

ISSN 2619-2551 (en línea)  
ISSN 0123-4226 (impreso)

REVISTA

# U.D.C.A

ACTUALIDAD & DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

39  
años

Revista Científica- Julio-Diciembre 2022-Volumen 25 No.2 - D.L.

Bogotá D.C. Colombia



PUBLICACIÓN OFICIAL DE LA UNIVERSIDAD  
DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A,  
INSTITUCIÓN CON ACREDITACIÓN DE ALTA CALIDAD

## ENFOQUE Y ALCANCE

La Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica es una publicación seriada, multidisciplinar\*, arbitrada que adopta la revisión por pares de doble ciego, de acceso abierto vía diamante y de producción continua (Hacer click aquí para ver el proceso de publicación), dirigida a investigadores. Tiene como finalidad evaluar, publicar y difundir la producción científica, principalmente, de la región iberoamericana y de las otras regiones tropicales y subtropicales.

Para facilitar el acceso y la apropiación, se aceptan manuscritos en idiomas español, inglés y portugués. La mayoría de los documentos que publica pertenecen a artículos científicos; sin embargo, también edita artículos de reflexión, de revisión, reporte de casos y notas técnicas.

La revista es editada, sin interrupción, desde 1998 y se encuentra indizada en Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstracts, Índice Bibliográfico Nacional Publindex clasificada en “B” Convocatoria No. 910 de 2021, SciELO Colombia, Reseñada en Latindex e incluida en la base de datos Periódica UNAM, México, en el Directory of Open Access Journals-DOAJ y en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

La gratuidad para el autor y el lector obedece a la financiación de la revista por parte de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A y a la colaboración desinteresada de los evaluadores externos.

\*Temas abordados: Ciencias Agrarias, Ciencias Naturales y Ciencias Sociales.

## FOCUS AND SCOPE

The “Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica”, is a serial, multidisciplinary\*, refereed publication that adopts double-blind peer review, diamond open-access and continuously produced publication (Click here to know the publication process), aimed at researchers. Its purpose is to evaluate, publish and disseminate scientific production, mainly from the Ibero-American region, but also from the others tropical and subtropical regions.

To extend the dissemination of articles and facilitate access and appropriation, manuscripts in Spanish, English or Portuguese are accepted. Most of the documents published belong to scientific articles, however, it also publishes articles of reflection, reviews, case reports and technical notes.

The journal has been edited, without interruption, since 1998 and is indexed in Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Publindex National Bibliographic Index classified in “B” Announcement No. 910 of 2021, SciELO Colombia, Review in Latindex and included in the database Periódica UNAM, Mexico, in the Directory of Open Access Journals-DOAJ, and in the Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB.

The not charges for the publication to the authors and the free access to the readers obey to the financing of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales and the disinterested collaboration of the peer reviewers.

\*Topics covered: Agricultural Sciences, Natural Sciences and Social Sciences.

## FOCO E ESCOPO

A Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica é uma revista multidisciplinar\* que avalia, publica e divulga a produção científica da região ibero-americana, utilizando o sistema de avaliação duplo-cega e adotando o sistema de acesso aberto via diamante (Clique aqui para saber mais sobre o processo de publicação).

Com o propósito de facilitar o acesso e a apropriação da produção científica produzido por e para a região, a revista publica os artigos em espanhol, inglês e português. A gratuidade para o autor, como para o leitor, deve-se ao apoio financeiro da Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales e a colaboração desinteressada dos avaliadores externos.

A revista tem uma trajetória de mais de 20 anos e se encontra indexada no Scopus, Chemical Abstracts, CAB Abstract, Índice Bibliográfico Nacional Publindex classificada em “B” Circular No.910 de 2021, SciELO Colombia, revisada em Latindex e incluída na base de dados Periódica UNAM, México, no the Directory of Open Access Journals-DOAJ, e na Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico-REDIB

\*Temas comprendidos: Ciências Agrárias, Ciências Naturais e Ciências Sociais.

## EQUIPO EDITORIAL

### Editor

Helber Adrián Arévalo Maldonado  
*Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A*  
Bogotá, Colombia

### Comité editorial

Carlos Alberto Blanco Montero  
*USDA-Animal and Plant Health Inspection Service APHIS*  
Washington, Estados Unidos de América

Eduardo José Delgado Hernández  
*Universidad Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora*  
Barinas, Venezuela

Marlete Brum Cleff  
*Universidade Federal de Pelotas UFP*  
Pelotas, Brasil

Rosângela Brito  
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS*  
Porto Alegre, Brasil

### Comité científico

Adriana Posada Arrubla  
*Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A*  
Bogotá, Colombia

Alfonso Javier García  
*Universidad de Sevilla*  
Sevilla, España

Andrés Franco Herrera  
*Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*  
Santa Marta, Colombia

Clistenes Williams Araújo do Nascimento  
*Universidade Federal Rural de Pernambuco*  
Recife, Brasil

Francisco Alonso Solís Marín  
*Universidad Nacional Autónoma de México*  
Ciudad de México, México

Galdino Andrade Filho  
*Universidade Estadual de Londrina*  
Londrina, Brasil

Jesús Muñoz Rojas  
*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*  
Puebla de Zaragoza, México

Jhon James Mora Rodríguez  
*Universidad ICESI*  
Cali, Colombia

José Eleutério Junior  
*Universidade Federal do Ceará*  
Ceará, Brasil

José Gregorio Lanza Marchán  
*Normalización Chile-LAN Consultores*  
Santiago, Chile

José Siles González  
*Universidad de Alicante*  
Alicante, España

Rita María Ávila G. de Hernández  
*Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado*  
Barquisimeto, Venezuela

Samuel Moisés Nucamendi Guillén  
*Universidad Panamericana*  
Guadalajara, México

Sildivane Valcácia Silva  
*Universidade Federal da Paraíba*  
Paraíba, Brasil

### Equipo colaborador

**Correctora de estilo y ortográfica**  
Norella Castro Rojas

**Profesional de apoyo**  
Kamila Bocanegra Solorzano

**Diseño y Diagramación**  
Camilo Eduardo Carrasco Borrero

**CONTENIDO**  
**Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**  
**Volumen 25 número 2- julio-diciembre, 2022**  
<https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022>

**EDITORIAL**

La Innovación, la Ciencia y la Tecnología, una variable común de los Premios Nobel 2022  
*Germán Anzola Montero* .....e2324  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2324>

**CIENCIAS AGRARIAS**

Niveles de fertilización con calcio, magnesio y azufre en genotipos de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en Nariño  
*Daniel Marino Rodríguez-Rodríguez; Óscar Eduardo Checa-Coral; Hugo Ruiz-Eraso; Jesús Muriel-Figueroa; Bayardo Yepes-Chamorro* .e1847  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1847>

*Bacillus mycoides* y ácidos húmicos como bioestimulantes de frijol caupí bajo estrés por salinidad  
*Jocelyn Beleño-Carrillo; Liliana Gómez-Gómez; Nelson Osvaldo Valero-Valero* .....e1974  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1974>

Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú  
*Erika Tereza Inocencio-Vasquez; Nelino Florida-Rofner* .....e2320  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>

Respuesta del banano clon Valery en alta densidad a la inoculación con micorrizas y fósforo en Apartadó - Colombia  
*Miguel Ángel Bernal-Monterrosa; Eliecer Miguel Cabrales-Herrera* .....e1659  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1659>

Minador en albahaca *Ocimum basilicum* L. y su parasitoide  
*Rafael Paúl Montilla-Coronado; Carlos Eduardo Ramos-Gómez* .....e2292  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2292>

Quiescence as a strategic stage for the infective process of *Colletotrichum* species  
*Alberto Páez-Redondo; Dov Prusky; Lilliana Hoyos-Carvajal* .....e2073  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2073>

Influence of microbial consortia on the incidence of grey mold (*Botrytis cinerea*) in strawberry (Monterey variety)  
*Mario Alejandro Cano; Jairo Leonardo Cuervo; Aquiles Enrique Darghan* .....e2312  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2312>

Detección molecular de *Cucumber mosaic virus* y *Pepper severe mottle virus* en arvenses asociadas al cultivo de ají (*Capsicum* spp.)  
*Karina López-López; Andrea Corredor-Rodríguez; Juan Carlos Vaca-Vaca* .....e2277  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2277>

Prevalencia de virus de ARN en tubérculos-semilla certificados de *Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro de la sabana Cundiboyacense  
*Andrea García-Torres; Mónica Higueta-Valencia; Yuliana Gallo-García; Rodrigo Hoyos; Pablo Gutiérrez; Mauricio Marín* .....e2151  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2151>

Proposal of a system for measuring apparent electrical conductivity and moisture of soil for small farmers  
*Jhonatan Paolo Tovar-Soto; Jesús Hernán Camacho-Tamayo; Leonardo Enrique Bermeo-Clavijo; Oscar Leonardo García-Navarrete* .....e1592  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1592>

- Ajuste del coeficiente basal de cultivo (Kcb) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección  
*Jheison A. Guerrero-Gutierrez; Enrique A. Torres* .....e1832  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1832>
- Spatial analysis methodology of resistance to penetration and infiltration in a soil cultivated with a bushy fruit (*Acca sellowiana*)  
*Helber Milton Orjuela-Matta; Oscar Iván Monsalve-Camacho; Danny Wilson Sanjuanelo-Corredor; Juan Alejandro Velandia-Mora; Mario Alejandro Cano-Torres; Omar Camilo Quintero; Diana Lorena Marentes-Barrantes; Héctor William Duarte-Gómez* .....e2331  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2331>
- Doble cuarto arco aórtico persistente en un perro (*Canis familiaris*): reporte de caso  
*Jordi Eisenhower Hernández-Pinilla; Edwin Fernando Buriticá-Gaviria; Diego Fernando Echeverry-Bonilla; John Yeiber Rengifo-Herrera* .....e2310  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2310>
- Seroprevalencia de leptospirosis y brucelosis en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en Tierralta Córdoba, Colombia  
*Mariam Raquel-Montes; Merly Elena Zambrano; Alfonso Calderón-Rangel; Virginia Rodríguez-Rodríguez; Camilo Guzmán Terán* .....e1904  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1904>
- Productividad y curvas de crecimiento usando modelos no lineales en un cruce de ovino de pelo colombiano x pelibuey  
*Claudia Patricia Lenis-Valencia; Enrique José Molina; Luz Angela Álvarez-Franco* .....e1853  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1853>
- Zoometric and ethnological characterization of the colombian creole donkey in Sucre, Colombia  
*Darwin Yovanny Hernández-Herrera; Diego Fernando Carrillo-Gonzalez; Donicer Eduardo Montes-Vergara* .....e1948  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1948>
- Curvas de crecimiento en ovino de pelo colombiano en los departamentos de Córdoba y Cesar, Colombia  
*Jorge Noriega-Márquez; Darwin Hernández-Herrera; Moris Bustamante-Yáñez; Luz Álvarez-Franco; Manuel Ariza-Botero; Yineth Palacios-Erazo; Oscar Vergara-Garay* .....e1727  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1727>
- Bacillus subtilis* mejora el desarrollo de órganos digestivos, la morfología del intestino y el rendimiento productivo en pollos de engorde  
*Carlos Abel Maya-Ortega; Tomás Antonio Madrid-Garcés; Jaime Eduardo Parra-Suescún* .....e1848  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1848>
- Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba  
*Yasmany García-López; Lourdes Yamen González-Sáez; Juan Alfredo Cabrera-Hernández* .....e2334  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2334>
- Cuantificación de compuestos con potencial bioactivo en *Citrullus lanatus*, *Luffa cylindrica* y *Sicana odorifera*  
*Angie P. León-Cristancho; Karol A. Roa-Higuera; Nixon Meneses-Marentes; Martha Tarazona-Díaz* .....e2123  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2123>
- Adopción de tecnología y agroempresas asociativas rurales: un análisis desde el capital social territorial  
*Carlos Julián Ramírez-Gómez* .....e2219  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2219>
- ## CIENCIAS NATURALES
- Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)  
*Ingrid Walteros-Torres; Sofía Palacios-Pacheco; German Eduardo Cely; Pablo Antonio Serrano; Diego Moreno-Pérez* .....e1846  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>

Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia

*Francy Zorayda Gómez-Balanta; Luis Miguel Ramírez-Náder* .....e2057  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2057>

Evaluación de la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos del departamento del Cauca, Colombia

*Juan C. Casas; Edier H. Pérez; Jesús D. Hurtado; Claudia L. Quiroz; Mauricio Correa; Edna Cabrera* .....e1772  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1772>

Determinación de viabilidad, vigor y banco de semillas de retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en un Andisol de un ecosistema de Páramo

*Alba Gissela Fajardo-Ortiz; Laura Rocío Fonseca-Hernández; Arlette Ivonne Gil-Clavijo; Juliana Andrea Martínez-Chiguachi; Álvaro Celis-Forero* .....e2076  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2076>

Methylmercury (MeHg) in the most consumed fish in a municipality of La Mojana, Colombia

*Wilson Baleta-Anaya; Yesenia Garay-Román; Adolfo Consuegra-Solorzano; Jhon Vidal-Durango; Jorge Buelvas-Soto; José Marrugo-Negrete* .....e2024  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2024>

Exposure of workers in tanneries, construction and beauty salons in Armenia to occupational environmental pollution. Case study

*Milena E. Gómez-Yepes; Rafael H. Villamizar-Vargas; Olga L. Rendón-García; Lázaro V. Cremades* .....e1960  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1960>

## CIENCIAS SOCIALES

Territorio y minería: la necesidad de precisar un enfoque para su abordaje

*Adriana Posada-Arrubla; Daniela Flórez-Portilla; Laura Daniela Torres-Camacho; Ricardo Viana-Ríos* .....e2305  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2305>

Los floricultivos de la Sabana de Bogotá y su relación con la avifauna: una mirada desde los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá

*Sergio Adolfo Sánchez-Ordoñez; Oscar Luis Pyszczek* .....e1824  
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1824>

## PARES EVALUADORES



## Editorial

# La Innovación, la Ciencia y la Tecnología, una variable común de los Premios Nobel 2022

Germán Anzola Montero<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A; Bogotá D.C., Colombia.

**Como citar:** Anzola Montero, G. 2022. La Innovación, la Ciencia y la Tecnología, una variable común de los Premios Nobel 2022. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2324. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2324>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Para la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, dedicar un espacio académico al análisis de los trabajos científicos, literarios, económicos y sociales, que merecieron el más alto reconocimiento, a nivel internacional, como el Premio Nobel, es una práctica anual, que nos permite medir el punto de impacto que tienen nuestras investigaciones, todas ellas, orientadas hacia la formación de los estudiantes, al desarrollo del conocimiento, de la ciencia y la tecnología y al avance de las ciencias aplicadas y ambientales, bajo un abordaje interdisciplinario.

Cabe destacar, que este galardón, por designio específico de Alfred Nobel, encargó a varias instituciones, como responsables de elegir o votar por los ganadores; es así que, para el caso de Fisiología o Medicina, lo hace el Instituto Karolinska o Asamblea del Nobel del Instituto Karolinska, una institución universitaria médica de Estocolmo - Suecia, que cuenta con 50 profesores, que hacen parte del Comité Nobel. El premio de Física, de Química y de Economía es otorgado por la Real Academia Sueca de Ciencias, fundada en 1739, conformada por 440 integrantes, nacionales y extranjeros. El de Literatura es responsabilidad de la Academia Sueca y, en la actualidad, está constituida por 18 integrantes, con mandato vitalicio y para el Nobel de Paz, se encarga el Comité Noruego del Nobel, compuesto por cinco miembros designados por el Parlamento Noruego (Storting). Estos Premios se anunciaron desde el 3 hasta el 10 de octubre de 2022, pero se entregan en Estocolmo y en Suecia, en diciembre de 2022.

Es de recordar, que los Premios Nobel es una distinción internacional anual, instaurado desde 1901, en cinco de sus seis categorías y, desde 1968, en la categoría de Economía, que se otorga para reconocer a instituciones o personas que hayan adelantado investigaciones, innovaciones y desarrollos notables y significativos, en beneficio de la humanidad. Por ello, para la versión del 2022, no fue la excepción, dado que se registran extraordinarios trabajos, que hacen parte de esa inventiva humana.

Para la **Categoría de Fisiología o Medicina**, premio que se otorga a aquellos aportes al estudio y la comprensión del cuerpo humano, la salud y el combate contra enfermedades, se lo llevó el biólogo sueco Svante Pääbo, por la secuenciación del genoma de los neandertales y la creación de la paleogenómica que, en palabras del jurado, “Al revelar las diferencias genéticas que distinguen a todos los seres humanos vivos de los homínidos desaparecidos, sus descubrimientos han dado la base a la exploración de lo que hace de nosotros, humanos, seres únicos” (Diciencia, 2022).

Pääbo, se dio a la tarea de resolver diferentes dudas que le intrigan a la humanidad y que tienen que ver con el origen humano y la diferencia entre los homo-sapiens de otros homínidos y gracias a su investigación sobre los genes y la evolución humana, otorgó respuestas, a través de la secuencia del genoma del neandertal (pariente extinto de los humanos). Además, descubrió un homínido -Denisova-, concluyendo que “se había producido una transferencia de genes de estos homínidos ya extinguidos al *Homo sapiens* tras la migración fuera de África hace unos 70.000 años” (BBC, 2022).

Estos descubrimientos tienen gran relevancia fisiológica, en el sentido de conocer nuestro sistema inmunológico y cómo reacciona a las infecciones. Ello, dio origen a una nueva disciplina científica, la Paleogenómica, al revelar las diferencias genéticas, que distinguen a los seres humanos vivos de los homínidos ya extintos (NobelPrize.org, 2022).

El francés Alain Aspect, el estadounidense John F. Clauser y el austriaco Anton Zeilinger, obtuvieron el Premio Nobel, en la **Categoría de Física**, por sus descubrimientos sobre el “entrelazamiento cuántico”, un mecanismo en el que dos partículas cuánticas están perfectamente correlacionadas, independiente de la distancia entre ellas. Esta distinción, se otorga por aportes representativos en la comprensión de las leyes y la composición del universo.

Pero, ¿qué significa entrelazamiento cuántico o fotones enredados? En resumen, fórmulas para la creación de tecnologías de información cuántica. Expertos en el área, señalan que los estados cuánticos entrelazados, donde dos partículas se comportan como una sola, aun estando separadas, dan paso a la tecnología, basada en la información cuántica (BBC, 2022). Hoy por hoy, en el campo de la investigación aplicada, se incluyen los ordenadores y redes cuánticos y la comunicación cifrada cuántica segura (RTVE, 2022).

El Nobel en la **Categoría de Química**, se entrega a aquellas personas o instituciones que realizan aportes a la comprensión y la transformación de la materia; así, el premio fue otorgado a Morten Meldal, danés y a Carolyn Bertozzi y Barry Sharpless, estadounidenses, por sentar las bases para una forma más funcional de la disciplina científica, es decir, “por el desarrollo de la química click y la química bioortogonal”, “una forma de química simple y confiable, donde las reacciones ocurren rápidamente y se evitan subproductos no deseado”, según el comunicado (NobelPrize.org, 2022).

La “química del clic”, se trata de facilitar los procesos difíciles, es decir, es una construcción molecular o una unión rápida y eficiente -química sencilla y fiable-, para evitar subproductos no deseados y se ha empezado a utilizar en algunos organismos vivos, dado que permite cartografiar biomoléculas importantes, sin alterar la química normal de la célula. Esta investigación, la llaman la joya de la corona de la química: “la cicloadición azida-alquina catalizada por cobre. Se trata de una reacción química elegante y eficaz que se ha generalizado. Entre otros muchos usos, se emplea en el desarrollo de productos farmacéuticos, en el mapeo del ADN y en la creación de materiales más adecuados” (National Geographic, 2022).

Gracias a las reacciones bioortogonales, las investigaciones se han conducido a mejorar la orientación de los fármacos contra el cáncer; actualmente, se encuentra en ensayos clínicos.

Ben S. Bernanke, Douglas W. Diamond y Philip H. Dybvig fueron distinguidos con este Premio, en la **Categoría de Economía**, por entregar el avance más importante en el campo de las ciencias económicas, a través de su investigación sobre bancos y crisis financieras.

Los tres expertos estadounidenses explicaron la actuación de los bancos en la economía, especialmente, durante las crisis financieras. Hoy en día, entender el rol de los bancos en la económica mundial y la forma de regular los mercados financieros, fue el concepto general que entregaron los jurados, al momento de designar este premio (NobelPrize.org, 2022). “La investigación bancaria moderna aclara por qué tenemos bancos, cómo hacerlos menos vulnerables en las crisis y cómo los colapsos bancarios exacerbaban las crisis financieras. [...] Sus análisis han sido de gran importancia práctica para regular los mercados financieros y hacer frente a las crisis financieras” (Portafolio, 2022).

Una conclusión importante de esta investigación es por qué es vital evitar el colapso de los bancos.

La paz, la convivencia humana, la fraternidad de las naciones, la abolición de la guerra y la injusticia y otras formas importantes de activismo social y político, son las características del premio **Nobel de la Paz**, atribuido al defensor de los derechos humanos bielorruso encarcelado Ales Bialiatski, a la ONG rusa Memorial, cuya disolución ordenaron las autoridades rusas y al Centro por las Libertades Civiles de Ucrania.

Ellos, representan a la sociedad civil desde sus países de origen, velando por la defensa de los derechos humanos, la democracia y la coexistencia pacífica en los países vecinos; durante varias décadas han promovido el derecho a enjuiciar el poder, con el fin de proteger el bienestar y la seguridad de los ciudadanos. “Han realizado un esfuerzo extraordinario para documentar los crímenes de guerra, las violaciones de los derechos humanos y el abuso de poder. Juntos demuestran la importancia de la sociedad civil para la paz y la democracia” (NobelPrize.org, 2022).

Todos sus esfuerzos tienen un propósito en favor de los valores humanistas, el antimilitarismo y los principios del derecho; en últimas, otorgaron este galardón para honrar la visión de Alfred Nobel: paz y fraternidad entre las naciones (BBC, 2022).

El jurado para el **Premio Nobel en Literatura**, anunció a la escritora francesa Annie Ernaux, como la ganadora de esta categoría, conocida por sus novelas sobre clase y género, basadas en su experiencia personal, “la valentía y la agudeza clínica con la que descubre las raíces, los distanciamientos y las restricciones colectivas de la memoria personal” (NobelPrize.org, 2022).

Autora de *L'événement*, *Los años*, *La place*, *Una mujer* y otras grandes obras corresponden a la selección literaria que hicieron los jurados, para otorgar el Premio Nobel. Son escritos en los que, permanentemente y desde diferentes ángulos, expone disparidades de género, de lengua, de clase y el aborto ilegal, vista desde las restricciones morales, de una sociedad represiva e implacable (Franco, 2022).

“Su obra es intransigente y está escrita en un lenguaje llano, raspado y limpio. Y cuando, con gran valor y agudeza clínica, revela la agonía de la experiencia de clase, describiendo la vergüenza,

la humillación, los celos o la incapacidad de ver quién se es, ha logrado algo admirable y perdurable” (Dciencia, 2022).

Cada premio otorgado consiste en una medalla, un diploma personal y un premio en efectivo, de 10 millones de coronas suecas (921,000 dólares), por cada categoría galardonada.

Como se indicó al inicio de este Editorial, con destino a la Revista Actualidad & Divulgación Científica, es revisar el impacto que tienen nuestras investigaciones adelantadas en la Universidad frente a este panorama de desarrollo y de innovación.

La Universidad cuenta con varias líneas de investigación, entre ellas la de **Salud Humana y Animal**, en la que se pretende contribuir a la comprensión de los fenómenos la salud, la enfermedad y el cuidado, entendidos como espacios de interrelación y a la generación de soluciones para el mejoramiento y el mantenimiento de la vida. La de **Sostenibilidad Ambiental**, dirigida a aportar a la sostenibilidad ambiental, mediante estudios multidisciplinares, interdisciplinares y transdisciplinares, que provean información tendiente a facilitar la toma de decisiones de los sectores público y privado, de las regiones y del país, para la conservación y la gestión integral sostenible del socioecosistema, en articulación con la docencia y la proyección social. La de **Sostenibilidad Social**, que pretende generar conocimientos que contribuyan al desarrollo de lugares sostenibles en los ámbitos de la equidad, diversidad, gobernabilidad, calidad de vida y cohesión, que permitan asegurar la capacidad de las generaciones actuales y futuras de crear comunidades sanas y habitables y la de Tecnologías Digitales, que busca aplicar métodos, para el análisis y procesamiento de datos, que permitan la obtención de información, diagnóstico, toma de decisiones y planificación, que aporten a la solución de problemáticas, en diferentes áreas del conocimiento.

