta investigación, se consultaron los términos de referencia relacionados únicamente con los criterios de evaluación técnica (científica) de los proyectos. Adicionalmente, se consultó la sección de convocatorias en la página web de Colciencias, haciendo revisión de aquellas cuyo objetivo fuera la selección de proyectos verdes para superar retos ambientales.

De la revisión efectuada de estos procesos de selección puede concluirse que el objetivo principal de estas convocatorias está enfocado al cumplimiento de los objetivos del milenio (IPCC, 2013; PNUD, 2016a, 2016b, 2016c) y de la Agenda 2030 (García-Arbeláez, Vallejo-López, Higgins, & Escobar, 2016), dados por la ONU en 2016. Igualmente, estas iniciativas buscan dar cumplimiento a las necesidades planteadas en los planes de desarrollo nacional y local, los cuales, a su vez, deben estar en línea con los objetivos de las instituciones internacionales y los gobiernos extranjeros que brindan apoyo a Colombia.

Si bien es claro que estas convocatorias surgieron a raíz de la identificación de necesidades en comunidades consideradas como sujetos de reparación colectiva en el posconflicto, no se logra aún identificar manifiestamente en los procesos de selección de proyectos verdes el uso de métodos

científicos sobre los cuales se pueda, primero, determinar las necesidades de las comunidades con la participación activa de la misma, segundo, brindar información a los expertos y tomadores de decisiones acerca de la dinámica social, ambiental y económica de la región, favoreciendo una toma de decisiones acertada, y, tercero, un método científico que permita la evaluación de criterios cuantitativos y cualitativos donde sea posible reducir sesgos y aumentar el grado de objetividad en las decisiones.

### **Consecuencias**

Con relación a este aspecto, se resalta que, si bien las actuales convocatorias buscan generar beneficios a las comunidades, tales beneficios se postergan hasta la ejecución del proyecto. La metodología propuesta en esta investigación, por el contrario, sugiere que es posible generar beneficios a la comunidad relacionados con el aprendizaje social y la apropiación del conocimiento desde el inicio mismo del proceso de selección. Por otro lado, es de notar que aunque se reclama la participación de la comunidad esta se ve relegada a la etapa de ejecución, e incluso ocurre posterior a su culminación. En consecuencia, son desaprovechados los valores y los conocimientos de la comunidad en el proceso de evaluación y priorización, factores claves que pueden determinar el éxito del proyecto.

Por otra parte, es pertinente mencionar que falta contar con un método científico claro que apoye la evaluación y la toma de decisiones en los procesos de evaluación y selección de proyectos verdes. Estos métodos, muchos de los cuales han sido ya desarrollados y comprobados, facilitan en gran medida los procesos de evaluación y toma de decisiones (Antunes, Santos, & Videira, 2006). Así mismo, resultan de gran aplicación en ambientes complejos, como el caso colombiano, donde deben ser consideradas múltiples variables y criterios (Reed, 2008), además de factores sociales, ambientales y económicos que pueden afectar en mayor o menor proporción los resultados del proceso (Antunes *et al.*, 2006).

## **Razones para un cambio en la toma de decisiones**

A partir de lo anterior, se evidencia la necesidad de una nueva metodología que facilite la toma de

decisiones en los procesos de selección y priorización de proyectos verdes. Esta metodología debe contar con la participación activa de las comunidades que se verán afectadas, lo cual es pieza clave para garantizar el éxito del proyecto que resulte elegido. Al respecto, Voinov y Gaddis (2008) afirman que aquellos proyectos que no involucren valores ni conocimientos de los afectados, posiblemente terminarán en modelos incompletos, y tal vez a mediano o largo plazo en conflictos potenciales, incompreensión e incluso litigios.

El concepto de modelización científica adaptado (Korfmacher, 2001) permite que las diferentes opiniones, así como las experiencias vividas y el conocimiento de las características y otros factores claves de la zona, se conviertan en un valioso aporte para construir modelos participativos que alcancen la comprensión global de una problemática ambiental. Al mismo tiempo, se otorga a la comunidad un rol activo donde sea partícipe de la toma de decisiones, lo cual, en consecuencia, genera el apoyo de la comunidad al proyecto seleccionado, incrementando con ello sus probabilidades de éxito (Voinov & Gaddis, 2008).