Estas líneas de investigación están distribuidas en nuestros grupos de Investigación Ciencia Animal; Ciencia, Tecnología, Sociedad y Ambiente; Ciencias del Deporte y la Actividad Física; Compensación con Justicia Social; Cuidado de la Salud y Desarrollo Sostenible; Derecho, Justicia y Ambiente; Estilos de Pensamiento y Estilos de Aprendizaje; Grupo de Análisis de Datos Computaciones; Investigaciones Biomédicas y de Genética Humana Aplicada; Investigaciones Geográficas para el Desarrollo Territorial; Producción Agrícola Sostenible; Productos Naturales U.D.C.A; Saber y Práctica de Enfermería y Sostenibilidad Ambiental, los cuales, desarrollan tecnologías e innovaciones, direccionadas en aportar resultados de impacto, en beneficio de la humanidad.

Para la U.D.C.A es importante conjugar la I+D+i en todas las áreas del conocimiento, con el propósito de producir desarrollo científico, económico, ambiental y social, para la región, el país y el mundo.

## REFERENCIAS

1. BRITISH BROADCASTING CORPORATION-BBC. 2022. Premio Nobel de Física 2022: los ganadores son Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por su trabajo pionero en la información cuántica. Disponible desde Internet en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-63128140> (con acceso 26/10/2022).
2. CORPORACIÓN DE RADIO Y TELEVISIÓN ESPAÑOLA-RTVE. 2022. Premios Nobel Nobel de Física para Aspect, Clauser y Zeilinger por sus avances en información cuántica. Disponible desde Internet en: <https://www.rtve.es/noticias/20221004/premio-nobel-fisica-2022-para-aspect-clauser-zeilinger/2404910.shtml> (con acceso 25/10/2022).
3. DCIENCIA. 2022. Nobel Prizes of 2022. Disponible desde Internet en: <https://www.dciencia.es/premios-nobel-2022> (con acceso 26/10/2022).
4. FRANCO, A. 2022. Cinco libros para conocer a la ganadora del Nobel de Literatura 2022. Disponible desde Internet en: <https://canal1.com.co/web-stories/cinco-libros-para-conocer-a-la-ganadora-del-nobel-de-literatura-2022> (con acceso 26/10/2022).
5. NATIONAL GEOGRAPHIC. 2022. Premio Nobel de Química 2022 para los desarrolladores de unas ingeniosas herramientas para fabricar moléculas. Disponible desde Internet en: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/premio-nobel-quimica-2022-para-desarrolladores-unas-ingeniosas-herramientas-para-fabricar-moleculas\\_18859](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/premio-nobel-quimica-2022-para-desarrolladores-unas-ingeniosas-herramientas-para-fabricar-moleculas_18859) (con acceso 25/10/2022).
6. NOBELPRIZE.ORG. 2022. The official website of the Nobel Prize - NobelPrize.org. Disponible desde Internet en: <https://www.nobelprize.org> (con acceso 26/10/2022).
7. PORTAFOLIO. 2022. Nobel de Economía 2022 a investigación de bancos y crisis financieras. Disponible desde Internet en: <https://www.portafolio.co/economia/nobel-de-2022-a-investigacion-de-bancos-y-crisis-financieras-572373> (con acceso 26/10/2022).



# Niveles de fertilización con calcio, magnesio y azufre en genotipos de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en Nariño

## Fertilization levels with calcium, magnesium and sulfur in genotypes of voluble peas (*Pisum sativum* L.) in Nariño

Daniel Marino Rodríguez-Rodríguez<sup>1</sup> ; Óscar Eduardo Checa-Coral<sup>1\*</sup> ; Hugo Ruiz-Eraso<sup>1</sup> ; Jesús Muriel-Figueroa<sup>2</sup> ; Bayardo Yepes-Chamorro<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Nariño, sede VIIS, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación Cultivos Andinos GRICAND. San Juan de Pasto - Nariño, Colombia; e-mail: danmaro25@hotmail.com; cicagrarias@hotmail.com; hugoruize@yahoo.com

<sup>2</sup>Fenalce, sede Pasto, Grupo de Investigación Cultivos Andinos GRICAND. San Juan de Pasto - Nariño, Colombia; e-mail: jmuriel@fenalcerregional.org

<sup>3</sup>Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria, Agrosavia, Centro de Investigación Obonuco, Grupo de Investigación Cultivos Andinos GRICAND. San Juan de Pasto - Nariño, Colombia; e-mail: byepes@agrosavia.co

\*autor de correspondencia: cicagrarias@hotmail.com

**Cómo citar:** Rodríguez-Rodríguez, D.M.; Checa-Coral, Ó.E.; Ruiz-Eraso, H.; Muriel-Figueroa, J.; Yepes-Chamorro, B. 2022. Niveles de fertilización con calcio, magnesio y azufre en genotipos de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en Nariño. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1847. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1847>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** febrero 2 de 2021

**Aceptado:** septiembre 20 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Nariño es el principal productor de arveja de Colombia. En su cultivo, se fertiliza con nitrógeno, fósforo y potasio, pero no se conoce el efecto de otros nutrimentos. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes niveles de calcio, magnesio y azufre sobre los componentes de rendimiento de arveja voluble, en los municipios de Gualmatán, Pupiales y Puerres, en suelos Andisoles y, en Ipiales y Potosí, en suelos Inceptisoles. En cada localidad, se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones, donde el factor A correspondió a cinco genotipos de arveja y el factor B, a cinco niveles de fertilización con calcio, magnesio y azufre. Los resultados indicaron respuesta positiva de los rendimientos a la aplicación de estos elementos. El nivel de fertilización 112,5-50-25 kg.ha<sup>-1</sup> de Ca, Mg y S, respectivamente, presentó mayor rendimiento que el nivel establecido por la información del análisis de suelos o testigo

en Gualmatán, Pupiales y Potosí, mientras que, en Puerres, hubo respuesta al nivel más alto, 135-60-30, de los mismos elementos. Los otros niveles de fertilización fueron similares al testigo. En Ipiales, la variedad Sureña presentó rendimientos similares para todos los niveles de fertilización. San Isidro presentó su mayor rendimiento, con el nivel 112,5-50-25 kg.ha<sup>-1</sup>, de calcio magnesio y azufre. Las líneas con gen afila L3 y L18 igualaron los rendimientos de las variedades comerciales Sureña, Alcalá y San Isidro, en Potosí y en Pupiales.

Palabras clave: Arveja voluble; Azufre; Calcio; Fertilización mineral; Gen afila; Magnesio.

### ABSTRACT

Nariño is the main pea producer in Colombia. The crop is fertilizer with nitrogen, phosphorus, and potassium, but the effect of other

nutrients is unknown. The objective of this research was to evaluate the effect of different levels of calcium, magnesium, and sulfur on the performance components of vouble pea in the municipalities of Gualmatán, Pupiales, and Puerres on Andisols, and in Ipiales and Potosí on Inceptisols soils. A randomized complete block design was used with divided plots and three replications, where factor A corresponded to five pea genotypes and factor B to five levels of fertilization with calcium, magnesium, and sulfur. The results indicated positive response of the yields to the application of these elements. The level of fertilization 112.5-50-25 kg,ha<sup>-1</sup> of Ca, Mg, and S respectively, presented a higher yield than the level established by information from the soil analysis or control in Gualmatán, Pupiales and Potosí, while in Puerres there was a response at the highest level 135-60-30 of the same elements. The other levels of fertilization were similar to the control. In Ipiales Sureña variety presented similar yields for all fertilization levels. San Isidro presented its highest yield with a level of 112.5-50-25 kg,ha<sup>-1</sup> of calcium, magnesium and sulfur. The lines with the L3 and L18 genes matched the yield of the commercial varieties Sureña, Alcalá and San Isidro in Potosí and Pupiales.

Keywords: Afla gen; Calcium; Magnesium; Mineral fertilization; Pea; Sulfur.

## INTRODUCCIÓN

Nariño es el mayor productor de arveja vouble (*Pisum sativum*) en Colombia, con siembras en 17.000 hectáreas, en el 2015. Esta especie, se convirtió en una de las principales fuentes de empleo rural, generando más de 2.550.000 jornales al año. Actualmente, se despachan, en promedio, 150 toneladas diarias de arveja, de Nariño hacia el resto del país (Checa, 2016).

La fertilización, se hace de acuerdo con el hábito de crecimiento y para arveja vouble, se ha determinado que la proporción 15-2-7 kg de NPK es adecuada, para producir una tonelada en vaina verde. En general, no se hacen aplicaciones de otros elementos esenciales. En ese sentido, Ferraris & Couretot (2014) anotan que la fertilización de fósforo, azufre y otros nutrientes en arveja es relativamente reciente. Los mismos autores mencionan la existencia de algunos trabajos que establecen criterios y umbrales similares para arveja y soja, indicando requerimientos de 22 kg de calcio y 2 kg de azufre, por tonelada de arveja producida. Al respecto, Gómez (2006) presenta requerimientos del cultivo de arveja de 9-4-2 kg de calcio, magnesio y azufre, respectivamente, por cada tonelada de arveja producida.

La arveja es una especie que produce granos con un alto valor proteico (20 a 24 %), es exigente en nitrógeno y potasio y, en menor cantidad, en fósforo, calcio, magnesio y azufre (Ferraris & Couretot, 2014). El calcio, el magnesio y el azufre son considerados como elementos secundarios; no obstante, su deficiencia en el suelo afecta el desarrollo de la planta (Gliessman, 2002).

El calcio actúa sobre la asimilación del nitrógeno, estimulando la actividad microbiana. Induce el desarrollo de raíces y hojas y es

esencial para el llenado de vaina. El magnesio es un elemento clave para la fotosíntesis; participa en las transformaciones del nitrógeno y en la transferencia del fósforo en la planta, entre otras funciones, por tanto, las deficiencias de magnesio repercuten directamente sobre los rendimientos al afectar el proceso de fotosíntesis (Laurenço *et al.* 1968).

Las plantas toman el azufre del suelo en forma de sulfato. También, lo pueden captar de la atmósfera en forma de dióxido de azufre y ya en las hojas, pueden transportarlo y reducirlo de manera eficiente, específicamente, en los cloroplastos, donde se reduce el sulfito a la forma de sulfuro que, luego, es metabolizado a cisteína, a partir de la cual, se forma la metionina. Estos aminoácidos son partes estructurales y funcionales de proteínas y enzimas. Ambos son de vital importancia en los organismos vivos (Wainwright, 1984).

Los suelos de los sitios experimentales del orden Andisol, procedentes de cenizas volcánicas, son de reacción moderada a extremadamente ácida, altamente fijadores de fósforo y forman compuestos que dificultan la descomposición de la materia orgánica (Castro Méndez, 2004), razón por la cual, presentan baja eficiencia de la fertilización con NPK y la respuesta del cultivo, generalmente, no correlaciona con la información del análisis de suelos (Checa Coral *et al.* 2020; Múnera Vélez & Meza Sepulveda, 2012).

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de cinco genotipos de arveja vouble con gen afla, a seis niveles de fertilización, complementaria con elementos esenciales calcio, magnesio y azufre y su interacción en diferentes órdenes de suelos, en cinco municipios de la zona Andina, del departamento de Nariño.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación, se desarrolló en localidades de los municipios de Gualmatán, Pupiales, Puerres, Ipiales y Potosí, productores de arveja y ubicados en la zona Andina de Nariño. Las coordenadas, el orden de los suelos de acuerdo con Castro Méndez (2004), así como los resultados de los análisis de suelos de cada sitio experimental con los contenidos de calcio, magnesio y azufre, utilizados para calcular los niveles de los diferentes tratamientos, se presentan en la tabla 1.

Las localidades hacen parte del Altiplano de Nariño en zona de minifundio, donde los cultivos, los sistemas de rotación con papa y hortalizas y las prácticas agrícolas, lo mismo que el nivel de tecnología, es similar en todos los ambientes objeto de estudio.

**Diseño experimental.** En cada localidad, se utilizó un diseño de bloques al azar, con arreglo en parcelas divididas. El factor A, lo conformaron cinco genotipos de arveja vouble, de las variedades comerciales Sureña, Alcalá, San Isidro y las líneas de arveja con gen afla L3 y L18, en Ipiales y en Puerres, reemplazadas por las líneas L27 y L28, en las otras localidades y caracterizadas por presentar gen afla, que reemplaza las hojas laterales por zarcillos (Checa *et al.* 2020).

El factor B correspondió a cinco niveles de calcio, magnesio y azufre, que se determinaron con base en los niveles propuestos por

Tabla 1. Características de los sitios experimentales y resultados del análisis de suelos.

Característica	Gualmatán	Pupiales	Puerres	Ipiales	Potosí
Coordenadas	N 0°50'51.1" W 77°34'14.7"	N 0°52'14.1" W 77°36'0.12"	N 0°49'34.1" W 77°33'51.4"	N 0°51'24.0" W 77°34'0.97"	N 0°51'36.6" W 77°36'27.8"
Altura m s.n.m.	2.700	2.876	2.652	2.660	2.690
Cultivo anterior	Arveja	Pastos	Pastos	Arracacha	Papa
Suelos	<i>Pachic Melanudands</i>	<i>Pachic Melanudands</i>	<i>Pachic Melanudands</i>	<i>Andic Dystrustepts</i>	<i>Vitrandic Dys- trustepts</i>
pH	5,05	4,82	5,11	5,65	5,48
MO (%)	6,67	4,21	2,42	2,13	2,84
Ca (kg.ha <sup>-1</sup> )	1.362	2.160	1.262	1.625	2.164
Mg (kg.ha <sup>-1</sup> )	87	43,2	114	245,5	202
S (kg.ha <sup>-1</sup> )	32,8	14,8	7,77	6,88	7,84

Gómez (2006) (Tabla 2), 90-40-20 kilogramos de calcio, magnesio y azufre, para producir una tonelada de arveja, tomado como nivel medio, a partir del cual, se exploraron dosis con el 25 y 50 % superior y el 25 %, inferior. El testigo, se determinó para cada sitio experimental, con base en la información del respectivo análisis de suelos (Tabla 1), para alcanzar el nivel medio propuesto por Gómez (2006), de 90-40-20 de calcio, magnesio y azufre, en kg.ha<sup>-1</sup>. Como el suelo tuvo cantidades suficientes de calcio y de magnesio en todas las localidades, se hicieron aplicaciones en kg.ha<sup>-1</sup> de los faltantes de azufre 13,12, en Ipiales; 12,16, en Potosí y 12,24, en Puerres, excepto en Gualmatán, donde se registró suficiente cantidad para el requerimiento del cultivo.

La fertilización con elementos mayores, así como las prácticas agronómicas de mantenimiento del cultivo fueron similares para todos los tratamientos. Los datos obtenidos, se sometieron a un análisis de varianza; los promedios de los efectos simples, a prueba de Tukey, a nivel del 0,05 y los de la interacción, a la prueba de t, recomendada por Reyes Castañeda (1978) y por Little & Hills, (1997), para tratamientos cruzados. La unidad experimental estuvo constituida por cinco surcos de 3 m de largo, con distancia entre surcos de 1,20 y 0,10 m entre sitios, colocando una semilla por sitio. Las variables evaluadas fueron los siguientes componentes de rendimiento: número de vainas por planta, peso de la vaina con grano, número de granos por vaina tomados de 15 vainas por surco

Tabla 2. Niveles de elementos secundarios Ca, Mg y S. kg.ha<sup>-1</sup>.

Nivel fertilización	Porcentaje %	Ca. kg.ha <sup>-1</sup>	Mg kg.ha <sup>-1</sup>	S kg.ha <sup>-1</sup>
Muy Alto	150	135	60	30
Alto	125	112,5	50	25
Medio	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
Bajo	75	67,5	30	15
Cantidades por análisis de suelo por sitio		0	0	-

Nota: Los porcentajes presentes en la tabla muestran las fracciones establecidas, basadas en los requerimientos presentados por Gómez (2006).

o 45 vainas por tratamiento y el rendimiento en vaina verde, se tomó de tres surcos centrales, con 90 plantas por tratamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El número de vainas por planta presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre genotipos, en Puerres e Ipiales y entre niveles de fertilización, en Gualmatán, Puerres, Ipiales y Potosí. Igualmente, se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para peso de vaina con grano entre genotipos, en Gualmatán, Puerres y Potosí y entre niveles de fertilización, en Puerres. El rendimiento en vaina verde tuvo diferencias significativas para genotipos en Gualmatán, Puerres y Potosí. La interacción genotipo por nivel de fertilización fue significativa en Ipiales (Tabla 3).

**Componentes de rendimiento.** El número de vainas por planta fue significativamente mayor, con el nivel de fertilización 112,5-50-25 kg.ha<sup>-1</sup>, de calcio, magnesio y azufre, respectivamente, en comparación con el testigo en Gualmatán y Potosí. En Puerres, el número de vainas obtenido con los diferentes niveles de fertilización superaron al testigo (fertilización basada en el análisis de suelos). En Ipiales y Pupiales no se encontró diferencias a ningún nivel de probabilidad estadística para esta variable (Tabla 4).

El peso de vaina con grano tuvo mayor respuesta significativa a los niveles 90-40-20 y 67,5-30-15 kg.ha<sup>-1</sup> de calcio, magnesio y azufre, respectivamente, en comparación con el nivel determinado con el análisis de suelos o testigo en Puerres; no obstante, es importante tener en cuenta que la eficiencia productiva de un genotipo de arveja no solo

Tabla 3. Cuadrados medios para rendimiento y sus componentes en la evaluación de cinco genotipos de arveja, bajo diferentes niveles de fertilización, con elementos secundarios, en cinco municipios de Nariño.

	Municipios				
Fuente de Variación	Gualmatán	Pupiales	Puerres	Ipiales	Potosí
<b>Número de vainas por planta</b>					
Genotipo	54,91	354,50	387,45*	362,31*	120,95
Error a	15,01	266,19	16,92	29,80	52,92
Fertilización	12,30*	263,19	62,67*	3,17*	14,99*
G* F	3,49	276,60	10,61	24	3,13
Error b	1,65	271,57	15,21	11,23	5,62
CV	5,03	45,46	25,0	12,64	11,83
<b>Peso de vaina con grano</b>					
Genotipo	3,95*	2,61	3,93*	6,44	35,44*
Error a	0,64	3,42	0,85	1,75	0,91
Fertilización	0,24	0,06	1,13*	0,12	1,27
G* F	0,21	0,10	0,71	0,18	0,45
Error b	0,17	0,09	0,34	0,11	0,64
CV	4,96	4,98	6,99	4,90	9,82
<b>Rendimiento en vaina verde</b>					
Genotipo	23,86*	41,14	87,33*	32,17*	33,79
Error a	3,25	13,52	8,19	1,74	28,83
Fertilización	2,67*	10,83*	0,84*	0,50	3,14*
G* F	0,42	2,1	0,84	6,06*	0,83
Error b	0,72	1,45	2,93	2,07	1,09
CV	8,21	7,68	22	17,48	10,55

\*Significancia a nivel del 0,05.

considera el peso de la vaina con grano sino también cuánto de ese peso le corresponde al peso de grano. En este sentido, un genotipo favorable sería aquel que, teniendo alto peso de vaina con grano, presente una alta relación grano/vaina (Riascos Delgado & Checa Coral, 2018; Sharma *et al.* 2006).

Singh & Singh (2017) anotan que el aumento de la oferta de fósforo y azufre mejoraron el número de vainas por planta, granos por vaina y peso de grano, probablemente, por una mayor síntesis de clorofila, acumulación de carbohidratos, proteínas y su translocación a los órganos reproductivos que, a su vez, aumentaron la mayor cantidad de vainas y otros componentes de rendimiento.

Mayor rendimiento que el testigo, se obtuvo con el nivel de fertilización 135-60-30 kg.ha<sup>-1</sup>, en Puerres y con 112,5-50-25 kg.ha<sup>-1</sup>, de calcio, magnesio y azufre, respectivamente, en Gualmatán, Pupiales y Potosí (Tabla 4). La tendencia del número de vainas, peso de vainas y rendimiento de arveja verde concuerdan con lo mencionado por Patel *et al.* (2012), Singh *et al.* (2013), Saket *et al.* (2014) y Singh (2017).

En Ipiales, se encontró una interacción del genotipo con el nivel de fertilización, que indicó que la variedad Sureña presentó rendimientos similares para todos los niveles de fertilización, en un rango de 9,88 a 11,44 t.ha<sup>-1</sup>, incluyendo el nivel correspondiente a la sola aplicación del faltante azufre, por información del análisis de suelos; mientras que San Isidro presentó su mayor rendimiento, con el nivel 112,5-50-25 Kg.ha<sup>-1</sup>, de calcio magnesio y azufre. La variedad comercial Alcalá y la línea con gen afila L28, con la aplicación del azufre faltante, tuvieron rendimientos similares a los obtenidos con otros niveles completos de fertilización. La línea L27 presentó rendimientos similares, entre los niveles completos de fertilización, superando a la aplicación con base en análisis de suelo (Tabla 5).

Aunque el análisis de suelos mostró cantidades suficientes para satisfacer los requerimientos de calcio, magnesio y azufre en los sitios experimentales, se encontró efecto significativo de los diferentes niveles de fertilización sobre número de vainas por planta, peso de vaina con grano y rendimiento, en comparación con el testigo.

Tabla 4. Comparación de promedios de componentes de rendimiento por niveles de Ca-Mg-S en cinco Municipios de Nariño.

Nivel de Ca-Mg-S. (kg.ha <sup>-1</sup> )	Municipios				
	Gualmatán	Pupiales	Puerres	Ipiales	Potosí
<b>Número de vainas por planta</b>					
135-60-30	25,48 b	44,10 a	18,13 a	27,11 a	20,19 ab
112,5-50-25	26,96 a	31,28 a	15,76 a	26,22 a	20,89 a
90-40-20	25,21 b	36,09 a	16,45 a	26,04 a	20,61 ab
67,5-30-15	25,55 b	36,39 a	15,02 a	26,29 a	20,18 ab
Análisis	24,47 b	33,39 a	12,56 b	26,87 a	18,33 b
<b>Peso de vaina con grano (gramos)</b>					
135-60-30	8,41 a	6,06 a	8,38 ab	6,83 a	8,08 a
112,5-50-25	8,38 a	6,11 a	8,45 ab	6,81 a	8,58 a
90-40-20	8,38 a	6,05 a	8,62 a	6,65 a	7,85 a
67,5-30-15	8,16 a	5,98 a	8,62 a	6,66 a	8,29 a
Análisis	8,15 a	5,96 a	7,95 b	6,80 a	7,94 a
<b>Rendimiento en vaina verde (t.ha<sup>-1</sup>)</b>					
135-60-30	10,53 ab	16,05 ab	8,66 a	8,37 a	10,00 ab
112,5-50-25	10,8 a	16,95 a	7,76 ab	8,19 a	10,37 a
90-40-20	10,40 ab	15,63 b	7,99 ab	8,07 a	9,86 ab
67,5-30-15	10,13 ab	14,96 b	7,86 ab	8,05 a	10,13 ab
Análisis	9,59 b	14,89 b	6,62 b	8,46 a	9,16 b

Promedios con letras distintas tienen diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

Tabla 5. Interacción del rendimiento (t.ha<sup>-1</sup>) de genotipos de arveja con diferentes niveles de fertilización. Ipiales, 2018.

Niveles de Ca-Mg-S kg.ha <sup>-1</sup>	San Isidro	Sureña	Alcalá	L27	L28
135-60-30	8,16 b	9,88 a	9,47 a	7,65 a	6,68 b
112,5-50-25	11,05 a	10,00 a	6,24 b	6,32 a	9,75 a
90-40-20	8,00 b	10,87 a	6,24 b	6,94 a	6,82 b
67,5-30-15	7,85 b	10,44 a	6,08 b	7,37 a	8,49 a
Análisis	8,13 b	11,01 a	8,69 a	5,25 b	9,22 a

Promedios con letras distintas tienen diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

Las condiciones de los suelos de los sitios experimentales, características de los órdenes Andisol e Inceptisol, en condiciones naturales, presentan textura arenosa, baja saturación de bases y, en consecuencia, deficiencias en calcio y magnesio. Estos suelos, dedicados a la siembra de arveja y papa, han sido fertilizados con altas cantidades de elementos mayores y aplicaciones recurrentes de cal, lo cual, puede hacer que se registren altas cantidades de calcio y magnesio en los análisis de suelo, como se muestra en la tabla 1; no obstante, la respuesta de los rendimientos a la aplicación de estos

nutrientes puede ser, probablemente, a que su disponibilidad sea limitada por otros factores (Gómez & Castro, 2013).

De acuerdo con Zhang *et al.* (2021), la disponibilidad del magnesio en el suelo depende de condiciones, como la textura, la capacidad de intercambio y del mismo cultivo; de igual manera, la respuesta del cultivo al magnesio está correlacionada con las condiciones del suelo. En un pH menor de 6,5, el incremento medio de rendimiento fue de 11,3 %.

Al respecto, García R. & Pantoja L. (1993) manifiestan que existe una relación calcio/magnesio alta, en los suelos del altiplano de Nariño, que conduce a la deficiencia de magnesio, de la tasa de fotosíntesis y disminución de los rendimientos de los cultivos. Asimismo, Kraft & Pflieger (2001) anotan que la deficiencia de magnesio es un problema potencial en suelos arenosos y ácidos. Según Barber (1995), en cuanto a las interacciones negativas o “competencias” entre los nutrientes y la absorción por las plantas, se consideran importantes las relaciones antagónicas  $K^+$  sobre  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  sobre  $Mg^{2+}$ . De acuerdo con León (1994), en general, se puede decir que los contenidos muy altos de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  disminuyen la absorción del  $K^+$ .

En Ipiales, se encontró interacción significativa, que indica una respuesta diferencial de los genotipos, a través de los niveles de fertilización evaluados. La variedad Sureña presentó rendimientos similares para todos los niveles de fertilización, en un rango de 9 a 11,44 t.ha<sup>-1</sup>, incluyendo el nivel correspondiente a la aplicación del faltante azufre, establecido por la información del análisis de suelos, mientras que la variedad San Isidro presentó su mayor rendimiento con el nivel 112,5-50-25 kg.ha<sup>-1</sup>, de calcio magnesio y azufre, respectivamente.

Alcalá y L28 tuvieron un mayor rendimiento con la fertilización testigo, mientras los genotipos San Isidro y L27, respondieron a los niveles superiores de fertilización (Tabla 5). De estos resultados, se deduce que los genotipos evaluados tienen diferencias en los requerimientos nutricionales, para los elementos Ca, Mg y S, lo cual, podría estar relacionado con el potencial de rendimiento de los mismos, derivado de su composición genética y de su interacción con el ambiente, en el cual, se encuentra la oferta de nutrientes para su cultivo.

En la presente investigación, la prueba de t adicional para tratamientos cruzados mostró que la variedad Sureña con el tratamiento establecido con el análisis de suelos, donde se aplicó el azufre faltante, superó a nivel del 5 % de probabilidad a San Isidro, Alcalá y a las líneas con gen afila L27 y L28, con los demás niveles de fertilización completos. Con estos resultados, se aprecia que, para algunos genotipos, como la variedad Sureña, hay efecto del azufre faltante en los cuatro sitios experimentales.

Estudios demuestran que el azufre es importante para el crecimiento adecuado, las actividades metabólicas y el desarrollo de las plantas. La cantidad de azufre necesaria para producir una tonelada de

semilla es de unos 3-4 kg de azufre, para cereales (rango 1-6); 8 kg de Azufre, para cultivos de leguminosas (rango 5-13) y 12 kg de Azufre, para cultivos oleaginosos (rango 5-20). En las plantas la absorción de sulfato, la asimilación reductora y la integración en cisteína y metionina son los procesos centrales que dirigen las formas oxidadas y reducidas de azufre a sus diversas funciones (Abou Seeda *et al.* 2020), por lo tanto, el azufre se reconoce como un cuarto nutriente vegetal principal, después de N, P y K. En promedio, los cultivos absorben azufre tanto como absorben fósforo (Saket *et al.* 2017).

El azufre es un componente esencial en el desarrollo de clorofila y la síntesis de proteínas y en el caso de las leguminosas, las bacterias rizobianas asociadas, requieren de azufre para la fijación de nitrógeno (Oldham, 2011; Saket *et al.* 2017).

Con la nutrición adecuada de P y S, para variedades de arveja, se producirían relativamente más cantidad de hojas funcionales y, en consecuencia, área de fotosíntesis, por lo tanto, aumento de fotoasimilados (Sharma *et al.* 2006; Singh & Singh, 2017).

Por otra parte, en la interacción genotipo por ambiente, los resultados obtenidos muestran que las líneas con gen afila L3 y L18 igualaron los rendimientos de las variedades comerciales Sureña, Alcalá y San Isidro, en Potosí y Pupiales, no así en Gualmatán, donde fueron superadas por la variedad San Isidro. Las líneas con gen afila L27 y L28 igualaron estadísticamente los rendimientos de las variedades comerciales Sureña y Alcalá, en Puerres y fueron superadas por Sureña, en Ipiales. Lo anterior, pone en evidencia la repuesta diferencial de los genotipos, a través de los ambientes en donde se realizó la evaluación (Tabla 6). En general, se observa que las líneas con gen afila L3, L18, L27 y L28, lograron rendimientos estadísticamente similares con, al menos, dos de los genotipos comerciales no afila (Alcalá, San Isidro y Sureña), en las diferentes localidades, lo cual, indica que el remplazo de hojas por zarcillos, derivado de la presencia del gen afila, en las líneas mencionadas, no constituye un factor de reducción de los rendimientos. Entre las bondades de los genotipos con gen afila, se pueden mencionar la menor afección por patógenos foliares, como consecuencia de la mayor circulación de aire en el dosel, con lo cual, se reduce la presión de las enfermedades sobre el follaje (Porter *et al.* 2014). En las variedades con gen afila, se pueden combinar la resistencia al acame, la menor evapotranspiración y la reducción de enfermedades foliares, por la ausencia de hojas (Parihar *et al.* 2020); el gen afila (*af*) y el gen de la altura de planta (*Le*) explican la mayor parte de la variación en el acame de las plantas de arveja (Smitchger

Tabla 6. Rendimiento de arveja voluble por genotipo, en cinco municipios del departamento de Nariño (Ton.ha<sup>-1</sup>).

Genotipos	Gualmatán	Pupiales	Potosí	Genotipos	Puerres	Ipiales
Alcalá	10,70 ab	17,17 a	11,52 a	Alcalá	9,56 a	7,15 bc
San Isidro	12,07 a	17,20 a	10,12 a	S.Isidro	3,74 b	8,64 b
Sureña	10,46 ab	15,66 a	10,49 a	Sureña	8,70 a	10,45 a
L3	9,43 b	15,30 a	9,93 a	L27	9,46 a	6,71 c
L18	8,81 b	13,17 a	7,45 a	L28	7,43 a	8,19 bc

Promedios con letras distintas tienen diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

& Weeden, 2019). De igual manera, las variedades con gen afila pueden alcanzar alta productividad y ser altamente eficientes en el uso del agua, lo cual, les da la ventaja de tener mayor tolerancia a la sequía, permitiendo menor pérdida de agua por transpiración. Adicionalmente, con el remplazo de hojas por zarcillos es posible aumentar la densidad de población por unidad de área, lo cual, contribuye a aumentar el rendimiento (Pantoja G. *et al.* 2014).

De la presente investigación, se concluye que en las condiciones en las cuales se llevaron a cabo los experimentos hay respuesta de la arveja voluble a la aplicación de niveles medios y altos de calcio, magnesio y azufre, aun cuando los análisis de suelos presentaron cantidades suficientes para satisfacer el requerimiento del cultivo. En Ipiales, se encontró interacción del genotipo y el nivel de fertilización, que indica que los genotipos evaluados tienen diferencias en los requerimientos nutricionales para los elementos Ca, Mg y S, resultando menos exigentes Alcalá, Sureña y L28.

**Agradecimientos.** Los autores manifiestan su agradecimiento al Grupo Cultivos Andinos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, por su apoyo en el manejo de los ensayos de campo; al Centro Internacional de Producción Limpia, Sena Lope Seccional Nariño, por prestar sus instalaciones para el desarrollo de la presente investigación. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. ABOU SEEDA, M.A.; ABOU EL-NOUR, E.A.A.; YASEEN A.A.; GAD MERVAT, M.; SAHAR M., Z. 2020. Importance of sulfur and its roles in Plants physiology: A Review. *Current Science International*. 9(2):198-231. <https://doi.org/10.36632/csi/2020.9.2.18>
2. BARBER, S.A. 1995. *Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach*. 2nd edition. Wiley (New York). 432p.
3. CASTRO MÉNDEZ, C.E. 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Nariño. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. 253p.
4. CHECA, Ó. 2016. La arveja una zona de experiencia positiva de la investigación para los pequeños productores de la zona andina de Nariño. *El cerealista*. 119:44-47.
5. CHECA, O.E.; RODRIGUEZ, M.; WU, X.; BLAIR, M.W. 2020. Introgression of the *Afla* Gene into Climbing Garden Pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomy*. 10(10):1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101537>
6. CHECA CORAL, Ó.E.; GETIAL PANTOJA, J.A.; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, D.M. 2020. Evaluación de ocho líneas de arveja arbustiva (*Pisum sativum* L.) en seis ambientes de la zona cerealista de Nariño. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 23(1):e1211. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1211>
7. FERRARIS, G.; COURETOT, L.S. 2014. Experimentos de nutrición en el cultivo de arveja. Campaña 2012/13. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA. 1-7.
8. GARCÍA R., B.; PANTOJA L., C. 1993. Fertilización y manejo de suelos en el cultivo de papa en el departamento de Nariño. Instituto Colombiano Agropecuario-ICA (San Juan de Pasto). 55p.
9. GLIESSMAN, S.R. 2002. *Agroecología. Procesos ecológicos en Agricultura Sostenible*. Ed. Litocat (Costa Rica). 359p.
10. GÓMEZ, M.I. 2006. *Manual técnico de fertilización de cultivos*. Microfertifera (Bogotá. Colombia). 116p.
11. GÓMEZ, M.I.; CASTRO, H.E. 2013. Fertilidad de suelos y fertilizantes. En: Burbano Orjuela, H.; Silva Mojica, F. (Eds.). *Ciencia del suelo: principios básicos*. 2ed. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Bogotá, D.C., Colombia). p.217-218.
12. KRAFT, J.M.; PFLEGER, F. 2001. *Compendium of pea diseases and pests*. 2nd Edition. American Phytopathological Society (Minneapolis). 67p.
13. LAURENÇO, S.; CROCOMO, O.J.; NOGUEIRA, I.R.; MALAVOLTA, E. 1968. Kinetic studies of Phosphorus uptake by excise roots of barley in the presence of magnesium. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 40(2):171-179.
14. LEÓN, L.A. 1994. Evaluación de la fertilidad del suelo. En: Silva Mojica, F. (ed). *Fertilidad de suelos: diagnóstico y control*. Sociedad colombiana de la Ciencia del Suelo (Bogotá, Colombia). p.155-186.
15. LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. 1997. *Métodos estadísticos para la investigación agropecuaria*. Ed. Trillas (México). 270p.
16. MÚNERA VÉLEZ, G.A.; MEZA SEPULVEDA, D.C. 2012. El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira. 52p.
17. OLDHAM, J.L. 2011. *Secondary plant nutrients: Calcium, magnesium, and sulfur*. Mississippi State University. 2p.
18. PANTOJA G., D.; MUÑOZ Z., K.; CHECA C., O. 2014. Evaluación y correlación de componentes de rendimiento en líneas avanzadas de arveja *Pisum sativum* con gen afila. *Revista De Ciencias Agrícolas*. 31(2):24-39. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.143102.29>
19. PARIHAR, A.K.; DIXIT, G.P.; BOHRA, A.; GUPTA, D.S.; SINGH, A.K.; KUMAR, N.; SINGH, D.; SINGH, N.P.

2020. Genetic advancement in dry pea (*Pisum sativum* L.): Retrospect and prospect. En: Singh Gosal, S.; Hussain Wani, S. (eds.). Accelerated plant breeding. volume 3. Springer Cham (Switzerland). p.283-341.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-47306-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47306-8_10)
20. PATEL, M.P.; RICHHARIYA, G.P.; SHARMA, R.D.; NAMDEO, K.N. 2012. Effect of fertility levels on nutrient contents and uptake of soybean (*Glycine max*) genotypes. Crop Research (India). 44(1-2):71-74.
21. PORTER, L.D.; KRAFT, J.M.; GRÜNWALD, N.J. 2014. Release of pea germplasm with fusarium resistance combined with desirable yield and anti-lodging traits. Journal of Plant Registrations. 8(2):191-194.  
<https://doi.org/10.3198/jpr2013.07.0041crg>
22. REYES CASTAÑEDA, P. 1978. Diseño de experimentos agrícolas. Trillas (México). 344p.
23. RIASCOS DELGADO, M.E.; CHECA CORAL, O.E. 2018. Evaluación y selección de líneas de arveja con gen aflu bajo dos densidades de población. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 21(2):367-376.  
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.984>
24. SAKET, R.; AGNIHOTRI, S.; PATEL, A.K.; AHIRWAR, M.K.; NAMDEO, K.N. 2017. Effect of phosphorus and sulphur on chlorophyll, yield components and yield of field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. Annals of plant and soil research. (India). 19(3):284-287.
25. SAKET, S.; SINGH, S.B.; NAMDEO, K.N.; PARIHAR, S.S. 2014. Effect of organic and inorganic fertilizer on yield, quality and nutrients uptake of lentil. Annals of Plant and Soil Research (India). 16(3):238-241.
26. SHARMA, J.; NAMDEO, K.N.; SHRIVASTAVA, K.B.L.; PATEL, A.K.; TIWARI, O.P. 2006. Effect of fertility levels, growth regulators and biofertilizers on nutrient contents and uptake of field pea (*Pisum sativum* L.). Crop Research (India). 32(2):192-195.
27. SINGH, D. 2017. Effect of sources of phosphorus on growth, yield and nutrient uptake in pea (*Pisum sativum*). Annals of Plant and Soil Research (India). 19(2):240-242.
28. SINGH, M.; UPADHYAYA, H.D.; BISHT, I.S. 2013. Genetic and genomic resources of grain legume improvement. Elsevier (London). 305p.  
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-00217-7>
29. SINGH, R.; SINGH, A.P. 2017. Effect of phosphorus, sulphur and biofertilizers on yield, quality of uptake of nutrients in cowpea (*Vigna unguiculata*). Annals of Plant and Soil Research (India). 19(2):175-179.
30. SMITCHGER, J.; WEEDEN, N. 2019. Quantitative trait loci controlling lodging resistance and other important agronomic traits in dry field peas. Crop Science. 59(4):1442-1456.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci2018.04.0260>
31. WAINWRIGHT, M. 1984. Sulfur oxidation in soils. Advances in Agronomy. 37:349-396.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60458-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60458-7)
32. ZHANG, Q.; TANG, D.; YANG, X.; GENG, S.; HE, Y.; CHEN, Y.; YI, X.; NI, K.; LIU, M.; RUAN, J. 2021. Plant availability of magnesium in typical tea plantation soils. Frontiers in Plant Science. 12.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.641501>



# ***Bacillus mycooides* y ácidos húmicos como bioestimulantes de fríjol caupí bajo estrés por salinidad**

## ***Bacillus mycooides* and humic acids as biostimulants of cowpea under salinity stress**

Jocelyn Beleño-Carrillo<sup>1\*</sup> ; Liliana Gómez-Gómez<sup>2</sup> ; Nelson Osvaldo Valero-Valero<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Popular del Cesar, Grupo de Investigación en Microbiología Agrícola y Ambiental. Valledupar - Cesar, Colombia; e-mail: [jocelynbeleno@unicesar.edu.co](mailto:jocelynbeleno@unicesar.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad Popular del Cesar, Facultad de Ciencias Básicas y Educación. Valledupar - Cesar, Colombia; e-mail: [lilianagomez@unicesar.edu.co](mailto:lilianagomez@unicesar.edu.co)

<sup>3</sup>Universidad de La Guajira, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas. Riohacha - Guajira, Colombia; e-mail: [nvalerov@uniguajira.edu.co](mailto:nvalerov@uniguajira.edu.co)

\*autor de correspondencia: [jocelynbeleno@unicesar.edu.co](mailto:jocelynbeleno@unicesar.edu.co)

**Cómo citar:** Beleño-Carrillo, J.; Gómez-Gómez, L.; Valero-Valero, N.O. 2022. *Bacillus mycooides* y ácidos húmicos como bioestimulantes de fríjol caupí bajo estrés por salinidad. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1974. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1974>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** noviembre 25 de 2021

**Aceptado:** noviembre 16 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### **RESUMEN**

Los bioestimulantes tienen gran potencial en la agricultura, no solo por aumentar el crecimiento de las plantas, sino porque también promueven la tolerancia frente a diferentes tipos de estrés. En este estudio, se evaluó el efecto de dos bioestimulantes *Bacillus mycooides*, inmovilizado en perlas de alginato y ácidos húmicos (AH), en plantas de fríjol caupí, cultivadas en un suelo salino, bajo los siguientes tratamientos: 1) solución de AH, mediante aspersión foliar, 2) suspensión de *B. mycooides*, inmovilizado en perlas aplicado en la rizósfera y 3) solución de AH + suspensión de *B. mycooides* inmovilizado; el tratamiento control fueron plantas sin aplicación de bioestimulantes. Se determinó el contenido hídrico relativo, el índice de contenido de clorofila, además del contenido de prolina y polifenoles, como indicadores de tolerancia al estrés. El tratamiento 3 generó un aumento de 11,27 % en el contenido hídrico relativo, mientras que con el tratamiento 2, se observó un incremento significativo del 48,33 %, en el índice de contenido de clorofila y del 49,07 %, en el contenido de prolina, lo cual, se sugiere la estimulación de mecanismos de tolerancia frente al estrés salino. La activación de estos mecanismos, observada con tratamientos que

incluyen la inmovilización de *B. mycooides*, sugiere que esta forma de aplicación de la bacteria puede contribuir a mejorar las condiciones de crecimiento de plantas de fríjol caupí sometidas a estrés salino y puede ser probada en otras plantas de interés agrícola, en regiones afectadas por la salinidad.

Palabras clave: Ácidos húmicos; *Bacillus mycooides*; Bioestimulantes; salinidad; estrés.

### **ABSTRACT**

Biostimulants have great potential in agriculture enhancing plant growth as well as stimulating tolerance to different types of stress. In this study, the effect of two biostimulants, *Bacillus mycooides* immobilized in alginate beads and humic acids (HA), was evaluated in cowpea plants grown in saline soil, following treatments were evaluated: 1) HA solution applied through foliar spray, 2) suspension of immobilized *B. mycooides* in beads applied around in the rhizosphere and 3) HA solution + immobilized *B. mycooides* suspension. Plants without biostimulant application were considered as control treatment. Relative water content (RWC),

chlorophyll content index (CCI), proline, and polyphenol content were determined as indicators of stress tolerance mechanisms expression. Treatment 3 generated an increase of 11.27 % in RWC, while with treatment 2 a significant increase of 48.33 % in CCI and 49.07 % in proline content was observed; these results suggest the stimulation of tolerance mechanisms against salt stress. Effects exhibited after the treatments with immobilized *B. mycooides* suggest that this way of application of the bacteria can contribute to improving the growth and adaptation of cowpea plants subjected to salt stress and can be tested in other plants of agricultural interest over saline stress affection.

Keywords: *Bacillus mycooides*; Biostimulants; Humic acids; Salinity; stress.

## INTRODUCCIÓN

La salinización de los suelos es una forma de degradación, que disminuye drásticamente su calidad y su capacidad productiva. Alrededor del 20 % de las tierras de riego, que producen un tercio de los alimentos del mundo, están afectadas por la salinidad (Machado & Serralheiro, 2017). La concentración de sales conlleva a la degradación de los suelos, al disminuir la porosidad y la permeabilidad e incrementar la compactación (Mata-Fernández *et al.* 2014).

Indistintamente del origen de la salinidad natural o antrópica, en zonas con baja precipitación, se pueden presentar procesos de salinización, debido a que la evaporación del agua deja en el suelo sales que no son disueltas, ni redistribuidas y, por tanto, se acumulan (Mazuela Águila, 2013). Las plantas sometidas a estrés salino pueden presentar disminución en la tasa de germinación, disminución en la longitud del tallo y del área foliar, menor desarrollo de las raíces y número de frutos y reducción en el peso fresco del tallo y las hojas (Can Chulim *et al.* 2014; Goykovic Cortés & Saavedra Del Real, 2007; Cardona *et al.* 2018). Los efectos negativos de la salinidad en las plantas se presentan porque este fenómeno genera toxicidad, desbalance nutricional, incremento de especies reactivas del oxígeno, pero, principalmente, estrés hídrico, el cual, reduce la capacidad de las plantas de obtener agua, generando un déficit en el potencial osmótico y, por tanto, produce cambios metabólicos similares a los causados por el marchitamiento (Machado & Serralheiro, 2017).

Una opción para mejorar el crecimiento y el desarrollo de las plantas de cultivo bajo condiciones de estrés salino es la aplicación de bioestimulantes, debido a que estos agentes tienen efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, pero también pueden tenerlo sobre la tolerancia a distintos tipos de estrés biótico y abiótico (Van Oosten *et al.* 2017). La adaptación o tolerancia a la salinidad está regulada por mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos; algunos de estos son: homeostasis iónica, activación de enzimas o compuestos antioxidantes, acumulación de solutos compatibles y protección osmótica (Gupta & Huang, 2014). En este sentido, bioestimulantes, como las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) y los ácidos húmicos (AH), han demostrado diferentes beneficios para las plantas contribuyendo, tanto a la

estimulación de su crecimiento como a la mejora en la tolerancia, cuando crecen en condiciones de estrés salino (Ouni *et al.* 2014; Sánchez López *et al.* 2016; Esringü *et al.* 2016).

La zona norte del departamento del Cesar presenta suelos con alta susceptibilidad a la salinización (IDEAM *et al.* 2017), esta situación se acentúa en el corregimiento de Guacoche, en el municipio de Valledupar, debido a las bajas precipitaciones propias del clima semiárido (OTEC, 2015). Estas condiciones pueden afectar la productividad en cultivos de importancia para la agricultura familiar, entre ellos, el frijol caupí, reconocido por su alto contenido proteico y de minerales esenciales. La relevancia de este cultivo en el municipio de Valledupar, se refleja al registrar la mayor cantidad de productores en la región Caribe (Martínez Reina *et al.* 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se evaluó el efecto de la aplicación de dos agentes bioestimulantes, *Bacillus mycooides* y AH sobre el crecimiento de plantas de frijol caupí, en un suelo que presenta condiciones de estrés salino, determinando variables relacionadas con la expresión de mecanismos de tolerancia a la salinidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Preparación de los bioestimulantes.** La cepa *Bacillus mycooides* str. BGSC1-DN3 fue obtenida de la colección de bacterias promotoras de crecimiento vegetal del laboratorio del Grupo de investigación en Microbiología Agrícola y Ambiental, de la Universidad Popular del Cesar. Esta cepa fue previamente tipificada, mediante análisis de secuenciación del gen ribosomal 16S; en ensayos previos (datos no publicados), esta bacteria promovió el crecimiento en plántulas de frijol caupí y maíz, en condiciones de laboratorio. Otras cepas de *B. mycooides* han estimulado el crecimiento de plantas, como papa, girasol y tomate (Ambrosini *et al.* 2016; González F. & Fuentes M., 2017; Yi *et al.* 2018). A partir de un cultivo de la cepa en caldo nutritivo, se preparó un inóculo de *B. mycooides*, a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, ajustada mediante espectrofotometría, hasta alcanzar una absorbancia de 0,2, a una longitud de onda de 600 nm. Se siguió un protocolo de inmovilización celular, desarrollado entre el grupo de Microbiología Agrícola y el grupo DSP-ASIC Builden Group, de la Universidad Popular del Cesar, para encapsular las células de *B. mycooides* presentes en el inóculo bacteriano, utilizando alginato de sodio comestible al 1 % y una solución de cloruro de calcio al 4 %, en un dispositivo extrusor de perlas de alginato.

Los AH, se obtuvieron a partir de un carbón de bajo rango tipo lignito, mediante solubilización bacteriana del carbón, siguiendo el protocolo descrito por Valero *et al.* (2014), empleando una cepa de *Microbacterium* sp. A partir de este método de extracción bacteriano, se pueden obtener AH con diferencias en su estructura supramolecular, las cuales, están relacionadas con un mayor grado de bioactividad frente a los AH, obtenidos de manera tradicional (Valero *et al.* 2018). Posteriormente, se preparó una solución de AH, a una concentración de 100 mg L<sup>-1</sup> de AH, en cloruro de calcio 2 mM.

**Desarrollo del experimento.** El estudio, se realizó en un terreno periurbano, ubicado en el corregimiento de Guacoche (Valledupar), a una latitud de 10°49'72.71" N y longitud 73°16'74.88" O; este predio ha estado dedicado tradicionalmente a la agricultura familiar. El suelo presenta un pH de 7,8, un alto contenido de iones de calcio, magnesio, sodio, sulfatos y bicarbonatos y una conductividad eléctrica de 5,8 dS m<sup>-1</sup>, medida en el extracto de saturación, por lo que se clasifica como suelo salino (Shahid *et al.* 2018).