De otro lado, Colombia es un país con muchos recursos en materia ambiental (García-Lozada, 2014). Sin embargo, el conflicto armado que ha sufrido durante décadas ha retrasado el progreso en este sentido. La nueva realidad de los acuerdos de paz con los grupos armados abre las puertas para que a través de los proyectos verdes, pueda llevarse el desarrollo a las regiones más afectadas por el conflicto, con el fin de satisfacer sus necesidades básicas y contribuir con una mejor calidad de vida para sus comunidades. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar e implementar una nueva metodología de evaluación y priorización de proyectos verdes, que no solo considere la dinámica social, ambiental y económica de la región, sino que además involucre variables cualitativas como los valores y los conocimientos de la comunidad, propendiendo por la generación de beneficios para los miembros de dicha comunidad a través de la consolidación de procesos de aprendizaje social y de apropiación del conocimiento (Johnson *et al.*, 2012).

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### Dinámica de sistemas y sistemas dinámicos

La dinámica de sistemas permite construir diferentes escenarios que posibilitan a un analista o experto tener una percepción organizada del mundo real y visualizar su dinámica. Igualmente, el uso de la dinámica de sistemas en ambientes complejos permite establecer las relaciones no lineales existentes entre los diferentes atributos considerados (económicos, ambientales y sociales). Lo anterior, facilita la modelización y la extensión a otras técnicas matemáticas como los sistemas dinámicos, admitiendo la correlación y el análisis de todas las variables (Ibarra-Vega & Redondo, 2015).

Por su parte, los sistemas dinámicos están basados en ecuaciones diferenciales ordinarias. El modelador convierte una hipótesis dinámica en una representación de acciones y flujos, entendiendo hipótesis dinámica como la conceptualización de las relaciones causales, bucles de retroalimentación, retrasos, reglas de decisión, entre otras. Las variables de estado están representadas en las existencias (acumuladores) y los flujos (tasa) son los procesos que influyen en el cambio y en los niveles de almacenamiento (Espinoza *et al.*, 2017; Sterman, 2000). Posteriormente, se utiliza un motor de simulación para ejecutar el modelo numérico y simular el cambio en los valores de acciones y flujos con respecto al tiempo (Ahmad & Simonovic, 2004).

### Modelado participativo

Las diferentes variantes de la técnica de modelado participativo, llámese modelado de grupo, modelado con interesados o modelado con *stakeholders*, se basan en el principio de involucrar en la producción científica el conocimiento empírico. De esta manera, a través del seguimiento de la diversidad de argumentos y opiniones, el modelado participativo introduce otras variables, por ejemplo, sociales o políticas, con el fin de obtener una mejor aproximación al sistema real analizado (Pahl-Wostl, 2002). De acuerdo con esto, el modelado participativo plantea un cambio de paradigma donde el dominio de los expertos se extiende para incluir el dominio de los interesados (Argent & Grayson, 2003; Duncan, 2017).

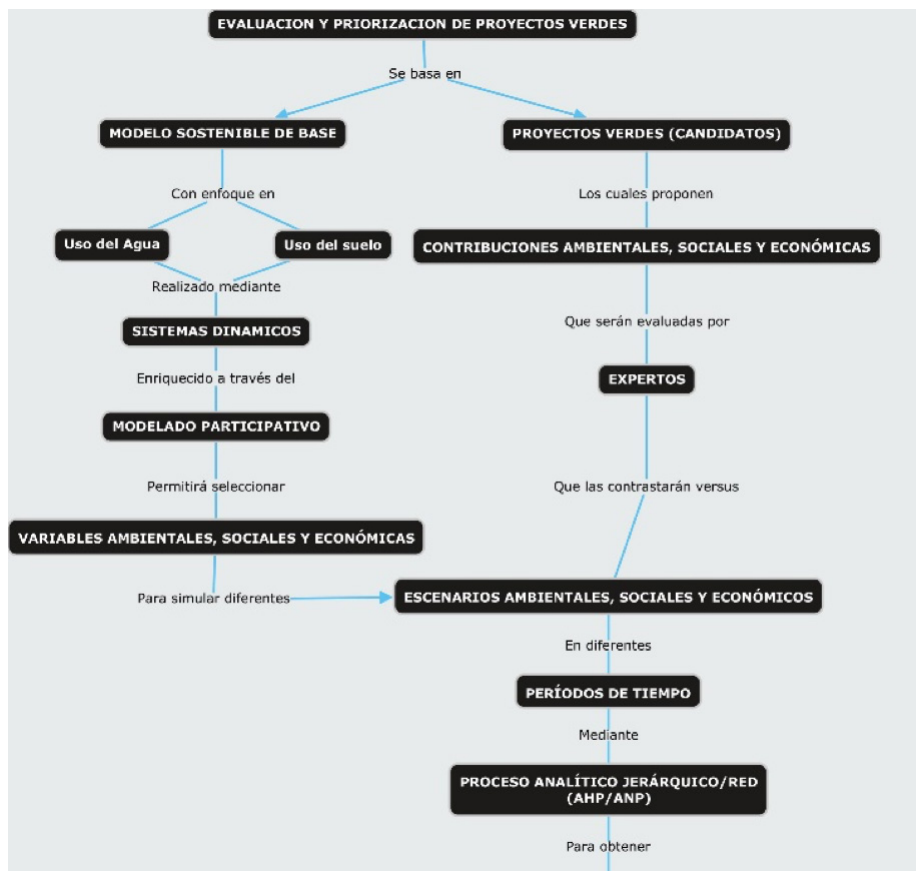
### Toma de decisiones multicriterio (MCDM)

El proceso de análisis multicriterio generalmente comprende las siguientes actividades: *i)* identificar tanto a los decisores finales como a los actores involucrados en el proceso de análisis de decisiones, así como a todas las partes interesadas; *ii)* realizar la selección de criterios; *iii)* definir las alternativas; *iv)* elegir una o varias tecnologías para el análisis multicriterio; *v)* ponderar los criterios; *vi)* evaluar el desempeño de las alternativas frente a los criterios; *vii)* transformar los valores de rendimiento de los criterios en unidades medibles; *viii)* aplicar la técnica o técnicas de análisis multicriterio seccionadas; *ix)* realizar el análisis de sensibilidad; y *x)* tomar la decisión final (Chung & Lee, 2009; Saaty & Vargas, 2006).

### SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución planteada en este trabajo parte de la siguiente hipótesis: una metodología que construya un modelo participativo sostenible permitirá a los expertos conocer la dinámica social, ambiental y económica de una comunidad y, con base en esto, tomar decisiones informadas para evaluar y priorizar las propuestas de proyectos verdes en el marco de los procesos de selección de iniciativas ambientales, realizados por el Gobierno Nacional y otras entidades, encaminadas a superar los retos sociales, ambientales, de biodiversidad y de construcción de paz que han sido identificados en las comunidades determinadas como sujetos de reparación colectiva del posconflicto en Colombia. Al mismo tiempo, este tipo de metodología generará aprendizaje y apropiación del conocimiento en la comunidad escogida. La solución propuesta a este respecto se detalla en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de la solución propuesta



En consecuencia, a partir de la hipótesis planteada será posible construir una nueva metodología para evaluar y priorizar proyectos verdes a través de la elaboración de un modelo sostenible participativo, que facilite la toma de decisiones informadas en los procesos de evaluación y selección de iniciativas verdes en Colombia. Esta nueva metodología debe considerar factores clave como los intereses y las necesidades sociales, ambientales, de biodiversidad y de construcción de paz de las comunidades y, a su vez, podrá convertirse en herramienta para el aprendizaje y la apropiación del conocimiento en la comunidad a quien va dirigida.

### **Modelo sostenible en dinámica de sistemas**

La primera etapa de la solución total tiene como objetivo específico crear un modelo sostenible a través del cual sea posible conocer la dinámica social, ambiental y económica de la comunidad. Para la construcción de dicho modelo, se tendrán en cuenta las comunidades que hayan sido declaradas como sujeto de reparación colectiva en el posconflicto. De acuerdo con el alcance definido para esta investigación, el modelo se enfocará principalmente en asuntos ambientales relacionados con el uso del agua y del suelo. Finalmente, para la creación del modelo, se propone el uso de la dinámica de sistemas a partir de un modelo de base seleccionado de la literatura (Davies & Simonovic, 2011).

### **Modelado Participativo**

La segunda etapa de la solución tiene como objetivo específico hacer del modelo sostenible construido anteriormente un modelo participativo. Para este propósito, se plantea utilizar las técnicas del modelado participativo (Argent & Grayson, 2003).