El experimento, se estableció bajo un diseño en bloques completos al azar, con 4 tratamientos, 2 bloques y 6 repeticiones por tratamiento. Para el establecimiento del experimento, se hicieron surcos de 30 cm de ancho, con una distancia de 60 cm entre ellos, se sembraron semillas de fríjol caupí a dos o tres centímetros de profundidad, colocando una semilla de frijol por sitio y a una distancia de 20 cm entre plantas.

Después de ocho días de la siembra, tras la emergencia de las plántulas, se aplicaron los siguientes tratamientos: 1) bioestimulación de la planta, aplicando AH en solución, mediante aspersión foliar (AH); 2) bioestimulación de la planta, aplicando en la rizosfera una suspensión del inóculo de *B. mycooides*, inmovilizado en perlas de alginato (P) y 3) bioestimulación de la planta, mediante aplicación combinada de la solución de AH por aspersión foliar y la suspensión de *B. mycooides* inmovilizado (PAH). Las plantas sin aplicación de bioestimulantes, se tomaron como tratamiento control. Se aplicó riego por aspersión cada tres días, el control de malezas se realizó de forma manual.

**Variables evaluadas.** 70 días después de la germinación, se registraron las mediciones de las variables respuesta. Para ello, se escogieron al azar doce plantas por tratamiento, para medir los siguientes parámetros indicadores de tolerancia al estrés: 1) contenido hídrico relativo (CHR), 2) índice de contenido de clorofila, 3) concentración de prolina y 4) concentración de polifenoles.

Para la determinación de CHR, se midió la masa fresca de tres hojas por planta; luego, las hojas se colocaron en cámara húmeda por dos horas, para llevarlas a saturación hídrica. Posteriormente, se retiraron las hojas, se removió el exceso de agua y se determinó el peso en condición de turgencia y después se secaron las hojas, en un horno en horno a 70 °C, hasta peso constante, para medir la masa seca. El CHR, se calculó aplicando la expresión  $CHR = \frac{mf - ms}{mt - ms} \times 100$ , donde, *mf* masa fresca, *ms* masa seca y *mt* masa a plena turgencia (Melgarejo *et al.* 2010).

Para estimar el contenido total de clorofila, se empleó el medidor de clorofila CCM 200 plus Opti ciencias. Los medidores portátiles no destructivos se han utilizado con éxito en algunas especies, registrando altas correlaciones con la determinación de clorofila en laboratorio (Mendoza-Tafolla *et al.* 2022). Las lecturas, se realizaron en tres hojas del tercio medio de cada planta, tomando este dato en cinco ubicaciones aleatorias para cada hoja; las cinco lecturas, se promediaron para obtener una sola lectura por hoja.

La determinación de prolina, se realizó a partir de un macerado de hojas frescas, utilizando nitrógeno líquido; se agregaron 10

mL de etanol grado reactivo por cada gramo de tejido macerado. La mezcla, se dejó reposar 12 horas a 4 °C y, posteriormente, fue centrifugada a 3000 rpm, por 10 min. El contenido de prolina fue medido por espectrofotometría, utilizando una mezcla de reacción de ninhidrina en ácido acético, etanol y agua, según el método propuesto por Carillo & Gibon (2011).

Los polifenoles, se cuantificaron a partir de un extracto obtenido al pesar 1 g de hojas pulverizadas, al cual, se adicionaron 10 mL de metanol al 96 % y se dejó reposar por dos horas. Posteriormente, se agregó el reactivo Folin- Ciocalteu y una solución de NaCO<sub>3</sub> al 20 % y se midió la absorbancia a 760 nm, siguiendo el protocolo descrito por Salgado-Chávez *et al.* (2020). La concentración de polifenoles fue estimada con base en una curva estándar de ácido gálico, usado como patrón de referencia para la determinación de compuestos fenólicos y se expresó en términos de mg/g EAG (equivalente de ácido gálico).

**Análisis estadístico.** Para cada una de las variables registradas, se determinaron los parámetros de normalidad de los datos, se realizó el análisis de varianza y la prueba de Tukey, para determinar diferencias significativas entre tratamientos, además de la correlación de Pearson, para determinar la relación entre las variables, con una confianza del 95 %, mediante el programa estadístico Minitab 18.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice de contenido de clorofila presentó incremento en todas las plantas sometidas a los tratamientos con bioestimulantes, con respecto a las plantas del tratamiento control (Tabla 1), se observa un aumento del 48,33 %, estadísticamente significativo, en respuesta al tratamiento P.

La disminución en el contenido de clorofila es una respuesta común de las plantas ante factores causantes de estrés, como la salinidad, que reducen los niveles de pigmentos fotosintéticos, ya sea que inhiban la síntesis de precursores de los pigmentos o afecten estructuralmente los cloroplastos (Chávez Suárez *et al.* 2015), de modo que los fotosistemas absorben luz de manera poco eficiente, reduciendo su capacidad fotosintética (Liu *et al.* 2018). Por tanto, el incremento en el contenido de clorofila observado en respuesta a la aplicación de este tratamiento, se puede relacionar como efecto asociado en la mitigación del estrés. Esta observación concuerda con resultados previos reportados por Chen *et al.* (2016), quienes encontraron que el contenido de clorofila aumentó significativamente en plantas de maíz, con la inoculación de la bacteria *Bacillus amyloliquefaciens*, en condiciones de estrés salino. Igualmente, Li & Jiang (2017) observaron protección contra la salinidad con un incremento en el contenido de clorofila en maíz, al aplicar *B. aquimaris*.

Los valores de prolina fueron superiores en las plantas sometidas al tratamiento P, con un aumento del 49,07 %, siendo estadísticamente significativa la diferencia respecto a los demás tratamientos (Tabla 1). El incremento en la síntesis y posterior acumulación de prolina en plantas estresadas, no solo como producto de la inducción de la biosíntesis, sino por la inactivación de la degradación de este

Tabla 1. Valores medios de clorofila, contenido hídrico relativo, prolina y polifenoles, en plantas de frijol caupí, en respuesta a la aplicación de *B. mycooides* y ácidos húmicos.

Tratamiento	Clorofila (CCI)	CHR (%)	Prolina (%)	Polifenoles (mg/g EAG)
P	88,92±22,9 <sup>a</sup>	64,99±6,4 <sup>ab</sup>	8,05±2,5 <sup>a</sup>	1,84±0,5 <sup>a</sup>
PAH	66,96±29 <sup>ab</sup>	65,19±7,9 <sup>a</sup>	6,61±1,6 <sup>ab</sup>	1,83±0,7 <sup>a</sup>
AH	66,64±19,7 <sup>ab</sup>	58,76±2,2 <sup>b</sup>	5,40±2,0 <sup>b</sup>	2,11±1,1 <sup>a</sup>
Control	59,77±13,2 <sup>b</sup>	58,41±4,4 <sup>b</sup>	5,04±0,9 <sup>b</sup>	2,72±1,0 <sup>a</sup>

CHR=Contenido hídrico relativo; Tratamientos bioestimulación de la planta aplicando en la rizosfera; P= suspensión del inóculo de *B. mycooides* inmovilizado en perlas de alginato; PAH= solución de ácidos húmicos + suspensión de *B. mycooides* inmovilizado; AH=solución de ácidos húmicos.

Los promedios con diferente letra son estadísticamente significativos,  $p \leq 0,05$ .

aminoácido (Reddy *et al.* 2004), es un indicador de tolerancia al estrés, debido a que la prolina es uno de los principales solutos compatibles que se acumulan en las plantas sometidas a estas condiciones y se produce como resultado de un mecanismo de ajuste osmótico, que permite mantener la absorción de agua y la presión de turgencia, evitando los daños causados por el desbalance hídrico. La prolina, también está relacionada con la estabilización de estructuras sub-celulares, membranas, proteínas y eliminación de radicales libres (Pereyra Cardozo & Quiriban, 2014), por lo que promueve ciertas funciones celulares, que le permiten a la planta mitigar las condiciones adversas de crecimiento.

De acuerdo con lo anterior, el incremento en el contenido de prolina observado en respuesta a la aplicación de *B. mycooides*, inmovilizado en perlas, se puede deber a la activación de este mecanismo de osmorregulación, el cual, pudo contribuir a que las plantas mantuvieran un buen estado fisiológico y aminorar el estrés salino, reflejado en el aumento del contenido hídrico y de clorofila, variables con las que se observó una correlación positiva (Tabla 2).

La acumulación de prolina, como efecto de la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, se reporta en frijol caupí, por Manaf & Zayed (2015), quienes evidenciaron incrementos de prolina en presencia de micorrizas y *Pseudomonas fluorescens*, al aumentar los niveles de sales, así como Bano & Fatima (2009), quienes coinocularon cepas de *Rhizobium* sp. y *Pseudomonas* sp. en maíz, afectado por la salinidad. Se ha demostrado la capacidad de la prolina, ya sea libre o unida a polipéptidos, para reaccionar directamente con  $H_2O_2$  y  $OH^-$  y formar radicales libres estables (Liang *et al.* 2013). El papel de la prolina, como desintoxicador de radicales libres, ocasionado por PGPR, ha sido evidenciado por Upadhyay *et al.* (2012), al reportar un aumento en el contenido de prolina, mientras que la actividad de las enzimas antioxidantes se redujo significativamente en plantas de trigo, tratadas con *B. subtilis* y *Arthrobacter* sp.

El contenido hídrico relativo (CHR) mostró un aumento significativo en respuesta a la aplicación del tratamiento PAH, con un incremento del 11,61 % (Tabla 1). Teniendo en cuenta

Tabla 2. Correlaciones entre las variables clorofila, contenido hídrico relativo prolina y polifenoles.

Parámetros	Clorofila	CHR	Polifenoles
CHR	0,48*		
Polifenoles	0,28	-0,24	
Prolina	0,42*	0,34*	- 0,26

CHR=Contenido hídrico relativo; Tratamientos bioestimulación de la planta aplicando en la rizosfera; P= suspensión del inóculo de *B. mycooides* inmovilizado en perlas de alginato; PAH= solución de ácidos húmicos + suspensión de *B. mycooides* inmovilizado; AH=solución de ácidos húmicos.

Los promedios con diferente letra son estadísticamente significativos,  $p \leq 0,05$ .

que la salinidad conlleva principalmente al estrés hídrico y, en consecuencia, a la reducción de la capacidad de las plantas de obtener agua, un aumento en esta variable puede denotar una mejora del estado hídrico de las plantas. Este aumento, se puede deber a una disminución en la pérdida de agua regulada por las estomas o una mayor capacidad de absorción y retención de agua, como resultado de un ajuste osmótico (Shtaya *et al.* 2019). Un resultado similar fue obtenido por Saghafi *et al.* (2018), quienes reportaron incrementos en el CHR hasta de un 8,78 %, con cepas de *Rhizobium*, aplicadas en canola bajo estrés salino. En similares condiciones de estrés,

Karlidag *et al.* (2010) observaron un aumento en el contenido hídrico en fresas, al tratarlas con varias cepas PGPR. mientras que, Khorasaninejad *et al.* (2018), reportan un incremento en CHR proporcional a la concentración de AH, aplicados en plantas de *Echinacea purpurea*, bajo estrés hídrico.

En general, los resultados presentados sugieren la activación de mecanismos de ajuste osmótico en las plantas, los cuales, ayudaron a mantener la absorción de agua y la presión de turgencia. El ajuste osmótico, se puede dar por la biosíntesis de osmolitos orgánicos y

la acumulación de iones (Lamz Piedra & González Cepero, 2013); con base en la correlación positiva entre el contenido hídrico y los valores de prolina (Tabla 2), se puede sugerir que el tratamiento de bioestimulación con *B. mycooides* mejoró el estado hídrico de las plantas de frijól caupí, como consecuencia de la acumulación de prolina, como soluto compatible y este efecto es mejorado por la aplicación conjunta de la bacteria y AH. Al respecto, Chen *et al.* (2007) obtuvieron niveles más altos de prolina libre y, en consecuencia, una mayor tolerancia al estrés osmótico, en plantas de *A. thaliana*, al introducirle genes derivados de *B. subtilis*.

El estrés salino puede conllevar al estrés oxidativo, a causa del aumento de las especies reactivas del oxígeno, los cuales, pueden alterar el metabolismo celular (Eyidogan & Öz, 2007). Los polifenoles hacen parte del sistema antioxidante de las plantas y se sintetizan en situaciones de estrés, para proteger las estructuras celulares frente al daño oxidativo. Respecto a la cuantificación de polifenoles, se observó una tendencia a la disminución del contenido en las plantas tratadas con bioestimulantes; sin embargo, para esta determinación, no hubo diferencia significativa entre tratamientos (Tabla 1).

Del presente estudio, se puede concluir, que las afectaciones fisiológicas causadas por estrés salino en plantas de frijól caupí pueden ser atenuadas con la aplicación de bioestimulantes a base de *B. mycooides*, inmovilizado en perlas de alginato, puesto que se evidenció mejora del estado hídrico y la capacidad fotosintética de las plantas, al obtener mayores valores de CHR y clorofila, con tratamientos donde estaba presente esta bacteria. La tolerancia a la salinidad se relacionó con la producción y la acumulación de prolina, soluto compatible asociado con la osmorregulación. Lo observado justifica la continuidad de estudios con la aplicación de *B. mycooides*, inmovilizado en perlas y permite plantear ensayos en otros cultivos de importancia para la agricultura familiar, en regiones con suelos que presenten problemas de salinidad, con miras al desarrollo de un bioinoculante.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen a la Universidad Popular del Cesar, por la financiación del presente estudio, en el marco del proyecto de investigación de convocatoria interna “Efecto del tratamiento con ácidos húmicos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre plantas de interés para la agricultura urbana en el departamento del Cesar”. También, se agradece a la Universidad de La Guajira, por la cooperación técnica para el desarrollo de los trabajos de laboratorio. Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de intereses que coloque en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. AMBROSINI, A.; STEFANSKI, T.; LISBOA, B.B.; BENEDEZZI, A.; VARGAS, L.K.; PASSAGLIA, L.M.P. 2016. Diazotrophic bacilli isolated from the sunflower rhizosphere and the potential of *Bacillus mycooides* B38V as biofertiliser. *Annals of Applied Biology*. 168(1):93-110. <http://dx.doi.org/10.1111/aab.12245>
2. BANO, A.; FATIMA, M. 2009. Salt tolerance in *Zea mays* (L) following inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas*. *Biology and Fertility of Soils*. 45(4):405-413. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-008-0344-9>
3. CAN CHULIM, A.; RAMÍREZ GUERRERO, L.G.; ORTEGA ESCOBAR, H.M.; CRUZ CRESPO, E.; FLORES ROMÁN, D.; SÁNCHEZ BERNAL, E.I.; MADUEÑO MOLINA, A. 2014. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(5):753-763. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v5i5.898>
4. CARDONA, W.A.; GUTIÉRREZ D., J.S.; MONSALVE C., O.I.; BONILLA C., C.R. 2018. Efecto de la salinidad sobre el crecimiento vegetativo de plantas de mora castilla (*Rubus glaucus* Benth.) micorrizadas y sin micorrizar. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 11(2):253-266. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.6109>
5. CARILLO, P.; GIBON, Y. 2011. Protocol: extraction and determination of proline. 4p. Disponible desde Internet en: <http://prometheuswiki.publish.csiro.au/tiki-index.php?page=PROTOCOL%3A+Extraction+and+determination+of+proline> (con acceso 24/05/2019)
6. CHÁVEZ SUÁREZ, L.; ÁLVAREZ FONSECA, A.; RAMÍREZ FERNÁNDEZ, R.; INFANTE FONSECA, S.; CASTRO, L.L.; GARCÍA RODRÍGUEZ, B.; GARCÍA ALCÁNTARA, A.; FONSECA ARIAS, M. 2015. Efecto de la salinidad sobre el contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos en tres genotipos de frijól (*Phaseolus vulgaris* L.). *Centro Agrícola*. 42(3):19-24.
7. CHEN, L.; LIU, Y.; WU, G.; VERONICAN NJERI, K.; SHEN, Q.; ZHANG, N.; ZHANG, R. 2016. Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9. *Physiologia plantarum*. 158(1):34-44. <https://doi.org/10.1111/ppl.12441>
8. CHEN, M.; WEI, H.; CAO, J.; LIU, R.; WANG, Y.; ZHENG, C. 2007. Expression of *Bacillus subtilis proBA* genes and reduction of feedback inhibition of proline synthesis increases proline production and confers osmotolerance in transgenic *Arabidopsis*. *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*. 40(3):396-403. <http://dx.doi.org/10.5483/BMBRep.2007.40.3.396>
9. ESRINGÜ, A.; KAYNAR, D.; TURAN, M.; ERCISLI, S. 2016. Ameliorative effect of humic acid and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on hungarian vetch plants under salinity stress. *Communications in soil science and plant analysis*. 47(5):602-618. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1141922>

10. EYIDOGAN, F.; ÖZ, M.T. 2007. Effect of salinity on anti-oxidant responses of chickpea seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*. 29:485-493. <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-007-0059-9>
11. GONZÁLEZ F, H.; FUENTES M., N. 2017. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista De Ciencias Agrícolas*. 34(1):17-31. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.60>
12. GOYKOVIC CORTÉS, V.; SAAVEDRA DEL REAL, G. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *Idesia (Arica)*. 25(3):47-58. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292007000300006>
13. GUPTA, B.; HUANG, B. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*. 2014:701596. <https://doi.org/10.1155/2014/701596>
14. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM; CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR; UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES U.D.C.A. 2017. Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización. IDEAM. 109p. Disponible desde internet en: [http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/05/Protocolo\\_Salinizacion-DE-SUELOS-.compress.ed.pdf](http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/05/Protocolo_Salinizacion-DE-SUELOS-.compress.ed.pdf) (con acceso 30/04/2021)
15. KARLIDAG, H.; ESITKEN, A.; YILDIRIM, E.; DONMEZ, M.F.; TURAN, M. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria on yield, growth, leaf water content, membrane permeability, and ionic composition of strawberry under saline conditions. *Journal of plant nutrition*. 34(1):34-45. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2011.531357>
16. KHORASANINEJAD, S.; ALIZADEH AHMADABADI, A.; HEMMATI, K. 2018. The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. *Scientia Horticulturae*. 239:314-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.015>
17. LAMZ PIEDRA, A.; GONZÁLEZ CEPERO, M.C. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos tropicales*. 34(4):31-42.
18. LI, H.Q.; JIANG, X.W. 2017. Inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) improves salt tolerance of maize seedling. *Russian Journal of Plant Physiology*. 64:235-241. <https://doi.org/10.1134/S1021443717020078>
19. LIANG, X.; ZHANG, L.; NATARAJAN, S.K.; BECKER, D.F. 2013. Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & redox signaling*. 19(9):998-1011. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5074>
20. LIU, X.; LI, L.; LI, M.; SU, L.; LIAN, S.; ZHANG, B.; LI, X.; GE, K.; LI, L. 2018. AhGLK1 affects chlorophyll biosynthesis and photosynthesis in peanut leaves during recovery from drought. *Scientific reports*. 8:2250. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20542-7>
21. MACHADO, R.M.A.; SERRALHEIRO, R.P. 2017. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*. 3(2):30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>
22. MANAF, H.H.; ZAYED, M.S. 2015. Productivity of cowpea as affected by salt stress in presence of endomycorrhizae and *Pseudomonas fluorescens*. *Annals of Agricultural Sciences*. 60(2):219-226. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2015.10.013>
23. MARTÍNEZ REINA, A.M.; TORDECILLA ZUMAQUE, L.; GRANDETT MARTÍNEZ, L.M.; RODRÍGUEZ PINTO, M. DEL V.; CORDERO CORDERO, C.C. 2020. Caracterización Fríjol Caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp): perspectiva socioeconómica y tecnológica en el Caribe colombiano. *Ciencia y Agricultura*. 17(2):12-22. <http://dx.doi.org/10.19053/01228420.v17.n2.2020.10644>
24. MATA-FERNÁNDEZ, I.; RODRÍGUEZ-GAMIÑO, M.L.; LÓPEZ-BLANCO, J.; VELA-CORREA, G. 2014. Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*. 1(5):26-35.
25. MAZUELA ÁGUILA, P.C. 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*. 31(2):3-4. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
26. MELGAREJO, L.M.; ROMERO, S.; HERNÁNDEZ, S.; BARRERA, J.; SOLARTE, M.E.; SUÁREZ, D.; PÉREZ, L.V.; ROJAS, A.; CRUZ, M.; MORENO, L.; CRESPO, S.; PÉREZ, W. 2010. Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). 279p.
27. MENDOZA-TAFOLLA, R.; JUAREZ-LÓPEZ, P.; ONTIVEROS-CAPURATA, R.; ALIA-TEJACAL, I.; GUILLEN-SÁNCHEZ, D.; VILLEGAS-TORRES, O.; CHÁVEZ-BÁRCENAS, A. 2022. Estimación de la concentración de clorofila, nitrógeno y biomasa en arúgula (*Eruca sativa* mill.) mediante mediciones portátiles no destructivas. *Bioagro*. 34(2):151-162. <https://doi.org/10.51372/bioagro342.5>

28. OBSERVATORIO DE TERRITORIOS ÉTNICOS Y CAMPESINOS, OTEC. 2015. Ficha para sistematización de información: Consejo Comunitario Los Cardonales. Pontificia Universidad Javeriana. Disponible desde internet en: <https://consejos.etnoterritorios.org/es/listado-de-consejos?id=a0f45e9ca226c5c853a9a970dea3cead> (con acceso 22/07/2020)
29. OUNI, Y.; GHNAYA, T.; MONTEMURRO, F.; ABDELLEY, C.H.; LAKHDAR, A. 2014. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production*. 8(3):353-374.  
<https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1614>
30. PEREYRA CARDOZO, M.; QUIRIBAN, A. 2014. Las proteínas en la tolerancia al estrés hídrico en plantas. *Semiárida*. 24(1):55-67.
31. REDDY, A.R.; CHAITANYA, K.V.; VIVEKANANDAN, M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of plant physiology*. 161(11):1189-1202.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
32. SAGHAFI, D.; GHORBANPOUR, M.; LAJAYER, B.A. 2018. Efficiency of *Rhizobium* strains as plant growth promoting rhizobacteria on morpho-physiological properties of *Brassica napus* L. under salinity stress. *Journal of soil science and plant nutrition*. 18(1):253-268.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000903>
33. SALGADO-CHÁVEZ, J.A.; PALACIO-VALENCIA, A.E.; VALERO-VALERO, N.O. 2020. Actividad antioxidante e influencia del periodo climático sobre el contenido de polifenoles totales en *Merremia aegyptia*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 18(2):82-93.  
[https://doi.org/10.18684/bsaa\(18\)82-93](https://doi.org/10.18684/bsaa(18)82-93)
34. SÁNCHEZ LÓPEZ, D.B.; PÉREZ PAZOS, J.V.; DAVID HINESTROZA, H.A. 2016. Efecto de las PGPB sobre el crecimiento *Pennisetum clandestinum* bajo condiciones de estrés salino. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 18(1):65-72.  
<http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.50413>
35. SHAHID, S.A.; ZAMAN, M.; HENG, L. 2018. Introduction to soil salinity, sodicity and diagnostics techniques. In: *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer, Cham. p.1-42.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_1)
36. SHTAYA, M.J.Y.; YASIN, A.; FATOOM, J.; JEBREEN, M. 2019. The effect of salinity on leaf relative water content and chlorophyll content of three wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces from Palestine. *Hebron University Research Journal*. 8:52-65.
37. UPADHYAY, S.K.; SINGH, J.S.; SAXENA, A.K.; SINGH, D.P. 2012. Impact of PGPR inoculation on growth and antioxidant status of wheat under saline conditions. *Plant Biology*. 14(4):605-611.  
<https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00533.x>
38. VALERO, N.; GÓMEZ, L.; PANTOJA, M.; RAMÍREZ, R. 2014. Production of humic substances through coal-solubilizing bacteria. *Brazilian Journal of microbiology*. 45(3):911-918.  
<https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000300021>
39. VALERO, N.O.; SALGADO, J.A.; CORZO, D. 2018. Metodología Sencilla para Evaluar Bioactividad de Ácidos Húmicos obtenidos de Lignito Mediante Extracción Alcalina y Bacterias Solubilizadoras de Carbón. *Información tecnológica*. 29(4):75-82.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400075>
40. VAN OOSTEN, M.J.; PEPE, O.; DE PASCALE, S.; SILLETI, S.; MAGGIO, A. 2017. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and biological technologies in agricultura*. 4.  
<https://doi.org/10.1186/s40538-017-0089-5>
41. YI, Y.; LI, Z.; SONG, C.; KUIPERS, O.P. 2018. Exploring plant-microbe interactions of the rhizobacteria *Bacillus subtilis* and *Bacillus mycoides* by use of the CRISPR-Cas9 system. *Environmental microbiology*. 20(12):4245-4260.  
<http://dx.doi.org/10.1111/1462-2920.14305>



# Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú

## Spatial behavior of physicochemical indicators and soil quality in *Theobroma cacao* L. plantation in Padre Abad, Ucayali, Peru

Erika Tereza Inocencio-Vasquez<sup>1</sup> ; Nelino Florida-Rofner<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Departamento de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua. Tingo María, Perú; e-mail: erika.inocencio@unas.edu.pe, nelinof@hotmail.com

\*autor de correspondencia: nelinof@hotmail.com

**Cómo citar:** Inocencio-Vasquez, E.T.; Florida-Rofner, N. 2022. Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2320. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** julio 18 de 2022

**Aceptado:** octubre 18 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El cultivo de cacao en el trópico peruano presenta bajos rendimientos, lo que exige buscar alternativas para aumentar la producción. Frente a esta situación, los estudios geoespaciales facilitan el diagnóstico de fertilidad y la aplicación de planes de fertilización. Por lo tanto, se evaluó la distribución espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en Padre Abad, región Ucayali, Perú. Se evaluaron indicadores fisicoquímicos y la calidad del suelo y se sometieron al análisis geoestadístico, a través del interpolador Kriging, encontrándose coeficientes de variación bajos para arcilla, pH y potasio K y medios para arena, limo, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K<sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>), aluminio (Al<sup>3+</sup>), capacidad de intercambio de cationes (CIC), saturación de bases (SB), acidez cambiante (AC) y saturación de aluminio (SAL). La calidad del suelo varió entre baja a muy baja, con una distribución espacial de 52,24 y 47,76 %. El análisis de componentes principales encontró significancia para arena, limo,

MO, N, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, CIC, %AC, %BC y %SAL, todos presentan variación espacial, según su nivel de fertilidad, excepto K<sup>+</sup>. Los modelos de interpolación con mejores ajustes fue el exponencial y lineal con dependencia espacial fuerte para arena, limo y K, moderada para MO, N, Al, CIC, %SAL e índice de calidad del suelo y débil para %BC y %AC, con una eficiencia de predicción confiable. Se encontró alta variabilidad espacial con valores medios de los diferentes indicadores de fertilidad bajos, no favorables para el desarrollo del cultivo de cacao.