### **Toma de decisiones mediante los métodos de multicriterio (MCDM)**

La tercera etapa de la solución tiene como objetivo específico realizar la evaluación y priorización de los proyectos verdes que hayan sido presentados en un proceso de selección (convocatoria) para comunidades colombianas denominadas como sujetos de reparación. Para este propósito, los expertos tomarán como base para sus decisiones la información resultante del modelo construido en las etapas anteriores.

Adicionalmente, se empleará como método científico el análisis multicriterio para la toma de decisiones, por medio del cual se podrá registrar y tabular los juicios de los expertos. Específicamente, se utilizará el proceso analítico de redes (ANP) desarrollado en 1990 por Saaty (1990), al igual que la escala de evaluación propuesta en esta investigación. El uso de este método permitirá a los expertos evaluar los criterios definidos en el proceso de selección, conociendo de antemano la dinámica social, ambiental y económica de la comunidad y de forma implícita sus valores y saberes, los cuales habían sido considerados anteriormente con el modelado participativo.

### **Modelo en dinámica de sistemas**

La hipótesis dinámica planteada fue estructurada a partir del diseño de Davies y Simonovic (2011) y se presenta en la figura 2.

En el diseño elaborado se contemplan condiciones sociológicas, ambientales, económicas e institucionales, como se describe a continuación.

**Condiciones ambientales:** se identifican temas como el uso del agua y del suelo, la calidad y disponibilidad del agua, la huella ecológica y la estacionalidad climática.

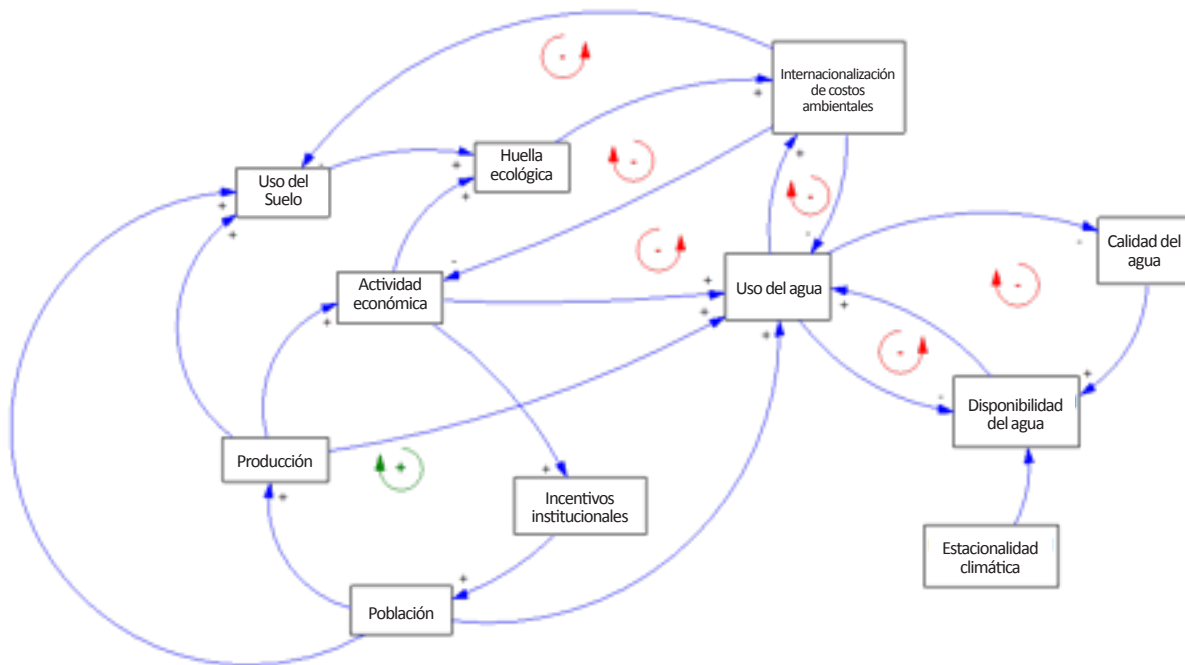
**Condiciones económicas:** en la hipótesis dinámica se considera la producción de la región en relación a sus actividades agrícolas, de minería y de turismo.