Palabras clave: Coeficiente de variación; Geoestadística; Índice de calidad; Kriging.

### ABSTRACT

Cocoa cultivation in the Peruvian tropics has low yields, which requires seeking alternatives to increase the production. Faced with this situation, geospatial studies facilitate the diagnosis of

fertility and the efficient application of fertilization plans. Therefore, the spatial distribution of physicochemical indicators and soil quality in Padre Abad, Ucayali region, Peru were evaluated. Physicochemical indicators and soil quality were evaluated and subjected to geostatistical analysis through the Kriging interpolator, finding low coefficients of variation for clay, pH and potassium ( $K^+$ ), and medium for sand, silt, organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium ( $K^+$ ), calcium ( $Ca^{2+}$ ), magnesium ( $Mg^{2+}$ ), aluminum ( $Al^{3+}$ ), cation exchange capacity (CEC), base saturation (BS), exchangeable acid (EA) and aluminum saturation (AIS). Soil quality ranged from low to very low quality with a spatial distribution of 52.24 % and 47.76 % respectively. Principal component analysis found significance for sand, silt, OM, N,  $K^+$ ,  $Al^{3+}$ , CEC, %EC, %BS and %AIS, all showing spatial variation according to their fertility level, except  $K^+$ . The interpolation models with best fits were the exponential and linear with strong spatial dependence for sand, silt and  $K^+$ , moderate for MO, N, Al, CEC, %AIS and soil quality index (SQI), and weak for %BS and %EC, with reliable prediction efficiency. The research found high spatial variability with low mean values of the different fertility indicators, not favorable for cocoa crop development.

Keywords: Coefficient of variation; Geostatistics; Quality index; Kriging.

## INTRODUCCIÓN

El *Theobroma cacao* es el segundo cultivo más importante, después del plátano, en la provincia Padre Abad y primer productor de la región Ucayali. El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, MIDAGRI (2021) reporta una cifra récord de 151, 6 mil toneladas, en el 2020, donde Ucayali, es el tercer productor nacional, con 17 mil toneladas, que representa el 12,5 % de la producción. Además, es importante destacar que la región Ucayali presenta la mayor tasa de incremento en la producción promedio anual de 36,6 %, en los últimos diez años, cuya variedad más difundida es la CCN-51; sin embargo, el rendimiento de 840 kg/ha sigue siendo deficiente (Florida-Rofner, 2021; MIDAGRI, 2021), en comparación con países, como Tailandia y Guatemala, con rendimientos de 2,5 a 3 t/ha (MINAGRI, 2016). Se atribuye los bajos rendimientos en plantaciones de cacao de la provincia Padre Abad a deficiencias técnicas en el manejo y a falta de planes de fertilización.

La agricultura en el trópico peruano se desarrolla bajo técnicas de manejo orgánico y convencional, en ambos casos, con deficiencias técnicas en el manejo de la fertilidad (Florida-Rofner & Acuña-Núñez, 2020), en parte, resultado de una variabilidad espacial de moderada a media en distancias cortas, de los diferentes indicadores de calidad del suelo (Panday *et al.* 2018). Frente a ello, las herramientas geoestadísticas, como el método de interpolación Kriging (Villatoro *et al.* 2008; Jaramillo J., 2012; Chinea-Horta & Rodríguez-Izquierdo, 2021), permiten determinar la variabilidad espacial de los atributos del suelo (Córdoba *et al.* 2014),

información confiable y útil para la elaboración de diagnósticos de fertilidad (Vásquez Polo *et al.* 2010) y la aplicación eficiente de planes de fertilización (Henríquez *et al.* 2013; Gamble *et al.* 2018).

El fundo Cárdenas, maneja 3,35 ha de cacao CCN-51, en un suelo fuertemente ácido y con aparentes deficiencias nutricionales, por la disparidad en el tamaño, producción y vigor dentro de la misma plantación, por lo que, la aplicación de un plan de fertilización sin el estudio correspondiente, no resultaría eficiente y podría generar pérdidas al productor y daños ambientales. Frente a esta realidad, este trabajo se justifica en la búsqueda de un método práctico, que resuelva el problema que afecta a productores de la provincia Padre Abad, en la región Ucayali-Perú y determine la variabilidad espacial de la calidad del suelo, para un mejor diagnóstico de la fertilidad de sus tierras y optimizar la aplicación de planes de fertilización.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo determinar el comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y de calidad del suelo en Padre Abad, región Ucayali-Perú. Esta Información, se convertirá en una alternativa a ser considerada por productores locales y las instituciones que promueven el desarrollo de proyectos productivos en la zona.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El lugar donde se desarrolló la investigación, se encuentra en la jurisdicción del poblado de Nuevo Progreso, políticamente, el centro poblado pertenece al distrito y provincia de Padre Abad, en la región Ucayali. El fundo "Cárdenas", se ubicada a 8°54'23" latitud Sur y 75°29'34" longitud Oeste y cultiva cacao CCN-51, con plantación de 8 años de producción, distanciamiento de siembra de 3x3 m y recibe un manejo tradicional a base de poda anual del 30 %, control manual de malezas y no aplica ningún tipo de agroquímicos.

Según Holdridge (2000), el área pertenece al ecosistema de bosque muy húmedo - Premontano Tropical (bmh-PT) y las condiciones climáticas generales, que presentan una temperatura media anual de 26,2 °C, la máxima de 26,6 °C y la mínima de 25,9 °C; humedad relativa de 84 % y precipitación anual de 2800 mm (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI, 2022). Según Pulgar Vidal (2014), el área pertenece a la ecorregión Omagua o selva baja, teniendo como principal fuente hídrica, el río Aguaytía.

**Muestreo.** Consistió en determinar los puntos de los vértices del área cultivada en el fundo Cárdenas (Figura 1), excluyendo el área de bosque secundario. Se realizó el muestreo cada 30 m, en tres hileras paralelas, de forma sistemática, en las 3,35 ha cultivadas del fundo y la extracción de 28 muestras; se realizaron tomando en cuenta los criterios de la Guía para el muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente, MINAM (2014).

**Análisis de suelos.** El análisis granulométrico, se realizó por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos. Los valores de pH en agua destilada (relación 1:2,5), debidamente calibrado

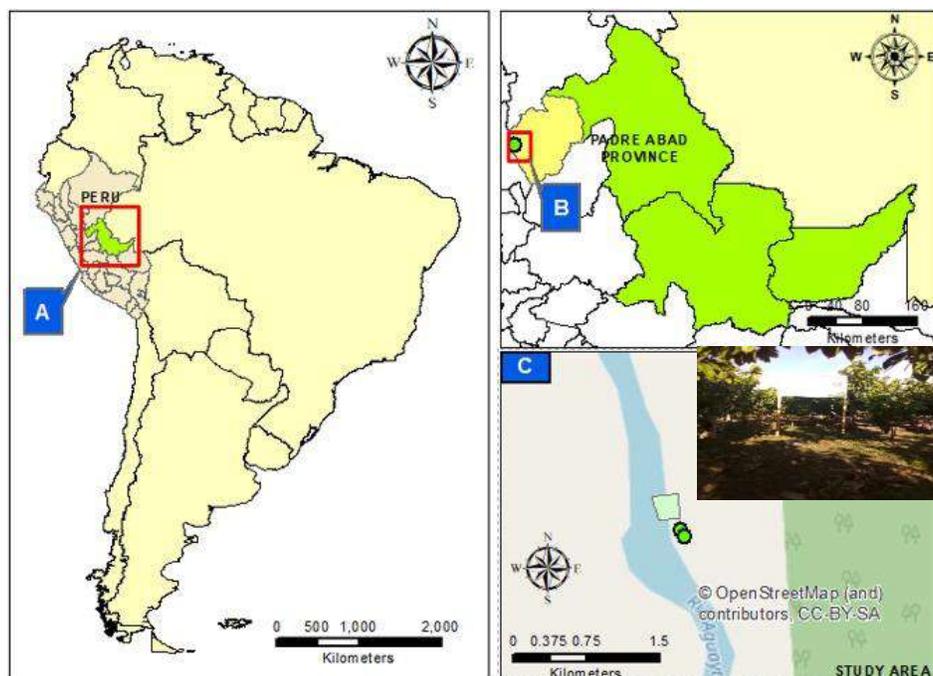


Figura 1. Localización geográfica del fundo Cárdenas, Padre Abad, Ucayali, Perú.

con soluciones patrón de pH 4,0 y 7,0. El  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  fueron extraídas con acetato de amonio a pH 7 y determinadas por absorción atómica. El  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  fueron extraídas con KCl y determinadas por titulación con solución de NaOH 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$ . El contenido de P disponible por Olsen modificado extraído con solución de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 8,5 y determinado por colorimetría. El contenido de carbono orgánico (CO), se determinó conforme a Walkley & Black (1934) y la CIC, mediante saturación por acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) a pH 7; los protocolos para su determinación, se describen en Bazán Tapia (2017).

**Calidad del suelo.** Con los datos obtenidos de los diferentes indicadores físicos y químicos del suelo, se determinó el índice de calidad del suelo (ICS), a través del Subíndice de uso sustentable del suelo (SUSS), propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO y la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural-FAO & Sagarpa (2012). Además, la determinación de la clase de calidad se realizó con los rangos de calidad, propuesta por Cantú *et al.* (2007) y FAO & Sagarpa (2012).

**Distribución espacial.** En cada punto muestreado se determinó la ubicación, mediante el contacto directo con el terreno, a través de un sistema de posicionamiento global (GPS).

La geolocalización, se realizó con el Sistema Universal de Mercator (UTM), en el Datum WGS 84, Zona 19 L hemisferio sur. Los resultados de caracterización del suelo se analizaron, a través del software ArcGIS 10.5 y para el proceso de interpolación, se utilizó el interpolador Kriging Ordinario o Kriging simple, que permite generar superficies a partir de aproximaciones geoestadísticas, con la finalidad de determinar áreas de tipo ráster que, posteriormente, se convirtió en polígonos de formato vectorial (ESRI Shapefile); la escala de trabajo fue de 1/2500. La distribución espacial, a nivel

detallado de los diferentes indicadores físicos, químicos, se realizó según los niveles de fertilidad, descritos por Bazán Tapia (2017) y la calidad del suelo (ICS), se clasificó según Cantú *et al.* (2007).

**Análisis exploratorio de datos.** Se consideraron tres aspectos básicos:

-El tipo de distribución de los datos, haciendo uso de la herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Histogram, buscando la opción que más se ajustó a una distribución normal.

-Análisis de datos estacionarios o fijos, para estimar que la variación local no cambie en diferentes áreas del mapa; se comprobó la estacionariedad de los datos, utilizando el mapa Voronoi, en ArcGIS, herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Voronoi Map.

-Análisis de tendencias, con la herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Trend Analysis, para generar los mapas temáticos de distribución espacial, según los niveles críticos de fertilidad.

**Modelo de interpolación.** Con la herramienta Geostatistical Analysis > Geostatistical Wizard y Geostatistical methods Kriging, analizar con Kriging type >ordinario (KO) y simple (KS) y se evaluaron los variogramas experimentales y se ajustaron a semivariograma teóricos, utilizando, como parámetros de selección, valores menores de la suma de cuadrados de residuos. A partir de los variogramas ajustados, se generó los mapas de geo distribución e interpolación para cada variable del suelo.

**Validación de los métodos de interpolación.** Se realizó mediante validación cruzada, la cual, consistió en extraer 5 % de los análisis de suelos colectados, para validar las interpolaciones efectuadas en ausencia de estos datos; se ubicó las coordenadas de los datos

ausentes, para compararlos con los datos interpolados; los métodos de interpolación, se calcularon mediante dos índices estadísticos, a partir de los valores medidos e interpolados, como el error medio (ME), la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Se tomaron en cuenta los indicadores estadísticos, como es el ME, que sea próximo o cercano a 0 y la RMSE debe ser lo más pequeño posible, para una interpolación precisa.

**Comparación de los métodos de interpolación.** Se realizó utilizando indicadores estadísticos, como el error cuadrático medio (MSE) y la eficiencia de predicción (E), para definir la aplicación del KO y KS, para cada indicador evaluado.

**Análisis estadístico.** Se realizó el análisis de componentes principales (ACP), previo al análisis geoestadístico de la variabilidad espacial; el ACP permitió identificar a los indicadores más relevantes que explican la varianza total encontrada entre los diferentes indicadores evaluados, a través de componentes o factores principales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Indicadores fisicoquímicos del suelo.** En la tabla 1, se presenta la estadística descriptiva general, el nivel o clase que corresponda a cada indicador de suelos cultivados con cacao, de acuerdo con los valores de la media encontrada.

Considerando los valores mínimos y máximos y los criterios de clasificación de FAO & Sagarpa (2012) y Bazán Tapia (2017), el área presenta indicadores que varían en su nivel o clase, entre ellos: textura entre Franco arcilloso, Franco y Franco limoso; nivel medio a alto en MO, N y %AC; bajo a medio en P y CIC; bajo a muy bajo en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; alto a muy alto en Al y %SAl; sin embargo, algunos indicadores no presentaron cambios en su nivel crítico, entre ellos, el K<sup>+</sup> (nivel bajo) y el pH permaneció en el nivel fuertemente ácido. Además, los valores medios encontrados no son favorables para el desarrollo del cultivo de cacao, en el área de estudio.

La textura media del suelo es franca, es un excelente indicador, por su relación con otras características físicas del suelo, como Da, Rp, porosidad, retención hídrica, aireación y contenido de MO (FAO, 2009; FAO & Sagarpa, 2012; Camacho-Tamayo *et al.* 2017). Este resultado revela una condición física favorable, considerando al cacao como cultivo principal para la zona (MINAGRI, 2016).

Se encontró un pH fuertemente ácido, el nivel corresponde a suelos ácidos con deficiencias de bases cambiables ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), contrastándose con los niveles medios de estos cationes (bajos en  $\text{Ca}^{2+}$  a muy bajos en  $\text{Mg}^{2+}$ ); estas son condiciones que, normalmente, se presentan a estos niveles de pH (Bohn *et al.* 1993; Navarro Blaya

Tabla 1. Estadística descriptiva de indicadores evaluados en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Mínimo	Máximo	Media	CV	Nivel o Clase media
Arena (%)	12,96	49,96	31,85±11,75	36,89	Franco
Arcilla (%)	19,76	31,76	26,73±3,14	11,75	
Limo (%)	25,88	60,88	41,42±10,82	26,12	
pH	3,81	4,75	4,23±0,24	5,67	Fuertemente ácido
MO (%)	1,76	4,13	3,1±0,67	21,61	M
N (%)	0,09	0,21	0,15±0,03	20,00	M
P (ppm)	0,58	6,62	2,54±1,19	46,85	B
K <sup>+</sup> (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	80,64	97,48	90,59±4,23	4,67	B
Ca <sup>2+</sup> (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	1,13	4,55	2,42±0,93	38,43	B
Mg <sup>2+</sup> (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	0,16	0,82	0,34±0,16	47,06	MB
Al <sup>3+</sup> (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	2,49	7,61	3,91±1,22	31,20	A
CIC (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	5,27	15,82	8,29±2,21	26,66	B
SB (%)	14,53	50,35	33,18±9,31	28,06	B
AC (%)	49,65	85,47	66,82±9,31	13,93	A
SAl (%)	33,45	69,12	47,22±8,16	17,28	A
ICS	0,08	0,37	0,20±0,08	40,00	BC

CV, coeficiente de variación; ICS, índice de calidad del suelo; A, alto; M, medio; B, bajo; MB, muy bajo; BC, baja calidad; ± desviación estándar.

& Navarro García, 2003; Rosas-Patiño *et al.* 2017). Además, la alta pluviometría de la zona y las texturas francas encontradas generan pérdida de bases por lavado, lo que explicarían estos niveles de pH (FAO & Sagarpa, 2012; Havlin *et al.* 1999; Bohn *et al.* 1993).

Los resultados muestran que los valores encontrados de pH no cambian de nivel crítico y tampoco son condiciones favorables para los cultivos. Además, coinciden con los reportes de Florida Rofner *et al.* (2019), al evaluar el efecto del compost y NPK en la

parte central, dentro de este fundo. También, Celis-Tarazona *et al.* (2020) reportan valores medios similares, en áreas con diferentes sistemas de manejo, adyacentes al fundo Cárdenas.

La MO y N presenta en promedio nivel medio, indicadores favorables para la fertilidad del suelo, por su efecto directo sobre la regulación del aluminio y procesos fisicoquímicos importantes (Navarro Blaya & Navarro García, 2003; FAO & Sagarpa, 2012). Los resultados muestran amplia variabilidad entre 1,76 a 4,13 % de MO y 0,09 – 0,21 % de N, valores relativamente mayores a los de Florida Rofner *et al.* (2019). También, Celis-Tarazona *et al.* (2020) reportan valores medios que varían entre 1,58 a 1,79 % MO, en áreas de cacao convencional y bosque.

Los resultados de MO fueron relativamente más altos, en comparación con los estudios desarrollados en el área (Florida Rofner *et al.* 2019) y en el entorno (Celis-Tarazona *et al.* 2020); estos resultados, se pueden explicar considerando que el muestreo en este trabajo se realizó en temporada lluviosa, que genera un crecimiento rápido de plantas no deseadas, la dominancia de la gramínea *Axonopus compressus* (torourco) y el no uso de herbicidas en el área. Este comportamiento fue evidenciado por Navarro Vásquez *et al.* (2018), quienes encontraron altos niveles de MO en áreas de pastos con gramínea, atribuidos a una mayor exploración del sistema radicular, que contribuye a elevar los contenidos de MO y N del suelo; sin embargo, advierten que este comportamiento no significa condiciones óptimas de calidad del suelo.

Respecto al  $Al^{3+}$ , %AC y %Sal, todos presentaron niveles altos, considerados tóxicos para los cultivos (FAO & Sagarpa, 2012). Los valores son poco favorables para el desarrollo del cacao, a pesar de tener valores medios a altos en MO; esto concuerda con lo señalado por Navarro Vásquez *et al.* (2018). Además, estos resultados son propios de suelos fuertemente ácidos, con alta pluviometría y lavado de bases, que favorecen el incremento de  $Al^{3+}$ , %AC y %SAL y disminución de la CIC (Bohn *et al.* 1993; Havlin *et al.* 1999), condiciones que se evidencian en los resultados y concuerdan con los valores encontrados por Florida Rofner *et al.* (2019) y Celis-Tarazona *et al.* (2020), quienes encontraron valores altos de Al, AC y saturación de aluminio.

En la tabla 1, los valores de CV oscilan entre 4,67 ( $K^+$ ) a 47,06 ( $Mg^{2+}$ ). Según la clasificación del CV, en propiedades del suelo de Warrick & Nielsen (1980), se observa un coeficiente de variación baja (CV < 12 %), para arcilla, pH y K; estos últimos, se contrastan con la permanencia en un mismo nivel crítico de fertilidad y de variación media de CV, entre 12-60 %, para el resto de indicadores evaluados (Arena, limo, MO, N, P,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , CIC, SB, AC y SAL). Para China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), las variaciones se atribuyen a factores de formación y de características agroclimáticas locales; en este caso, generaron variaciones espaciales, aun en un área relativamente pequeña (3,35 ha).

Los resultados de CV concuerdan con Junco *et al.* (2017), quienes estudiaron la distribución espacial de indicadores de calidad del suelo por unidades fisiográficas en la microcuenca río Bella-Las

Palmas; sin embargo, son relativamente menores en comparación con los resultados encontrados por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021). Respecto a los CV de las diferentes fracciones son similares a lo reportado por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021). También, concuerdan con los resultados de Acevedo *et al.* (2008), en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, quienes encontraron CV medio para MO, N y P y alto para K; este último, muy superior a lo encontrado en el área de estudio.

Un aspecto para destacar es el bajo CV del pH (5,67); sin embargo, es un valor apropiado y normal para este indicador. Según Acevedo *et al.* (2008), el pH es un indicador del suelo con menores variaciones espaciales, debido a que responde a procesos pedogenéticos del suelo y su coeficiente de variación, frecuentemente, fluctúa entre 2 a 15 %. En general, los resultados evidencian variabilidad media, lo que según China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), representa una marcada variabilidad del suelo y para Acevedo *et al.* (2008) es el resultado de las características intrínsecas del suelo y el historial de manejo.

**Calidad del suelo (ICS).** La tabla 1 muestra el cálculo general de los ICS, el valor máximo es de 0,37 y la mínima de 0,08, esto muestra que existe variabilidad de la calidad del suelo en el área evaluada. Al respecto, el valor medio encontrado corresponde, según Estrada-Herrera *et al.* (2017) y Cantú *et al.* (2007), a suelo de baja calidad y para FAO & Sagarpa (2012) son suelos pobres; sin embargo, considerando los valores mínimos y máximos el área varía entre calidad baja a calidad muy baja (Cantú *et al.* 2007; Estrada-Herrera *et al.* 2017).

Los ICS permiten evaluar la condición integral del suelo aplicando principios estadísticos y revela los efectos de las prácticas agrícolas sobre la calidad (Cantú *et al.* 2007). Los resultados consignados en la tabla 5 muestran un CV de 40 %, que representa una Variabilidad media, según Warrick & Nielsen (1980) y demuestra heterogeneidad respecto a la calidad en el área de estudio.

De acuerdo con las categorías de calidad propuestas por FAO & Sagarpa (2012), en el área de estudio, la calidad se encuentra amenazada y los indicadores se alejan de los niveles deseables. Aunque no se han encontrado referencias locales, estos datos se pueden contrastar con los resultados encontrados por Azañero Aquino *et al.* (2020), en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, quienes encontraron suelos de calidad marginal para el sistema coca, sensible en el bosque y aceptable en los sistemas agroforestales. Los resultados son relativamente menores a esta referencia.

**Relevancia estadística de los indicadores evaluados.** En la tabla 2, se observa el análisis estadístico para determinar la relevancia de los indicadores evaluados. Se encontraron cinco componentes o factores mayores a la unidad, con autovalores de 6,33, para el factor 1 y 1,15, para el factor 5; en conjunto explican el 87,97 % de la varianza total.

Las cargas factoriales obtenidas por Varimax permiten determinar todos los indicadores, que son relevantes en cada componente o

Tabla 2. Varianza total explicada por el ACP, para muestras de suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	6,336	39,597	39,597	6,336	39,597	39,597
2	3,122	19,516	59,113	3,122	19,516	59,113
3	2,068	12,925	72,037	2,068	12,925	72,037
4	1,395	8,721	80,758	1,395	8,721	80,758
5	1,154	7,210	87,968	1,154	7,210	87,968
6	0,767	4,791	92,759			
7	0,541	3,379	96,138			
8	0,249	1,557	97,695			
9	0,231	1,447	99,142			
10	0,078	0,486	99,628			
11	0,001	0,004	100,000			

factor, tomando como criterio de selección a indicadores con cargas factoriales mayores a 0,75, por tener el valor de  $n < 50$  (28 muestras de suelos). Los indicadores relevantes son AC, BC y Sal, para el Factor 1; MO y N, para el Factor 2; CIC y Al, para el Factor 3; arena y limo, para el Factor 4 y K', para el factor 5. Este análisis excluye a la fracción arcilla, el pH, Ca, Mg y P, por no tener influencia sobre la varianza total encontrada entre los indicadores evaluados; son indicadores que, normalmente, presentan relevancia estadística y explican los cambios en la calidad producto del manejo del suelo. Además, la técnica del ACP permite reducir variables a su menor número, sin perder poder estadístico (Garbanzo-León *et al.* 2017).