**Condiciones sociológicas:** se considera la dinámica poblacional, la situación actual de la educación, del empleo y de la salud, así como la afectación producida por los incentivos institucionales, los cuales se constituyen como factores clave del modelo.

**Condiciones institucionales:** la internalización de costos ambientales, las políticas de restricción existentes, la regulación institucional, los impuestos y las restricciones relacionadas con el uso del agua y del suelo.

La hipótesis dinámica planteada hace posible anotar que, por ejemplo, con respecto al uso del agua, esta se ve afectada por las componentes sociales y económicos así: a medida que crece la productividad, la actividad económica de la región es mayor, lo cual ocasiona que tanto la población como el uso del agua

Figura 2. Hipótesis dinámica



se incrementa de forma importante (ciclo de refuerzo). Por otro lado, a medida que incrementa la producción, también aumenta el uso del suelo y, por tanto, la huella ecológica generada; tal situación aumenta los costos ambientales (impuestos) que deben pagarse por la contaminación producida. Este último ciclo actúa como control al uso del agua, con el fin de mantener el equilibrio de manera que no se vea afectada la disponibilidad hídrica de la región.

De otro lado, se puede afirmar que los incentivos institucionales promueven la productividad en la región y contribuyen con el crecimiento poblacional. Sin embargo, los incentivos institucionales pueden verse no solo como estímulos económicos a la población, sino también como aplicación de políticas públicas. Por tal razón, el modelo podría considerarse como un laboratorio de nuevas políticas públicas para analizar sus efectos sobre los demás componentes (económico, social y ambiental).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los métodos multicriterio han sido ampliamente utilizados en los procesos de toma de decisiones desde su introducción en la década de 1980. Kulkarni *et al.* (2004) utilizan este método como alternativa del

análisis tradicional de costo-beneficio para priorizar y seleccionar proyectos de mejoramiento de autopistas. Autores como Meade y Presley (2002) muestran que través del método ANP propuesto por Saaty (1990) es posible seleccionar proyectos de investigación y desarrollo, logrando reconciliar los requerimientos de los diferentes interesados.

La propuesta contenida en este artículo está encaminada a lograr la sinergia de los métodos multicriterio y la dinámica de sistemas con las técnicas del modelado participativo sobre las que autores como Tabara y Pahl-Wostl 2007 entre otros, han mostrado ventajas en relación al aprendizaje social y la generación de políticas públicas. Así mismo, esta nueva metodología busca contribuir al desarrollo de un modelo que pueda ser aplicado a la toma de decisiones informadas en la selección de proyectos verdes.

Se espera que con el resultado de la presente investigación sea posible contribuir al diseño de una metodología para la evaluación y priorización de proyectos verdes, en la que sean integrados diferentes métodos científicos que involucren a la comunidad y, además, permitan conocer su dinámica social, ambiental y económica, con el objetivo de que el



proceso de toma de decisiones sea realizado con base en el análisis de esta información. Así mismo, con esta investigación se busca contribuir al desarrollo de un modelo sostenible y participativo que pueda aplicarse para la toma de decisiones.

En relación al proceso de diseño, desarrollo, validación y aplicación del modelo, esta investigación busca aportar en el campo de la modelización matemática a través del uso de los sistemas dinámicos.

Finalmente, con referencia al proceso de toma de decisiones, se busca aportar en el campo de los métodos multicriterio, llevando a cabo su aplicación en procesos o convocatorias para la selección de proyectos verdes.

En el campo práctico, esta investigación busca proporcionar a las instituciones del gobierno y otras entidades encargadas de realizar procesos de selección de proyectos verdes, una metodología basada en métodos científicos que pueda contribuir a la toma de decisiones informadas en Colombia.

De otro lado, esta investigación busca presentar cómo, desde los mismos procesos de selección de proyectos, es posible generar beneficios a las comunidades por medio del aprendizaje social y la apropiación del conocimiento. Por último, resulta pertinente exponer cómo pueden ser utilizados los modelos participativos para identificar vacíos legales en materia social, ambiental o económica, contribuyendo así a la generación de posibles políticas públicas que puedan subsanarlos.

## REFERENCIAS

- Ahmad, S., & Simonovic, S. P. (2004). Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), 331-340. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:4(331)
- Antunes, P., Santos, R., & Videira, N. (2006). Participatory decision making for sustainable development - The use of mediated modelling techniques. *Land Use Policy*, 23(1), 44-52. doi: 10.1016/j.landusepol.2004.08.014
- Argent, R. M., & Grayson, R. B. (2003). A modelling shell for participatory assessment and management of natural resources. *Environmental Modelling and Software*, 18(6), 541-551. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00029-X
- Chung, E.-S., & Lee, K. S. (2009). Identification of Spatial Ranking of Hydrological Vulnerability Using Multi-Criteria Decision Making Techniques: Case Study of Korea. *Water Resources Management*, 23(12), 2395-2416. doi: 10.1007/s11269-008-9387-9
- Davies, E. G. R., & Simonovic, S. P. (2011). Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. *Advances in Water Resources*, 34(6), 684-700. doi: 10.1016/j.advwatres.2011.02.010
- Defensoría del Pueblo. (2014). *Acciones para el impulso del derecho humano al agua en Colombia: Una mirada crítica al sector de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá: Defensoría del pueblo. Recuperado de <http://desarrollos.defensoria.gov.co/desarrollo1/ABCD/bases/marc/documentos/textos/Acciones para el impulso del derecho humanos al agua en Colombia.pdf>
- Duncan, R. (2017). Rescaling Knowledge and Governance and Enrolling the Future in New Zealand: A Co-Production Analysis of Canterbury's Water Management Reforms to Regulate Diffuse Pollution. *Society and Natural Resources*, 30(4), 436-452. doi: 10.1080/08941920.2016.1265187
- El Tiempo. (febrero, 2015). *Casi un tercio de la tierra en Colombia está mal utilizada*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/uso-de-la-tierra-en-colombia/16424314>
- Espinoza, A., Bautista, S., Narváez, P. C., Alfaro, M., & Camargo, M. (2017). Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1145-1163. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.168
- García-Arbeláez, C., Vallejo-López, G., Higgins, M. L., & Escobar, E. M. (2016). *El acuerdo de París, Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- García-Lozada, H. M. (2014). Alternativas para la gestión del agua en Colombia: La teoría de los sistemas socioecológicos. *El Arrendajo Escarlata*, 4-12. Recuperado de [http://publicaciones.minambiente.gov.co/revista/Documentos\\_revista/arrendajo\\_escarlata\\_01/arrendajo\\_01.html](http://publicaciones.minambiente.gov.co/revista/Documentos_revista/arrendajo_escarlata_01/arrendajo_01.html)
- Huang, C., Chu, P., & Chiang, Y. (2008). A fuzzy AHP application in government-sponsored R & D project selection. *Omega*, 36(6), 1038-1052. doi: 10.1016/j.omega.2006.05.003
- Ibarra-Vega, D. W., & Redondo, J. M. (2015). Dinámica De Sistemas, Una Herramienta Para La Educación Ambiental en Ingeniería. *Luna Azul*, 41, 152-164. doi: 10.1067/mge.2000.105733
- Johnson, K. A., Dana, G., Jordan, N. R., Draeger, K. J., Kapuscinski, A., Schmitt Olabisi, L. K., & Reich, P. B. (2012). Using participatory scenarios to stimulate social learning for collaborative sustainable development. *Ecology and Society*, 17(2), 9. doi: 10.5751/ES-04780-170209
- Korfmacher, K. S. (2001). The politics of participation in watershed modeling. *Environmental Management*, 27(2), 161-176. doi: 10.1007/s002670010141
- Kulkarni, R. B., Miller, D., Ingram, R. M., Wong, C.-W., & Lorenz, J. (2004). Need-Based Project Prioritization: Alternative to Cost-Benefit Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 130(April), 150-158. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:2(150)
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. En Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (eds.). *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Meade, L. A., & Presley, A. (2002). R&D project selection using ANP. *IEEE Potentials*, 21(2), 22-28.
- Pahl-Wostl, C. (2002). Participative and Stakeholder-Based Policy Design, Evaluation and Modeling Processes. *Integrated Assessment*, 3(1), 3-14. doi: 10.1076/iaij.3.1.3.7409
- Pahl-Wostl, C., & Hare, M. (2004). Processes of social learning in integrated resources management. *Journal of Community and Applied Social Psychology*, 14(3), 193-206. doi: 10.1002/casp.774
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2016a). *Apoyo del PNUD a la implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 15 Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres*. New York, USA: ONU
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2016b). *Apoyo del PNUD a la implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 Gestión sostenible del agua y el saneamiento*. New York, USA: ONU
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2016c). *Apoyo del PNUD a la implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 1 Reducción de la Pobreza*. New York, USA: ONU
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417-2431. doi: 10.1016/j.biocon.2008.07.014
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). The Analytic Network Process. *Decision Making with the Analytic Network Process*, 95(1), 1-27. doi: 10.1007/0-387-33987-6\_1
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Tàbara, J. D., & Pahl-wostl, C. (2007). Sustainability Learning in Natural Resource Use and Management. *Ecology and Society*, 12(2), 1-15.
- UNESCO & Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2006). *El Agua: una responsabilidad compartida*. Segundo informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los