**Distribución geoespacial.** En la tabla 3, se observa la distribución geoespacial general, según nivel, de los indicadores fisicoquímicos relevantes y del índice de calidad del suelo en el fundo Cárdenas; se observa, también, que los indicadores arena, limo, MO, N, CIC, AC, BC y SAI presentan variabilidad en los niveles de clasificación, contrario a los indicadores K y Al, que no presentan variabilidad, según los niveles críticos de clasificación de cada parámetro.

La calidad del suelo calculada, a través del ICS, es una herramienta estadística, que expresa íntegramente el estado de conservación o la calidad del suelo (Estrada-Herrera *et al.* 2017); el resultado evidencia cambios en la distribución espacial, con 52,24 %, de calidad baja y 47,76 % del área presenta calidad muy baja. Esta información es muy importante en la toma de decisiones para un adecuado manejo del fundo Cárdenas y la región. Además, los resultados de distribución concuerdan con lo reportado por Junco *et al.* (2017), en diferentes unidades fisiográficas; los indicadores con mayor variabilidad espacial fueron MO, N, P, K, Ca y Mg; también, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) encontraron alta variabilidad para K y P. Los resultados concuerdan con las referencias citadas.

**Validación geoestadística.** En la tabla 4, se observa el análisis de interpolación geoestadística, a través del interpolador Kriging,

aplicando sus diferentes variantes o tipos que más se ajusten a cada indicador; los resultados muestran mejor ajuste del Kriging ordinario (KO), para el indicador arena y limo y el Kriging simple (KS), para el resto de indicadores relevantes. Además, los modelos que mejor se ajustan a cada indicador son el exponencial para MO y lineal para el resto de indicadores.

Respecto a los modelos exponenciales y lineales que mostraron mejor ajuste, concuerdan con Garbanzo-León *et al.* (2017), quienes encontraron mejores ajustes con el modelo exponencial y lineal, además, de gaussiano y esférico. Por el contrario, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), encontraron mejor ajuste con el modelo esférico.

El semivariograma experimental es una herramienta fundamental en el análisis geoestadístico; los elementos del variograma establecen la estructura de correlación espacial de los indicadores evaluados. En la tabla 4, se presentan los valores del Nugget, Sill, Rango y el grado de dependencia espacial GDE. Los valores del Nugget son cercanos a cero, para MO, N, K, Al, CIC, Ac, SAI e ICS y valores altos, para arena, limo y %BC. Los valores altos del nugget expresan alta variabilidad en campo y posibles errores instrumentales en la medición, por ello, Jaramillo J. (2012) y China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) recomiendan tener nugget cercano a cero o valores menores en comparación al Sill; este último, representa el valor máximo de la semivarianza.

El Rango es un elemento importante del variograma; es el valor que establece el límite de pérdida de correlación (Jaramillo J., 2012). Los valores encontrados varían entre 82,29, para K y 363,5 m, para MO; son valores altos en comparación a la distancia entre los puntos muestreados (30 m). El rango establece una distancia límite, en el que los puntos ya no se consideran correlacionados, por ello, entre más grande sea el rango, más cerca se está del modelo de dependencia espacial (Villatoro *et al.* 2008; Jaramillo J., 2012). Por lo tanto, los rangos encontrados son superiores a 80 m, siendo que el intervalo

Tabla 3. Distribución espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo, en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción			
	Intervalo	Nivel	Área (ha)	Área (%)
Arena (%)	< 20	Bajo	0,66	19,70
	20-50	Medio	2,69	80,30
Limo (%)	20-50	Medio	2,50	74,63
	50-85	Alto	0,85	25,37
MO (%)	1,5-3,5	Medio	2,58	77,01
	3,5-6	Alto	0,77	22,99
N (%)	0,05 – 0,1	Bajo	0,03	0,90
	0,1-0,15	Medio	1,15	34,33
	0,15-0,25	Alto	2,17	64,78
K (ppm)	<100	Bajo	3,35	100,00
Al (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	> 1	Muy alto	3,35	100
CIC (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	5 - 15	Bajo	0,03	0,90
	15 - 25	Medio	3,32	99,10
AC (%)	> 50	Alto	3,34	99,70
	35 - 50	Medio	0,01	0,30
BC (%)	< 35	Bajo	2,06	61,49
	35-50	Medio	1,28	38,21
	> 50	Alto	0,01	0,30
SAI (%)	30 - 60	Alto	3,24	96,72
	> 60	Muy alto	0,11	3,28
ICS	0,20 - 0,39	Baja calidad	1,75	52,24
	0,00 - 0,19	Muy baja calidad	1,60	47,76

Tabla 4. Parámetros del variograma aplicando Kriging, para indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo, en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción						R <sup>2</sup>
	Tipo	Modelo	Nugget	Sill	Rango	GDE (%)	
Arena (%)	Ko	Lineal	45,2914	196,6458	222,89	23,03	0,74
Limo (%)	Ko	Lineal	20,1615	177,9503	209,2	11,33	0,86
MO (%)	Ks	Exponencial	0,4958	1,2825	363,5	38,66	0,71
N (%)	Ks	Lineal	0,7562	1,2686	308,05	59,61	0,36
K (ppm)	Ks	Lineal	0,00	1,1675	82,29	0,00	0,94
Al (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	Ks	Lineal	0,4497	0,9462	266,88	47,53	0,52
CIC (Cmol <sup>(+)</sup> /Kg)	Ks	Lineal	0,5259	1,3348	261,05	39,39	0,53
BC (%)	Ks	Lineal	71,3988	90,1414	241,65	79,21	0,33
AC (%)	Ks	Lineal	0,8548	1,0792	241,65	79,21	0,34
SAI (%)	Ks	Lineal	0,6245	1,1662	214,03	53,55	0,39
ICS	KS	Lineal	0,5248	1,0035	291,51	52,29	0,51

de muestreo utilizado (30 m) permitió identificar la dependencia espacial dentro del fundo Cárdenas; resultados similares fueron encontrados por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), entre 750 hasta 2.000 m. En este contexto, los resultados presentan rangos relativamente bajos; esto indica alta variabilidad espacial de los indicadores evaluados y la autocorrelación se pierde en valores cercanos a los rangos encontrados (Henríquez *et al.* 2013).

dependencia espacial; según Cambardella *et al.* (1994) clasificaron, como fuerte dependencia espacial, valores < 25 %; moderada dependencia, a valores entre 25-75 % y débil, valores mayores a 75 %. Los resultados varían entre 0 a 79,21 y muestran dependencia espacial fuerte, para arena, limo y K; dependencia espacial moderada, para MO, N, Al, CIC, SAI e ICS, los indicadores BC y AC muestran dependencia espacial débil.

El grado de dependencia espacial (GDE) resulta de la relación del efecto nugget/sill (Jaramillo J., 2012) y se tienen diferentes clases de

En la tabla 5, se presentan los elementos de validación del análisis de interpolación, los valores del Error Medio (ME) y Raíz del

Error Cuadrático Medio (RMSE). Un elemento importante en la validación es la eficiencia de predicción (EP); según Jaramillo J. (2012), valores de eficiencia de predicción igual a 100 %, indica una predicción perfecta; valores positivos entre 0 a 100 %, indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra y valores negativos < 0,00, indican que las predicciones son menos confiables que usar la media de la muestra. Los resultados presentan valores entre 8,61 (Al) a 91,60 %, para K, encontrándose todos los indicadores, incluyendo el ICS, en el rango positivo e indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra. Los resultados de eficiencia de predicción concuerdan con lo encontrado por Villatoro *et al.* (2008), Jaramillo J. (2012) y China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021).

Los resultados de variabilidad espacial fueron mayores en indicadores químicos; este comportamiento concuerda con Jaramillo J. (2012), quien afirma que se presenta una mayor variabilidad en las propiedades químicas frente a las físicas. Además, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) consideran que la técnica de interpolación es una herramienta útil para comprender la variabilidad de las propiedades del suelo en áreas específicas, así como profundizar en el diagnóstico y la recomendación de fertilizantes y enmiendas. También, Acevedo *et al.* (2008) señalan que esta herramienta permite generar mapas para identificar áreas parciales, para ubicar y orientar estudios específicos. Todo esto, enfocado en la agricultura de precisión, que tiene como estrategia de gestión la recopilación, el procesamiento y el análisis de datos

Tabla 5. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging, para muestras de suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción			
	ME	RMSE	MSE	EP
Arena	-0,0856	0,9733	7,7399	34,360
Limo	0,1087	1,0477	5,9171	42,787
MO	0,0135	1,1024	0,6709	13,3509
N	0,0006	1,0382	0,0321	10,1438
K	0,0112	0,9508	4,1852	91,607
Al	-0,0001	1,1112	1,0718	14,0378
CIC	-0,0032	1,0168	1,7416	8,6137
BC	-0,1708	1,0408	9,329	33,357
AC	0,1708	1,0408	9,3290	65,224
SAL	-0,0401	1,1771	8,3138	47,982
ICS	0,0013	1,1068	0,0712	10,2003

ME, error medio; RMSE, raíz del error cuadrático medio; MSE, error cuadrático medio; EP, eficiencia de predicción; ICS, índice de calidad del suelo.

temporales y espaciales, para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad del agroecosistema (Saavedra-Rincón & Chaparro-Anaya, 2022).

Los coeficientes de variación fueron bajos para arcilla, pH y K y media, para arena, limo, MO, N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, CIC, SB, AC y SAL y la calidad del suelo varía entre baja a muy baja calidad; estos suelos, se encuentran amenazados para fines agrícolas y los indicadores se alejan completamente de los niveles deseables. Además, presenta variabilidad media (CV= 40%), que evidencia heterogeneidad y presenta cambios en la distribución espacial, con 52,24 % de calidad baja y 47,76 % del área presenta calidad muy baja.

El ACP encontró relevancia estadística para los indicadores arena, limo, MO, N, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, CIC, %AC, %BC y %SAL. La distribución espacial encontró variación para la fracción arena, niveles bajo y medio, con 19,70 y 80,30 % del área; limo nivel medio 74,63 y

alto el 25,37 %; MO medio con 77,01 y alto el 22,99 %; N bajo con 0,09, medio 34,33 y alto el 64,78 %; CIC bajo 0,90 y medio el 99,10 %; AC medio 0,30 y alto el 99,70 %; BC bajo 61,49, medio 38,21 y alto el 0,30 % y la SAL alto 96,72 y muy alto el 3,28 % del área total evaluada; sin embargo, no presentaron cambios espaciales el K<sup>+</sup> y pH, que permanecen en el nivel bajo y fuertemente ácido, respectivamente.

La variabilidad espacial muestra mejor predicción del error con Kriging ordinario para arena y limo y el Kriging simple, para el resto de indicadores, cuyos modelos con mejores ajustes son el exponencial y lineal. Los rangos son bajos e indican alta variabilidad espacial con dependencia espacial fuerte para arena, limo y K; moderada para MO, N, Al, CIC, SAL e ICS y débil para BC y AC, muestran dependencia. La eficiencia de predicción son valores positivos e indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra.

Los valores medios encontrados de los diferentes indicadores de calidad del suelo son típicos en el trópico húmedo peruano y no son favorables para el desarrollo del cultivo de cacao y los rangos relativamente bajos indican alta variabilidad espacial, que se contrasta con el coeficiente de variabilidad media. Las variaciones, se atribuyen a diversos factores de manejo y de formación del suelo, que requieren ser estudiadas a profundidad.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloquen en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. Este artículo es derivado del trabajo de grado “Distribución espacial de indicadores de calidad fisicoquímica del suelo en el fundo “Cárdenas”, en nuevo progreso Padre Abad 2022” para optar al título de Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

## REFERENCIAS

1. ACEVEDO, D.C.; ÁLVAREZ SÁNCHEZ, M.E.; HERNÁNDEZ ACOSTA, E.; MALDONADO TORRES, R.; PÉREZ GRAJALES, M.; CASTRO BRINDIS, R. 2008. Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*. 26(4):317-324.
2. AZAÑERO AQUINO, L.; ÑIQUE ALVAREZ, M.; FLORIDA ROFNER, N. 2020. Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, Perú. *Tayacaja*. 3(1):112-125. <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.75>
3. BAZÁN TAPIA, R. 2017. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Ministerio de Agricultura y Riego; Instituto Nacional de Innovación Agraria- INIA. (Lima, Perú). 89p.
4. BOHN, H.L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G.A. 1993. *Química del suelo*. 1º Edición. Editorial Limusa (México). 370p.
5. CAMACHO-TAMAYO, J.; FORERO-CABRERA, N.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; RUBIANO, Y. 2017. Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. *Colombia Forestal*. 20(1):5-18. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01>
6. CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 58(5):1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
7. CANTÚ, M.P.; BECKER, A.; BEDANO, J.C.; SCHIAVO, H.F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 25(2):173-178.
8. CELIS-TARAZONA, R.; FLORIDA-ROFNER, N.; RENGIFO-ROJAS, A. 2020. Impacto sobre indicadores físicos y químicos del suelo con manejo convencional de coca y cacao. *Revista Ciencia UNEMI*. 13(33):1-9. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss33.2020pp1-9p>
9. CHINEA-HORTA, A.; RODRÍGUEZ-IZQUIERDO, L. 2021. Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*. 11(1):3-8.
10. CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; AGUATE, F.; TABLADA, M.; BALZARINI, M. 2014. Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de buenas prácticas. Eudecor (Córdoba, Argentina). 119p.
11. ESTRADA-HERRERA, R.; HIDALGO-MORENO, C.; GUZMÁN-PLAZOLA, R.; ALMARAZ-SUÁREZ, J.J.; NAVARRO-GARZA, H.; ETCHEVERS-BARRA, J.D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51(8):813-831.
12. FLORIDA-ROFNER, N. 2021. Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and South American origin. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 74(2):9499-9515. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
13. FLORIDA-ROFNER, N.; ACUÑA-NÚÑEZ, G. 2020. Soil quality with traditional management in the Chambira native community. *Plant, Soil and Environment*. 66:375-380. <https://doi.org/10.17221/144/2020-PSE>
14. FLORIDA ROFNER, N.; PAUCAR GARCÍA, J.; JACOBO SALINAS, S.S.; ESCOBAR-MAMANI, F. 2019. Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista De Investigaciones Altoandinas*. 21(4):264-273. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.503>
15. GAMBLE, J.D.; FEYEREISEN, G.W.; PAPIERNIK, S.K.; WENTE, C.; BAKER, J. 2018. Regression-Kriged soil organic carbon stock changes in manured corn silage-alfalfa production systems. *Soil & Water Management & Conservation*. 81:1557-1566. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.04.0138>
16. GARBANZO-LEÓN, G.; ALEMÁN-MONTES, B.; ALVARADO-HERNÁNDEZ, A.; HENRÍQUEZ-HENRÍQUEZ, C. 2017. Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *In-vestigaciones Geográficas*. 93:20-41. <http://dx.doi.org/10.14350/rig.54706>

17. HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6 ed. Prentice Hall (Estados Unidos). 499p.
18. HENRÍQUEZ, C.; MÉNDEZ, J.C.; MASÍS, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*. 37(2):71-82.  
<https://doi.org/10.15517/rac.v37i2.12763>
19. HOLDRIDGE, L.R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Quinta reimpresión. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA (San José, Costa Rica). 216p.
20. JARAMILLO J., D.F. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1(1):73-87.
21. JUNCO, W.; RENGIFO, J.; RENGIFO, A. 2017. Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo de la microcuenca Rio Bella-Distrito Mariano Dámaso Beraún - Las Palmas. *Investigación y Amazonía*. 7(3):20-29.
22. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, MINAGRI. 2016. Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Un análisis de la producción y el comercio. 90p. Disponible desde Internet en: <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
23. MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO, MIDAGRI. 2021. Cacao. Observatorio de Commodities. 20p. Disponible desde Internet en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2009611/Commodities%20Cacao%3A%20ene-mar%202021.pdf>
24. MINISTERIO DEL AMBIENTE, MINAM. 2014. Guía para el muestreo de suelos. En el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. MINAM (Perú). 72p.
25. NAVARRO BLAYA, B.; NAVARRO GARCÍA, G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Mundi-Prensa (Madrid, España). 510p.
26. NAVARRO VÁSQUEZ, L.; FLORIDA ROFNER, N.; NAVARRO VÁSQUEZ, M. 2018. Sustancias húmicas y agregación en oxisol (Rhodic Eutrudox) con pasto brachiaria y otros sistemas de uso. *Livestock Research for Rural Development*. 30(8):137.
27. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos 4ª edición. FAO (Roma). 111p. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
28. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO; SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN, SAGARPA. 2012. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo - Metodología de Cálculo. 58p.
29. PANDAY, D.; MAHARJAN, B.; CHALISE, D.; SHRESTHA, R.K.; TWANABASU, B. 2018. Digital soil mapping in the Bara district of Nepal using kriging tool in ArcGIS. *PLoS ONE*. 13(10):e0206350.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206350>
30. PULGAR VIDAL, J. 2014. Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*. 3:1-20.  
<https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
31. ROSAS-PATIÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C. 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Revista Ciencia y Tecnología Agro-pecuaria*. 18(3):529-541.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num3\\_art:742](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742)
32. SAAVEDRA-RINCÓN, S.; CHAPARRO-ANAYA, Ó. 2022. Desarrollo de una aplicación en Python para mapeo de variabilidad espacial en la agricultura digital. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 26(1):7-27.  
<https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.01>
33. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ, SENAMHI. 2022. Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional. Disponible desde Internet en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descargadatos-hidrometeorologicos>
34. VÁSQUEZ POLO, J.R.; BAENA GARCÍA, D.; MENJIVAR FLORES, J.C. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*. 59(4):449-456.
35. VILLATORO, M.; HENRÍQUEZ, C.; SANCHO, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32(1):95-105.
36. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil matter and a proposed modification of the chromic and titration method. *Soil Science*. 37(1):29-38.
37. WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hillel, D. (Ed). *Applications of soil physics*. Academic Press (New York). p.319-344.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>



# Respuesta del banano clon Valery en alta densidad a la inoculación con micorrizas y fósforo en Apartadó - Colombia

## Response of Valery clone banana in high density to inoculation with mycorrhizae and phosphorus in Apartado - Colombia

Miguel Ángel Bernal-Monterrosa<sup>1\*</sup> ; Eliecer Miguel Cabrales-Herrera<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación Agricultura sostenible. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: mbernalmonterrosa31@correo.unicordoba.edu.co; ecabralesh@correo.unicordoba.edu.co

\*autor de correspondencia: mbernalmonterrosa31@correo.unicordoba.edu.co

**Cómo citar:** Bernal-Monterrosa, M.Á.; Cabrales-Herrera, E.M. 2022. Respuesta del banano clon Valery en alta densidad a la inoculación con micorrizas y fósforo en Apartadó - Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1659. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1659>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** julio 28 de 2020

**Aceptado:** junio 30 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El cultivo de banano en el Urabá Antioqueño viene presentando disminución en los rendimientos, lo que exige la búsqueda de alternativas para incrementar o mantener la producción actual, entre las cuales, se encuentra el aumento en la proporción de fertilizantes inorgánicos, conllevando a sobrecostos y problemas ambientales. En vista de esta situación, se ha generado un interés por el uso de biofertilizantes, como el caso de las micorrizas (HFM), con las que se han demostrado beneficios al sistema suelo-planta. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de los HFM con la disminución de la dosis fosforada en el clon de banano Valery, en un sistema de alta densidad, bajo condiciones edafoclimáticas de Apartadó-Antioquia. Para ello, en los tratamientos, al momento de la siembra, se realizaron inoculaciones de 100 g de HFM comercial con 5 dosis de fósforo, que correspondieron a: 0, 25, 50, 75 y 100 kg\*ha<sup>-1</sup>. Se midieron variables morfológicas, rendimiento y simbiosis micorrízica. El diseño experimental fue completamente al azar, con 3 repeticiones; cada unidad experimental estuvo constituida por 10 plantas contenidas en 5 sitios. La información se procesó con el programa estadístico SAS 9.1, se obtuvo el análisis de varianza y una prueba de comparación de medias (Tukey), con un nivel de significancia del 95 %. No se encontraron diferencias significativas en las variables morfológicas, pero sí en las variables

productivas, siendo el tratamiento HFM + 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>\*ha<sup>-1</sup> el de mejor resultado y, además, presentó el mayor porcentaje de colonización micorrízica, con 59,5 %.

Palabras clave: Fertilización fosforada; Prácticas de producción sostenible; Productividad de banano; Micorrizas; *Musa acuminata*.

### ABSTRACT

The banana crop in Uraba Antioqueño has been presenting a decrease in the yields, which requires the search for alternatives to increase or maintain current production, among which is the increase in the proportion of inorganic fertilizers leading to cost overruns and environmental problems. In view of this situation, there has been a growing interest in the use of biofertilizers such as mycorrhiza (HFM) with which multiple benefits to the soil-plant system have been demonstrated. The objective of this research was to evaluate the effect of HFM with the reduction of phosphorus dose in the Valery banana clone under a high-density system under edaphoclimatic conditions of Apartado-Antioquia. For this purpose, 100 g of commercial HFM were inoculated with 5 doses of phosphorus at time of sowing, corresponding to: 0, 25, 50, 75 and 100 kg\*ha<sup>-1</sup>. Morphological variables, performance and mycorrhizal symbiosis were measured. The experimental design

was completely random with 3 repetitions, each experimental unit was made up of 10 plants contained in 5 sites. The information was processed with the statistical program SAS 9.1, variance analysis was obtained and a mean comparison test (Tukey) with a significance level of 95 %. No significant differences were found in the morphological variables, but in the productive variables, the HFM + 50 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>\*ha<sup>-1</sup> treatment was the best and also presented the highest percentage of mycorrhizal colonization with 59.5 %.

Keywords: Banana productivity; *Musa acuminata*; Mycorrhizae; Phosphorous fertilization; Sustainable production practices.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países con mayor producción de banano para exportación, en el cual, el Urabá Antioqueño es un gran participante en su producción y exportación, generando empleos directos e indirectos, con un rol fundamental en los ingresos de este sector, donde todas las actividades económicas y socio-culturales giran en torno al negocio del banano (Espinal G. *et al.* 2005).

Este sector ha venido presentando disminución en los rendimientos del cultivo de una forma generalizada, por lo cual, se han buscado múltiples alternativas, que favorezcan a aumentar o mantener la producción actual (Bernal Monterrosa & Cabrales Herrera, 2022); entre estas, se encuentra el incremento del uso de los fertilizantes inorgánicos, lo que conlleva, por un lado, al incremento de los costos de producción, favoreciendo la insostenibilidad del sistema productivo y, por otro, hace aportes a la contaminación de suelos, aguas subterráneas y el deterioro del sistema productivo (Garzón, 2016).

Por el criterio de esencialidad (Taiz & Zeiger, 2006), los fertilizantes más utilizados son a base de N-P-K, pero estas aplicaciones, sin criterio técnico, traen consigo efectos perjudiciales al medio ambiente (Garzón, 2016), por lo cual, es necesario buscar alternativas que minimicen el acelerado proceso de contaminación, que se está presentando (Arias Hoyos, 2010) y que, a su vez, ha generado un creciente interés por el uso racional de fertilizantes inorgánicos e implementación de un complemento nutricional con “fertilización ecológica” (Carrillo Aguilar *et al.* 2021; Sepúlveda Vargas, 2020), basada en el uso de microorganismos beneficiosos, como los hongos formadores de micorrizas (HFM) (Barrera Berdugo, 2009).

Las micorrizas son microorganismos del suelo que forman simbiosis con el 80 % de las plantas terrestres (Brundrett & Tedersoo, 2018; Selosse, 2019). En esta asociación, la planta le proporciona al hongo carbohidratos (azúcares, producto de su fotosíntesis) y un microhábitat para completar su ciclo de vida (Vierheilig, 2004); mientras que el hongo, por su parte, le permite a la planta una mejor captación de agua y nutrientes minerales, en especial, los de baja movilidad en el suelo, como el fósforo, el cobre y el zinc (Camargo Ricalde *et al.* 2012), así como defensas contra patógenos (Bharadwaja *et al.* 2008).