recursos hídricos en el mundo. Recuperado de [www.unesco.org/water/wwap/index\\_es.shtml](http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml)

Unidad Para las Víctimas. (2016). *Reparación Colectiva*. Recuperado de <http://www.unidadvictimas.gov.co/es/reparación-colectiva/119>

Voinov, A., & Gaddis, E. J. B. (2008). Lessons for successful participatory watershed modeling: A perspective from modeling practitioners. *Ecological Modelling*, 216(2), 197-207. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.03.010

Xi, X., & Poh, K. L. (2014). A Novel Integrated Decision Support Tool for Sustainable Water Resources Management in Singapore: Synergies Between System Dynamics and Analytic Hierarchy Process. *Water Resources Management*, 29(4), 1329-1350. doi: 10.1007/s11269-014-0876-8

# MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

## Instrucciones para autores

### ENVÍOS DE ARTÍCULOS

La revista *Mutis* acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
2. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional, o educativo, entre otros.
3. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
4. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista *Mutis*, se deben enviar a través de nuestro sistema de gestión editorial <http://goo.gl/m6Q6FD> o vía correo electrónico a [revista.mutis@utadeo.edu.co](mailto:revista.mutis@utadeo.edu.co) (Asunto: artículo revista *Mutis*) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricas de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio doble. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

**Título.** El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en minúsculas, en negrilla y alineado a la izquierda, en idioma original y en inglés.

**Autores.** Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: universidad, facultad, programa, laboratorio o grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, correo electrónico del autor, número de registro en ORCID y Google Scholar. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,<sup>1</sup> Ariadna Hazel Vergel<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – (GENBIMOL), Carrera 4 n.º 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000. Correo electrónico: [arhazel@inivit.cu](mailto:arhazel@inivit.cu) <https://orcid.org/xxx>  
[https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=pTzo5RoA AAAJ&view\\_op=list\\_works](https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=pTzo5RoA AAAJ&view_op=list_works)

**Resumen.** Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

**Palabras clave.** Deben escogerse un máximo de 5 palabras claves. Palabras diferentes incluidas en el título.

**Abstract.** Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

**Keywords.** Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

**Introducción.** Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

**Materiales y métodos.** No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

**Resultados.** No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

**Discusión.** Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolos con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos, se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

**Conclusiones.** Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionadas con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

**Ecuaciones.** Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

**Cantidades y unidades.** Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar una coma para separar los miles y un punto para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

**Tablas.** Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra **Tabla** (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la tabla. Tanto el

encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

**Figuras.** Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en la parte inferior de la figura y debe incluir la palabra **Figura** (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi, de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicará por ningún motivo información de fotografías descargadas de internet sin el permiso expreso del autor.

**Referencias bibliográficas.** Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de Conclusiones y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.



## EJEMPLOS:

### ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

### LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* (pp. 8-36). New York: McGraw-Hill.

### CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. & Williams (ed), *Supercritical Fluids Methods and Protocols*. (pp. 335-412). New Jersey: Humana Press, Inc.

### DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. Consultado en octubre 2, 2008, Disponible en: <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html>, accesado el XX de XX de XXXX

### TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). *Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico* (tesis doctoral). Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas, comunicarse con el editor ([revista.mutis@utadeo.edu.co](mailto:revista.mutis@utadeo.edu.co)). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité Editorial disponga.



EDITORIAL  
**UTADEO**

ESTA REVISTA ELECTRÓNICA  
ES EDITADA POR LA  
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
JORGE TADEO LOZANO.  
SE FINALIZÓ  
EN 2018