El fósforo es un nutrimento que tiene una baja movilidad y es absorbido entre un 90-92 % por difusión (Microfertisa, 2016); es muy susceptible a formar compuestos insolubles con el aluminio Al, el hierro Fe en pH ácido y con el calcio Ca, en pH alcalinos y puede ser atrapado o “fijado” por las arcillas del suelo, por lo que se hace necesario buscar un mecanismo capaz de mejorar la capacidad efectiva del sistema de raíces para interceptar a este elemento rápidamente, cuando se encuentra en forma disponible. Para este caso, los HFM tienen como particularidad, aumentar la superficie de absorción de la raíz, por medio del sistema de hifas extrarradicales, efectuado por la extensión del micelio externo, alcanzando mayor distancia que los pelos radicales (López & Espinoza, 1995).

Adicionalmente, diversos estudios demuestran la importancia de la simbiosis micorrízica en las plantas expresada en múltiples beneficios (Camargo Ricalde *et al.* 2012; Cano, 2011; Guadarrama Chávez *et al.* 2004), caso que no es ajeno al cultivo de banano (Jaizme-Vega *et al.* 2002).

De acuerdo con lo mencionado, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis de fósforo en plantas de banano clon Valery, en un sistema de alta densidad, previamente inoculadas con HFM, en condiciones edafoclimáticas de la finca El Antojo, ubicada en el municipio de Apartadó, Antioquia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Lugar y época de estudio.** La investigación, se desarrolló en condiciones de campo durante un año (52 semanas), iniciando en septiembre del 2018 hasta septiembre de 2019, en el lote 25 de la Finca “El Antojo”, ubicada en Apartadó, Antioquia, con coordenadas geográficas 7°40'22" N & 2°31'38" W. Esta zona pertenece a la zona centro de la región de Urabá, con características de “Clima cálido húmedo”, según escala de Holdridge (IDEAM, 2018; IGAC, 2007).

**Características fisicoquímicas de suelo.** El análisis de suelos, se hizo con base a los métodos analíticos utilizados en la Universidad de Córdoba (IGAC, 2006).

**Inoculación con HFM.** La inoculación, se realizó en el trasplante y en el sitio de siembra, se colocó 100 g de micorriza (Micorrizar). Este producto contiene entre 60 y 80 esporas/g de sustrato, siendo dominantes los géneros *Acaullospora*, *Glomus*, *Entrophospora* y *Scutellospora*. El material fue elaborado y cedido por la Granja Ecológica El Encanto, ubicada en Guateque, Córdoba, donde es obtenido de forma artesanal y está en procesos de evaluación, para obtención de registro ICA.

**Medición de variables morfológicas.** La altura de planta APLA, se midió con una cinta métrica, desde la base del pseudotallo hasta la bifurcación en V de las últimas hojas. Para la circunferencia de pseudotallo CPSE, se midió la base de la planta al ras del suelo. Ambas mediciones, se tomaron bisemanalmente hasta la aparición del racimo y los datos se expresaron en cm. Para la emisión foliar

EFOL, se contaron las hojas presentes desde la hoja emitida hacia abajo y se expresó en hojas/planta.

**Medición de variables de rendimiento.** Se tomaron a los 180 días después de la siembra DDS, en el cual, se midió número de manos NMAN y dedos NDED, contando el número de manos y dedos del racimo; se expresaron en manos/racimo y dedos/racimo. Las dimensiones del dedo DDED, en cuanto a largo LAR, se realizó con cinta métrica, expresado en pulgadas y grosor con la vitola, expresado en líneas (1 línea = 1 pulgada/32 = 0,79 mm); en la segunda mano basal CAL 2DA y la primera mano apical CAL ULT. El peso neto del racimo WRAC se tomó con una báscula electrónica ID3000, expresado en kg/planta.

#### Medición de simbiosis micorrízica

**Grado de colonización GCOL.** Se hizo mediante la técnica Phillips, utilizada por Pérez & Vertel (2010); para el cálculo, se empleó la ecuación 1:

$$GCOL = \frac{\text{interceptos positivos}}{\text{interceptos totales}} * 100 \% \quad \text{ecuación 1}$$

**Número de vesículas NVES y número de arbusculos NARB.** Se contaron las vesículas y arbusculos encontrados en los interceptos positivos en la lectura de la colonización y se expresaron como unidades de vesículas o arbusculos/placa.

**Procesamiento de datos y diseño experimental.** Bajo condiciones edafoclimáticas del Urabá-Antioquia, en banano, se recomiendan dosis que oscilan entre 72,8 y 83,1 kg\*ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> año (Microfertilisa, 2016); por tal motivo, se establecieron dosis decrecientes, a partir de 100 kg\*ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El ensayo, se hizo en un diseño completamente al azar (DCA), se evaluaron inoculaciones de HFM y cinco dosis de fósforo (T1= 0, T2= 25, T3= 50, T4= 75 y T5= 100 kg\*ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), con 3 repeticiones; cada unidad experimental, la conformaron 10 plantas, contenidas en 5 sitios, para un total de 150 plantas. La información, se procesó con el programa estadístico SAS 9.1, se obtuvo el análisis de varianza (ANAVA) y una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey), con un nivel de significancia de 95 %.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Características fisicoquímicas del suelo.** El sitio corresponde a la Unidad de suelos N°418 y, taxonómicamente, se caracteriza como Consociación Fluvaquentic Endoaquepts, familia fina, mezclada, superactiva, no ácida, fase drenada (IGAC, 2007). Son de textura franca-arcillo-limosa, con drenaje interno moderado y externo bueno, nivel freático profundo (más de 80 cm), sin limitantes físicas, para el desarrollo del cultivo. Actividad biológica moderada al momento del muestreo de suelo, con diversidad de cobertura vegetal, donde las arvenses rastreras y de bajo porte son dominantes. Los resultados del análisis físico-químico del lote de ensayo (lote 25 de la finca El Antojo), se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del suelo en lote 25 de la finca antojo. Apartadó, Antioquia, 2019.

Propiedades	Valores	Unidades
Arcilla	36	%
Arena	18	%
Limo	46	%
Textura	Franco Arcillo Limoso	---
pH	5,38	01:01
MO	2,52	%
S	23,18	mg* Kg <sup>-1</sup>
P	56,58	
Ca	15,29	cmol*Kg <sup>-1</sup>
Mg	8,57	cmol*Kg <sup>-1</sup>
K	2,79	cmol*Kg <sup>-1</sup>
Na	0,20	cmol*Kg <sup>-1</sup>
Al+H	0,40	cmol*Kg <sup>-1</sup>
CICe	27,25	cmol*Kg <sup>-1</sup>
Fe	78,25	mg* Kg <sup>-1</sup>
Mn	52,63	mg* Kg <sup>-1</sup>
Cu	5,43	mg* Kg <sup>-1</sup>
Zn	7,52	mg* Kg <sup>-1</sup>
B	0,79	mg* Kg <sup>-1</sup>

### Variables morfológicas

**APLA:** Osciló entre 256 y 269,3 cm para los tratamientos uno y dos, el cual, se alcanzó a los 180 DDS, cifras que están dentro de los rangos de altura que se reportan para la variedad Valery (Sánchez Torres & Mira Castillo, 2013); a lo largo del periodo del ensayo, no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos

evaluados ( $p > 0,05$ ) (Tabla 2); no obstante, Vivas-Cedeño *et al.* (2018), evaluando dosis de HFM, correspondiente al 15, 25 y 35 % del peso del cormo con diferentes sustratos, encontraron que las dosis de 25 y 35 % de HFM, en el sustrato con humus, presentaron las respuestas más altas en el porcentaje de altura de planta, siendo las morfoespecies identificadas en el análisis de suelo, pertenecientes al género *Glomus* y *Acaulospora*.

Tabla 2. Cuadrados medios de los parámetros morfológicos del banano clon Valery en alta densidad a los 180 DDS (final del ciclo vegetativo) inoculado con micorrizas y cinco dosis de  $P_2O_5$  en condiciones edafoclimáticas de la finca Antojo. Apartadó-Antioquia, 2019.

Fuente de Variación	Gl	Cuadrado medio de los componentes		
		APLA	CPSE	EFOL
TTO	4	85,73 NS	9,79 NS	2,83 NS
Error	10	595,60	31,91	1,60
Total	14			
CV (%)		9,27	8,28	4,99
R <sup>2</sup>		0,05	0,10	0,41

APLA= altura de planta, CPSE = circunferencia del pseudotallo; EFOL = emisión foliar, Gl= grados de libertad, CV= coeficiente de variación, R<sup>2</sup>= R cuadrado. NS, \* y \*\*: no significativo, significativo ( $p \leq 0,05$ ) y altamente significativo ( $p \leq 0,01$ ) respectivamente.

**CPSE:** Este valor osciló entre 65,8 y 70,5 cm para los tratamientos uno y cinco, que se alcanzó a los 180 DDS, cifras que están entre los rangos que se reportan para este tipo de banano (Martínez Acosta & Cayón Salinas, 2011); a lo largo del periodo vegetativo, no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados, como tampoco en las interacciones ( $p > 0,05$ ) (Tabla 2). Estos resultados son similares a los obtenidos por Barrera-Violeth *et al.* (2012), quienes no encontraron diferencias estadísticamente significativas frente al control; sin embargo, Ruiz Martínez *et al.* (2016) reportan respuestas positivas en este parámetro, al fertilizar con NPK, plantas de banano inoculadas con micorrizas. Resultados similares son reportados por Vivas-Cedeño *et al.* (2018), quienes indican que el uso de HFM presentó influencia en la variable morfológica diámetro de pseudotallo, mostrando diferencias significativas entre tratamientos.

**EFOL:** El número de hojas emitidas osciló entre 24 y 26,7 unidades/planta para los tratamientos dos y cuatro, que se alcanzó a los 180 DDS, cifras que están dentro de los rangos que se reportan para el banano tipo Valery (Martínez Acosta & Cayón Salinas, 2011). No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos e interacciones evaluadas ( $p > 0,05$ ) (Tabla 2). Resultados similares son reportados por Barrera-Violeth *et al.* (2012), quienes realizando evaluaciones de HFM nativas, en el área foliar de plátano Hartón (*Musa* AAB Simmonds), en fase de vivero, no encontraron diferencias estadísticamente significativas frente al control; sin embargo, Vivas-Cedeño *et al.* (2018), utilizando dosis de HFM correspondiente al 15, 25 y 35 % del peso del cormo con diferentes sustratos, encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo las dosis de 25 y 35 % de HFM, en el sustrato con humus, las que presentaron mejores respuestas en número de hojas y área foliar.

La ausencia de diferencias entre las variables morfológicas medidas a los 180 DDS, se atribuye a que el fósforo se requiere en altas concentraciones en las regiones de crecimiento activo (Soto, 2008); por esta razón, es influyente en los primeros meses de edad de la planta de banano, por lo que es normal no encontrar diferencias significativas en el periodo de tiempo evaluado, que corresponde al final del ciclo vegetativo (López & Espinoza, 1995). Esto indica que, en las variables morfológicas, bajo las condiciones edafoclimáticas del lugar de estudio, no es necesaria la aplicación de fósforo al suelo, cuando se aplican micorrizas adaptadas a la zona.

### Variables de rendimiento

**NMAN.** El mayor número de manos lo presentó el tratamiento cinco, con 6,0 unidades/racimo; no presentó diferencia significativa con los tratamientos dos, tres y cuatro, pero sí con el testigo ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3). Estos resultados son similares a los reportados por Ruiz Martínez *et al.* (2016), quienes encontraron mejores respuestas cuando micorrizaron e implementaron planes de fertilización fosfórica. Aunque el número de manos/racimo está dentro de los estándares de la zona bananera de Urabá antioqueño, no superan la cantidad 8,3 a 8,76 manos/racimo, obtenidas por Navaneethakrishnan *et al.* (2013), en zonas bananeras de la India.

**NDED.** El mayor número de dedos lo presentó el tratamiento cinco, con 84,6 unidades/racimo y no presentó diferencias significativas con los tratamientos dos, tres y cuatro, pero sí con el testigo ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3). Estos resultados son inferiores a los 118 y 195 dedos/racimo reportados por Alves da Silva & Vilela Rodrigues (2013), quienes también encontraron diferencias estadísticas en este parámetro.

**DDED.** La CAL 2DA estuvo entre 11,4 y 12,6 líneas, para los tratamientos cinco y tres, respectivamente; CAL ULT, entre 9,0

Tabla 3. Cuadrados medios de los componentes del rendimiento del banano clon Valery en alta densidad inoculados con micorrizas y con diferentes dosis de  $P_2O_5$  en condiciones edafoclimáticas de la finca Antojó. Apartadó-Antioquia, 2019.

Fuente de Variación	Gl	Cuadrado medio de los componentes					
		NMAN	NDED	LAR	CAL ULT	CAL 2DA	WRAC
TTO	4	0,29**	109,40**	0,08*	0,07 NS	0,59 NS	9,66**
Error	10	0,02	11,36	0,02	0,28	0,23	0,51
Total	14						
CV (%)		2,78	3,90	1,90	5,81	4,04	4,89
R <sup>2</sup>		0,81	0,84	0,59	0,10	0,50	0,88

NMAN = número de manos/racimo; NDED = número de dedos/racimo; LAR = largo del dedo de la última mano; CAL UTL, CAL 2DA = grosor del dedo de la última y segunda mano; WRAC = peso del racimo/planta. Gl= grados de libertad, CV= coeficiente de variación, R<sup>2</sup>= R cuadrado. NS, \* y \*\*: no significativo, significativo ( $p \leq 0,05$ ) y altamente significativo ( $p \leq 0,01$ ) respectivamente.

y 9,4 líneas, para los tratamientos cuatro y uno; LAR, en mano apical, entre 7,9 y 8,3 pulgadas, para los tratamientos cinco y cuatro, respectivamente. De estos parámetros, solo el largo presentó diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3). Los valores encontrados están por encima de las publicaciones reportadas por Al-Harathi & Al-Yahyai, (2009), quienes encontraron un largo de 2,28 m.

**WRAC.** Se encontró entre 12,2 y 16,6 kg, para los tratamientos uno y cuatro, respectivamente, presentando diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3), siendo dosis comprendidas entre 50 y 75 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ , las de mejor respuesta, con pesos de 16,2 y 16,6 kg, correspondientemente. Estos valores son inferiores a los reportados por Ruiz Martínez *et al.* (2016), quienes realizando

inoculación con HFM y aplicaciones entre 25 y 100 g de  $P_2O_5 \cdot planta^{-1}$ , no encontraron diferencias estadísticas entre el peso del racimo con respecto a los tratamientos, pero sí con el testigo ( $p < 0,05$ ), con un peso máximo de 20,2 kg.

Se debe resaltar que existe una correlación alta positiva entre número de manos, dedos y peso neto de la fruta. Los pesos con respecto a los aumentos de las dosis de  $P_2O_5$ , presentan un comportamiento de función cuadrática (Figura 1). Este resultado es explicado por Shizi *et al.* (2011), quien indica que el efecto del aumento de las dosis en el rendimiento presenta una relación directamente proporcional, hasta un punto de inflexión, donde se genera una sobredosis, conllevando a la disminución de la tasa de utilización

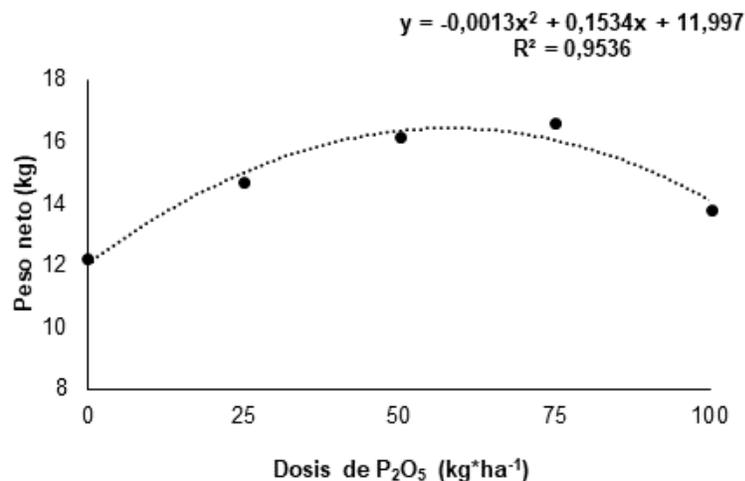


Figura 1. Peso neto de racimo de banano clon Valery en alta densidad inoculado con micorrizas en función de diferentes dosis de  $P_2O_5$ , bajo condiciones edafoclimáticas de la finca Antojó. Apartadó-Antioquia, 2019.

del mismo, afectando, consecutivamente, de una forma negativa el rendimiento.

Estos resultados reflejan la importancia del fósforo en los componentes del rendimiento; la ausencia de este elemento, conlleva a una baja productividad del cultivo de banano, cuya cantidad a aplicar se puede reducir en presencia de micorrizas, bajo las condiciones del estudio.

### Simbiosis micorrízica

**GCOL.** Los porcentajes de colonización se encontraron entre 50,2 y 59,5 %, para los tratamientos dos y tres (Figura 2), sin diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ); estos resultados son inferiores y contrastantes respecto a los reportados por Vivas-Cedeño *et al.* (2018), quienes utilizando diferentes dosis de HFM y sustratos, encontraron diferencias significativas, siendo el sustrato con humus,

el que presentó la mayor tasa de colonización de micorrizas en las raíces, con porcentajes cercanos al 80 %. Asimismo, en el cultivo de plátano, Barrera-Violeth *et al.* (2012) indican que la combinación de los géneros *Glomus*, *Acaulospora* y *Scutellospora* pueden colonizar las raíces, hasta en 91 %.

Se encontró mediana a baja correlación (54,1%), entre el GCOL y WRAC de banano (Figura 3); este resultado se atribuye a la formación de Adenosín trifosfato (ATP) en la planta, lo cual, puede ser explicado, en virtud de que, en todos los casos (con y sin

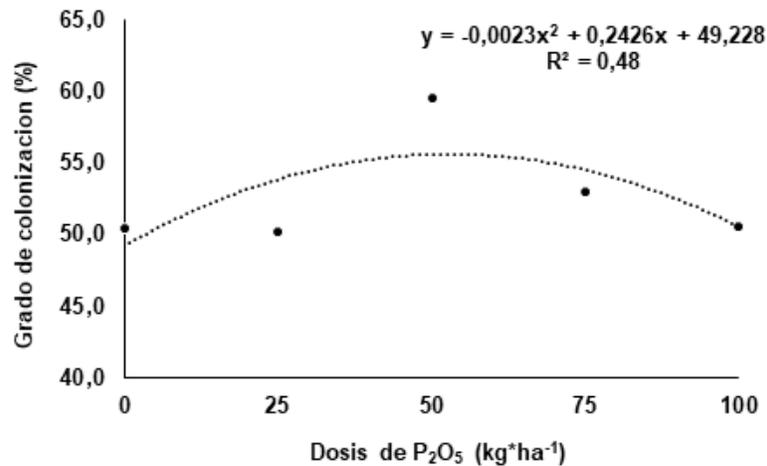


Figura 2. Grado de colonización en raíces de banano clon Valery en alta densidad inoculado con micorrizas en función de diferentes dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, en condiciones edafoclimáticas de la finca Antojó. Apartadó-Antioquia, 2019.

aplicación de fósforo), los HFM efectuaron una acción mediante simbiosis micorrízica, logrando interceptar el fósforo asimilable, mediante las hifas, favoreciendo el transporte - almacenamiento en las vesículas y posterior transformación - consumo por la planta.

El ATP, al catalogarse como transportador de energía y encontrar una relación fuente-sumidero, donde el sumidero final es el racimo racimo, genera un transporte de fotoasimilados, influyendo en las diferencias significativas del peso neto de la fruta y demás variables relacionadas (López & Espinoza, 1995).

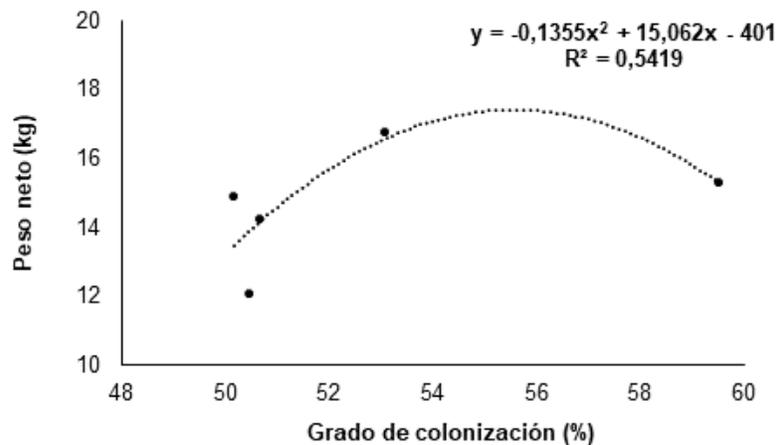


Figura 3. Correlación entre grado de colonización y peso neto de racimos de banano clon Valery en alta densidad inoculado con micorrizas, en condiciones edafoclimáticas de la finca Antojó. Apartadó-Antioquia, 2019.

NVES y NARB. Los valores promedio de vesículas se encontraron entre 0,7 a 4,3 unidades/placa y no se presentaron diferencias estadísticas, donde el mayor número se obtuvo con el tratamiento cuatro, resultado similar al reportado por Castellanos González

*et al.* (2018). En cuanto a las estructuras arbusculares, no se identificaron al momento de realizar la evaluación; esto se puede deber a que su tiempo de duración caducó, ya que presentan periodo de vida corto (Pérez & Vertel, 2010). Alarcón & Ferrera

Cerrato (2000) señalan que estas estructuras tienen un periodo de vida de, aproximadamente, dos semanas.

Di Barbaro *et al.* (2017) evaluando HFM nativos en topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) y resaltaron que la frecuencia de aparición de arbuscúlos y de vesículas fue entre 21 y 34 %, destacando que los resultados estuvieron influenciados por las condiciones generadas edáficamente y a la micotroficidad de la planta.

Jaizme-Vega *et al.* (2002) manifiestan que el cultivo presenta gran capacidad para beneficiarse de la simbiosis micorrízica, desde las primeras fases de desarrollo, perdurando su efecto después de su trasplante a campo. Las mejoras en la nutrición y el crecimiento del cultivo, indican el potencial uso de estos hongos, como biofertilizante (Bernal Monterrosa *et al.* 2021), generando, adicionalmente, un segundo enfoque, que permite afirmar la viabilidad de los HFM, como estrategia de control biológico frente a diferentes patógenos de raíz (Naranjo *et al.* 2022).

De acuerdo con los resultados encontrados en este estudio, se identifica que la inoculación con HFM y la fertilización fosfórica no influyeron en los componentes morfológicos de la planta de banano clon Valery, pero sí en algunos parámetros de producción, como son número de manos, número de dedos, largo del dedo y peso del racimo.

En presencia de micorrizas, bajo las condiciones del ensayo, se recomienda aplicar 50 kg de  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ , garantizando buenos rendimientos, lo que implica que las aplicaciones de  $P_2O_5$  se pueden reducir en un 31-40 %, manteniendo estabilidad en el peso de racimo, factor importante, a tener en cuenta, para los planes de fertilización.

El uso de micorrizas en el cultivo de banano clon Valery es una herramienta ecológica, que permite mantener la productividad y disminuir, no solo los costos de producción, sino que, también, hacer uso racional de fertilizantes fosforados y mitigar directamente la contaminación ambiental.

**Agradecimientos.** A la Corporación Nueva Ilusión, CORPONUI, por el aporte parcial a este ensayo; al Grupo Ucrania, por la disposición para llevar a cabo el proyecto con recurso personal e infraestructura y a la Universidad de Córdoba, por el aporte de los análisis de laboratorio. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados encontrados.

## REFERENCIAS

- ALARCÓN, A.; FERRERA CERRATO, R. 2000. Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. Ediciones Mundi-Prensa (México, D.F.). 260p.
- AL-HARTHI, K.; AL-YAHYAI, R. 2009. Effect of NPK fertilizer on growth and yield of banana in Northern Oman. *Journal of Horticulture and Forestry*. 1(8):160-167.
- ALVES DA SILVA, J.T.; VILELA RODRIGUES, M.G. 2013. Produção da bananeira 'Prata Anã' em função da aplicação de adubo fosfatado, em quatro ciclos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48(6):613-618.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600006>
- ARIAS HOYOS, A. 2010. Microorganismos eficientes y su beneficio para la agricultura y el medio ambiente. *Journal de Ciencia e Ingeniería*. 2(2):42-45.  
<https://doi.org/10.46571/JCI.2010.2.7>
- BARRERA BERDUGO, S. 2009. El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotecnología en el Sector Agropecuario Y Agroindustrial*. 7(1):123-132.
- BARRERA-VIOLETH, J.L.; OVIEDO-ZUMAQUE, L.E.; BARRAZA-ÁLVAREZ, F.V. 2012. Evaluation of native mycorrhizae in plantain crop (*Musa* AAB Simmonds) in nursery phase. *Acta Agronómica*. 61(4):286-295.
- BERNAL MONTERROSA, M.Á.; CABRALES HERRERA, E.M. 2022. Microorganismos y regulación de la fertilización fosfórica en banano: Uso de microorganismos eficientes y micorrizas en la fertilización fosfórica del cultivo de banano en alta densidad. *Editorial Académica Española*. 156p.
- BERNAL MONTERROSA, M.Á.; FONSECA MERCADO, F.F.; HENAO ORTIZ, A.; MEZA COGOLLO, J.R.; OCHOA SALAS, A.S. 2021. Evaluación de diferentes fuentes de micorrizas en plantas de banano en fase de vivero. *Revista Temas Agrarios*. 26(1).
- BHARADWAJ, D.P.; LUNDQUIST, P.-O.; ALSTRÖMA, S. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungal spore-associated bacteria affect mycorrhizal colonization, plant growth and potato pathogens. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(10):2494-2501.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.06.012>
- BRUNDRETT, M.C.; TEDERSOO, L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*. 220(4):1108-1115.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- CAMARGO RICALDE, S.L.; MONTAÑO, M.N.; DE LA ROSA MERA, C.J.; MONTAÑO ARIAS, S.A. 2012. Micorrizas: Una gran unión debajo del suelo. *Revista digital universitaria*. 13(7):3-19.
- CANO, M.A. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma* ssp. y *Pseudomonas* ssp. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 14(2):15-31.  
<https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>

13. CARRILLO AGUILAR, D.G.; HERNÁNDEZ ORTEGA, H.A.; FRANCO RAMÍREZ, A.; VALLEJO JIMÉNEZ, B.; GUZMÁN GONZÁLEZ, S.; MANZO SÁNCHEZ, G.; SÁNCHEZ RANGEL, J.C. 2021. Influencia de las propiedades edáficas en la abundancia de esporas y colonización de hongos micorrízicos arbusculares en banano en dos temporadas del año. *Scientia fungorum*. 51:e1306. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1306>
14. CASTELLANOS GONZÁLEZ, L.; FORERO CUADROS, J.; RODRÍGUEZ RINCÓN, F.; SÁNCHEZ MONTANO, L.R. 2018. Gramíneas nativas en suelos desnudos al borde de una carretera y su simbiosis con micorrizas. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 21(1):253-257. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.684>
15. DI BARBARO, G.; ANDRADA, H.; GONZÁLEZ BASSO, V.; ALURRALDE, A.L.; DEL VALLE, E.; BRANDÁN DE WEHT, C. 2017. Micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros nativos en topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) en Catamarca, Argentina. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(2):98-106. <https://doi.org/10.22267/rcia.173402.75>
16. ESPINAL G., C.F.; MARTÍNEZ COVALEDA, H.J.; PEÑA MARÍN, Y. 2005. La cadena del banano en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural- MADR; Observatorio Agrocardenas Colombia. 51p.
17. GARZÓN, L.P. 2016. Importancia de las micorrizas arbusculares (MA) para un uso sostenible del suelo en la Amazonia colombiana. *Revista Luna Azul*. 42:217-234. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.14>
18. GUADARRAMA CHÁVEZ, P.; SÁNCHEZ GALLÉN, I.; ÁLVAREZ SÁNCHEZ, J.; RAMOS ZAPATA, J. 2004. Hongos y plantas: beneficios a diferentes escalas en micorrizas arbusculares. *Ciencias*. 73:38-45.
19. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2018. Promedios climatológicos. Disponible desde Internet en: [www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima](http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima) (con acceso el 11/10/2019).
20. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ta edición. 648p.
21. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2007. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá Departamento de Antioquia. 490p.
22. JAIZME-VEGA, M.C.; ESQUIVEL DELAMO, M.; TENOURY DOMINGUEZ, P.; RODRÍGUEZ ROMERO, A.S. 2002. Effets de la mycorrhization sur le développement de deux cultivars de bananier issus de la micropropagation. *Infomusa*. 11(1):25-28.
23. LÓPEZ, M.; ESPINOZA, M. 1995. Manual de nutrición y fertilización del banano: Una visión practica del manejo de la fertilización. Corporación Bananera Nacional-CORBANA; International Plant Nutrition Institute-IPNI. 86p.
24. MARTÍNEZ ACOSTA, A.M.; CAYON SALINAS, D.G. 2011. Dinámica del crecimiento y desarrollo del banano (*Musa* AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*. 64(2):6055-6064.
25. MICROFERTISA. 2016. Manual técnico de fertilización de cultivos. Microfertisa (Bogotá, Colombia).
26. NARANJO, J.; MORA-GONZÁLEZ, A.; OVIEDO-ANCHUNDIA, R.; NARANJO-TORRES, H.; FLORES-CEDEÑO, J.; BARCOS-ARIAS, M. 2022. Estudio preliminar de micorrizas arbusculares presente en *Phytelephas aequatorialis* localizado en tres agroecosistemas costeros. *Revista Ciencia UNEMI*. 15(39):65-75. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol15iss39.2022pp65-75p>
27. NAVANEETHAKRISHNAN, K.S.; GILL, M.I.S.; RAMESH KUMAR, S. 2013. Effect of different levels of N and P on ratoon banana (*Musa* spp. AAA). *Journal of Horticulture and Forestry*. 5(6):81-91.
28. PÉREZ, A.; VERTEL, M. 2010. Evaluación de la colonización de micorrizas arbusculares en pasto *Bothriochloa pertusa* (L) A. Camus. *Revista MVZ Córdoba*. 15(3):2165-2174. <https://doi.org/10.21897/rmvz.303>
29. RUIZ MARTÍNEZ, L.; ARMARIO ARAGÓN, D.; RIVERA ESPINOSA, R.; ESPINOSA CUÉLLAR, A.; SIMÓ GARCÍA, J.; ESPINOSA CUÉLLAR, E. 2016. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio combinadas con micorrizas en el cultivo del banano. *Revista Agricultura Tropical*. 2(1):1-8.
30. SÁNCHEZ TORRES, J.D.; MIRA CASTILLO, J.J. 2013. Principios para la nutrición del cultivo de banano. Asociación de Bananeros de Colombia-AUGURA; Centro de Investigaciones del Banano-CENIBANANO. 253p.
31. SELOSSE, M.-A. 2019. Micorrizas: la simbiosis que conquistó la tierra firme. *Investigación y ciencia*. 516:36-43.
32. SEPÚLVEDA VARGAS, R.D. 2020. Economía y agroecología: construyendo alternativas al desarrollo rural. 1ed. Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín). 217p.

33. SHIZI, K.; SHIYAO, T.; CHUNYU, L.; GANJUN, Y.; YANLONG, H.; GUOFU, W. 2011. Effect models of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer formulation in banana. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. 1:147-150.
34. SOTO, M. 2008. Bananos: técnicas de producción, manejo, poscosecha y comercialización. Tercera Edición. Litografía e Imprenta LIL (Costa Rica).
35. TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2006. *Fisiología vegetal*. Ed.III. Universitat Jaume-I. 1338p.
36. VIERHEILIG, H. 2004. Regulatory mechanisms during the plant - arbuscular mycorrhizal fungus interaction. *Canadian Journal of Botany*. 82(8):1166-1176. <https://doi.org/10.1139/b04-015>
37. VIVAS-CEDENO, J.; LAZO-ROGER, Y.; GONZÁLEZ-RAMÍREZ, I.; ROBLES-GARCÍA, J. 2018. Hongos micorrizicos arbusculares en el cultivo de plátano en viveros. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*. 4(3):3-15. <http://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2018.4.3.julio.3-15>



# Minador en albahaca *Ocimum basilicum* L. y su parasitoide

## Leaf-miners in basil *Ocimum basilicum* L. and its parasitoid

Rafael Paúl Montilla-Coronado<sup>1\*</sup> ; Carlos Eduardo Ramos-Gómez<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, INIA, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, CENIAP, Unidad de Protección Vegetal, UPV, Laboratorio de Entomología. Maracay - Aragua, Venezuela; e-mail: rmoncor7@gmail.com; cramos.inia@gmail.com

\*autor de correspondencia: rmoncor7@gmail.com

**Cómo citar:** Montilla-Coronado, R.P.; Ramos-Gómez, C.E. 2022. Minador en albahaca *Ocimum basilicum* L. y su parasitoide. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2292. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2292>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** mayo 27 de 2022

**Aceptado:** diciembre 5 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

La albahaca es una planta de distribución mundial, de uso cotidiano en la preparación de comidas. En Venezuela, aspectos sobre insectos plagas de la albahaca y de sus controladores naturales, son desconocidos. El presente trabajo ofrece información sobre una mosca minadora y un parasitoide que se encontraron en muestras de plantas, con signos de daños foliares, provenientes de huertos familiares, aledaños al Parque Nacional Henri Pittier, de los municipios Girardot e Iragorry, las cuales, fueron colocadas en cámaras de cría, para la emergencia de los adultos; una vez que emergieron fueron capturados y debidamente montados para su identificación. Como resultado, se capturaron adultos de un díptero y una avispa parasitoide, que fueron identificados como *Calycomyza hyptidis* y *Opius* sp. Este parasitoide constituye el primer registro de asociación parasítica sobre *C. hyptidis* en albahaca. Todos los adultos fueron depositados en el Museo de Insectos de Interés Agrícola (MIIA).

Palabras clave: Braconidae; Control biológico; Cultivo Agroecológico; Fitófago; Parasitoide.

### ABSTRACT

Basil is a plant with worldwide distribution, used daily in the preparation of meals. In Venezuela, aspects of basil pest insects and their natural controllers are unknown. The present work offers

information on a leafminer fly and a parasitoid that were found in samples of plants with signs of foliar damage, coming from family orchards near the Henri Pittier National Park, from the Girardot and Iragorry municipalities of Aragua state, which were placed in breeding chambers for the emergence of adults, once they emerged they were captured and properly mounted for identification. As a result, adults of a diptera and a parasitoid wasp were identified as *Calycomyza hyptidis* and *Opius* sp. This parasitoid constitutes the first record of a parasitic association on *C. hyptidis* on basil. All the adults were deposited in the Museum of Insects of Agricultural Interest (MIIA).

Keywords: Agroecological cultivation; Biological control; Braconidae; Parasitoid; Phytophagous.

### INTRODUCCIÓN

Albahaca, basilico o alhábega (*Ocimum basilicum* L.) (Lamiaceae), es una hierba aromática anual de distribución mundial, nativa de las regiones tropicales de Asia. Según Moncayo Luján *et al.* (2015) y Combatt-Caballero *et al.* (2020) presenta potencial productivo para el desarrollo agrícola de Venezuela.

La albahaca es importante en el ámbito culinario, como condimento y en la agroindustria, por sus aceites esenciales (De Sousa & Couri 2013), pero también lo es para la conservación de la biodiversidad (Vázquez Moreno *et al.* 2008), así como una opción en el control

de insectos de importancia agrícola. En este sentido, Simon *et al.* (1990) señalan que los aceites esenciales de la albahaca contienen componentes biológicamente activos, con acción insecticida, nematocida, fungistática y antimicrobianas, atribuidas a los constituyentes predominantes de los mismos, entre ellos, metil chavicol, eugenol linalool, alcanfor y metil cinamato.

Simon *et al.* (1990), también mencionan que, adicionalmente, dos componentes menores del aceite esencial de albahaca blanca, juvocimeno I y II, son reportados como análogos de hormonas juveniles (JHA); a este señalamiento, Dhadialla *et al.* (2010) indican que las JHAs pueden interferir en el proceso de metamorfosis de las larvas, así como en el desarrollo embrionario y puede generar esterilidad, tanto en hembras como en machos de algunos insectos, como la hormiga *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) y la mosca blanca *Bemisia* sp. (Hemiptera: Aleyrodidae); otro ejemplo del efecto de estas hormonas, se observaron en *Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) (Bouzeraa & Soltani-Mazouni, 2014).

Matienzo Brito *et al.* (2011), evaluando la diversidad de artrópodos en plantas con inflorescencia en áreas urbanas, encontraron que, en la albahaca blanca, la frecuencia de aparición de artrópodos benéficos, como *Cycloneda sanguinea* Limbifer y *Apis mellifera* L., fue constante, aunque su riqueza fue bastante baja, respecto a otros artrópodos. Por otro lado, Vázquez Moreno *et al.* (2008) señalan a la albahaca blanca como importante reservorio de *Orius insidiosus* Say, míridos y parasitoides de Agromyzidae, debido a que esta planta es fuente de néctar y alimento, que resulta beneficioso al cultivo.

Bernal Areces *et al.* (2012) mencionan a *Atta insularis* Guérin-Méneville, *Polyphagotarsonemus latus* Banks y al picudo verde azul *Pachnaeus litus* Germar, como fitófagos en cultivos protegidos de *O. basilicum*, en Cuba. Briseño Ruiz *et al.* (2013) señalan a *Liriomyza* spp., *Spodoptera exigua* Hübner, *Frankliniella occidentalis* Pergande, *Bemisia tabaci* Gennadius y *Myzus persicae* Sulzer, como las plagas más comunes de la albahaca, en México.

De Sousa & Couri (2013) mencionan que existen algunos patógenos conocidos de la albahaca, que incluyen hongos, que pueden causar daños al cultivo y que nuevos registros pueden ser altamente significativos, considerando la importancia económica de esta planta.

En Venezuela, la planta se utiliza ampliamente en la preparación de comidas en hogares y en restaurantes, tanto de platos tradicionales como exóticos, de allí, su importancia como condimento esencial en las actividades culinarias; sin embargo, en el país no se conocen registros científicos o estadísticos sobre su manejo agronómico, así como tampoco se disponen de datos sobre áreas cultivadas, ni de lo que representa económicamente su uso; tampoco, se cuenta con registros actualizados de insectos plagas y sus controladores naturales, aspecto importante a tomar en cuenta, sobre futuras investigaciones de la planta. Solo se conoce de su siembra, de manera dispersa, en huertos familiares.

En este sentido, el trabajo actual tiene por finalidad contribuir al conocimiento de la entomofauna fitófaga y benéfica, asociada al cultivo de la albahaca que, en un futuro, pueda servir para programas de control de sus insectos plagas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En huertos familiares, de zonas urbanas ubicadas en los municipios Girardot, coordenadas geográficas 10°15'06" N, 67°36'05" O y Mario Briceño Iragorry, coordenadas geográficas 10°18'21" N, 67°38'04" O, del estado Aragua. Ambos municipios, ubicados en el piedemonte y valle encajonado aledaños al Parque Nacional Henry Pittier, hacia el lado sur de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela, se colectaron muestras vegetales de albahaca (*Ocimum basilicum*), con daños ocasionados por un insecto minador y en las que se evidenciaron estados inmaduros (larvas y pupas) del mismo. Las muestras fueron consignadas en el Laboratorio de Entomología, de la Unidad de Protección Vegetal (UPV), del INIA CENIAP.

En el laboratorio, las hojas fueron individualizadas en cajas Petri, cuyo fondo contenía papel absorbente, previamente humedecido con agua destilada y colocadas en condiciones ambientales, con temperatura promedio 25 °C y 60 % HR, hasta la emergencia de los adultos del insecto minador o de algún enemigo natural.

Los adultos emergidos fueron capturados y conservados en viales de vidrio de 3 cm<sup>3</sup>, con alcohol etílico al 75 %, hasta su montaje en alfileres entomológicos, para su identificación.

Para la toma de fotos, se utilizó una cámara digital marca Canon D40, con lente Zoom Canon 1:3,6-5,6 58Ø 18-55 mm, al cual, se le acopló una base para lentes macro marca Leitz Wetzlar Photar y se utilizó una lente macro 1:2,8/50, de la misma marca.

Para la identificación de los adultos del parasitoide, se utilizó la clave de Wharton *et al.* (1997) y para la del díptero, la clave de Spencer (1973; 1983) y por comparación, con ejemplares depositados en el Museo de Insectos de Interés Agrícola (MIIA), del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). La identificación del adulto de la mosca fue corroborada por personal especializado del Museo del Instituto de Zoología Agrícola (MIZA), de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, ambas instituciones en Maracay, Venezuela.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las hojas de *O. basilicum*, se observó un minado circular de bordes irregulares (Figura 1a), ocasionado por la acción de fitofagia de estados inmaduros de un díptero, cuyo adulto obtenido de la cría resultó ser una especie identificada como *Calycomyza hyptidis* Spencer (Diptera: Agromyzidae) (Figura 1b). Esta especie fue reportada por Spencer para el país, en 1973, sobre *O. basilicum*, *Hyptis* sp. y *Salvia* sp. (Lamiaceae).

Todas las larvas de especies de Agromyzidae son fitófagas y atacan varios órganos de la planta, tales como hoja, tallos, ramas, semillas y



Figura 1. a) Síntoma de daño en hoja de *Ocimum basilicum*, ocasionado por larva minadora de *Calycomyza* (Diptera: Agromyzidae); b) Adulto de la mosca minadora *Calycomyza hyptidis*, obtenido de crías de larvas en hojas de *Ocimum basilicum*; c) Vista dorsal del adulto del parasitoide *Opius* sp. (Hymenoptera: Braconidae), obtenido de crías de larvas de mosca Agromyzidae, en hojas de *Ocimum basilicum*; d) Vista lateral del adulto de *Opius* sp.

flores; muchas son minadores y causan grandes pérdidas económicas (De Sousa & Couri, 2016). Es de destacar, que los registros más actualizados sobre *Calycomyza* en Venezuela son los señalados por Spencer (1973; 1983), quien indica que, con 21 especies, *Calycomyza* es el género más grande de moscas minadoras, conocidas para el país.

Además de los estados inmaduros criados de *C. hyptidis*, emergieron adultos de una avispa parasitoide, identificada como *Opius* sp. (Hymenoptera: Braconidae). Este parasitoide es señalado como un aliado importante en el control natural de pupas de diferentes géneros de Diptera (García-Palacios *et al.* 2014; Kalaisekar *et al.* 2017) y se reporta parasitando varias especies de *Calycomyza* (Dos Santos *et al.* 2007) (Figuras 1c y 1d). Para Venezuela, el género *Opius* se ha encontrado asociado a moscas que atacan frutales cultivados y silvestres (Terán, 1980; Katiyar *et al.* 1995), pero no se reportaba en albahaca, por lo que su descubrimiento es un importante avance en un registro de asociación biocontroladora, sobre esta mosca, en esta planta. Los adultos de ambos insectos, se encuentran depositados en el Museo de Insectos de Interés Agrícola (MIIA), del INIA-CENIAP, en Maracay, Venezuela.

Es de indicar, que los adelantos en estudios entomológicos sobre plantas comestibles y ornamentales poco explotadas comercialmente, representan una ventaja a la hora de establecer estrategias de control, con énfasis en la conservación de la biodiversidad y el ambiente (Altieri & Nicholls, 2007).

Este trabajo representa un aporte al conocimiento de la fauna entomófaga asociada a insectos fitófagos de la albahaca. Esta planta no cultivada comercialmente en el país puede llegar a serlo en un mediano plazo, por su aprecio en el contexto culinario y por sus aceites esenciales para la agroindustria. Adicionalmente, con más investigación entomológica, se puede constituir un insumo para propuestas de planes de control fitosanitario, con énfasis en control biológico, con uso de entomófagos, desde la visión de contar con la base de identificación de especies de insectos, asociados al cultivo.

**Conflicto de intereses:** Los autores del presente trabajo expresan que los resultados presentados en esta publicación son originales y que no han sido publicados ni parciales ni totalmente en otra revista, es total producto intelectual de los autores, por lo que consideramos que no presenta conflicto de interés con ninguna otra persona natural o jurídica. **Financiación:** Este estudio fue financiado con recursos ordinarios del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) de Venezuela.

## REFERENCIAS

1. ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. 2007. Biodiversidad y manejo de plagas en agroecosistemas. Icaria Editorial. 248p.
2. BERNAL ARECES, B.; DERONCELÉ CAIGNÉ, R.; DÍAZ PÉREZ, T. 2012. Registro de plagas de albahaca blanca

- (*Ocimum basilicum*) bajo condiciones de cultivo protegido. Fitosanidad (Cuba). 16(2):87-89.
3. BOUZERAA, H.; SOLTANI-MAZOUNI, N. 2014. Comparative effects of two moulting hormone agonists (Methoxyfenozide and Tebufenozide) on the mediterranean flour moth *Ephesia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae): Ecdysteroids amounts of testes and reproductive events. World Applied Sciences Journal. 31(11):1903-1910. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.31.11.83332>
  4. BRISEÑO RUIZ, S.E.; AGUILAR GARCÍA, M.; VILLEGAS ESPINOZA, J.A. 2013. El cultivo de la albahaca. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (La Paz, Baja California Sur, México). 33p.
  5. COMBATT-CABALLERO, E.; PÉREZ-POLO, D.; VILLALBA-ARTEAGA, J.; MERCADO-LÁZARO, J.; JARMA-OROZCO, A. 2020. Macronutrientes en el tejido foliar de albahaca *Ocimum basilicum* L. en respuesta a la aplicación de nitrógeno y potasio. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 23(2):e1325. <http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1325>
  6. DE SOUSA, V.R.; COURI, M.S. 2013. *Calycomyza hyptidis* Spencer (Diptera, Agromyzidae): descriptions, redescrptions and first record in *Ocimum basilicum* (Lamiaceae) in Brazil. Revista Brasileira de Entomología. 57(2):209-212. <http://dx.doi.org/10.1590/S0085-56262013005000007>
  7. DE SOUSA, V.R.; COURI, M.S. 2016. Family Agromyzidae. Zootaxa. 4122(1):659-676. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.4122.1.56>
  8. DHADIALLA, T.S.; RETNAKARAN, A.; SMAGGHE, G. 2010. Insect growth- and development-disrupting insecticides. In: Gilbert, L.I.; Gills, S.S. (eds.). Insect control biological and synthetic agents. Elsevier; Academic Press (Londres, Reino Unido). p.121-181.
  9. DOS SANTOS, J.P.; RODRIGUES REDAELLI, L.; DAL SOGLIO, F.K. 2007. Dípteros minadores e seus parasitóides em plantas de crescimento espontâneo em pomar orgânico de citros em Montenegro, RS, Brasil. Iheringia, Série Zoologia. 97(3):280-285. <https://doi.org/10.1590/S0073-47212007000300011>
  10. GARCÍA-PALACIOS, D.; BAUTISTA MARTÍNEZ, N.; VALDEZ CARRASCO, J.M.; URZÚA SORIA, F.; ROMERONÁPOLES, J.; VON-TSCHIRNHAUS, M. 2014. Identification of leaf-miners (Diptera: Agromyzidae) associated with vegetable crops, and their parasitoids. Acta Zoológica Mexicana. 30(1):237-242.
  11. KALAISEKAR, A.; PADMAJA, P.G.; BHAGWAT, V.R.; PATIL, J.V. 2017. Chapter 5- Pest Management strategies and technologies. In: Kalaisekar, A.; Padmaja, P.G.; Bhagwat, V.R.; Patil, J.V. (eds.). Insect Pests of Millets. Academic Press. p.143-183. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804243-4.00005-7>
  12. KATIYAR, K.P.; CAMACHO, J.; GERAUD, F.; MATHEUS, R. 1995. Parasitoides himenópteros de moscas de las frutas (Diptera: Tephritidae) en la región occidental de Venezuela. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Zulia. 12(3):303-312.
  13. MATIENZO BRITO, Y.; VEITÍA RUBIO, M.; ALAYÓN GARCÍA, G. 2011. Composición y riqueza de insectos y arañas asociados a plantas florecidas en sistemas agrícolas urbanos. Fitosanidad (Cuba). 15(1):25-29.
  14. MONCAYO LUJÁN, M.D.R.; ÁLVAREZ REYNA, V.D.P.; GONZÁLEZ CERVANTES, G.; SALAS PÉREZ, L.; CHÁVEZ SIMENTAL, J.A. 2015. Producción orgánica de albahaca en invernadero en la Comarca Lagunera. Terra Latinoamericana. 33(1):69-77.
  15. SIMON, J.E.; QUINN, J.; MURRAY, R.G. 1990. Basil: A source of essential oils. En: Janick, J.; Simon, J.E. (eds.). Advances in new crops. Timber Press (Portland, OR). p.484-489.
  16. SPENCER, K.A. 1973. The Agromyzidae (Diptera) of Venezuela. Revista de la Facultad de Agronomía. 7(2):5-107.
  17. SPENCER, K.A. 1983. Leaf mining Agromyzidae (Diptera) in Costa Rica. Revista de Biología Tropical. 31(1):41-67.
  18. TERÁN, J.B. 1980. Lista preliminar de Hymenoptera parásitos de otros insectos en Venezuela. Revista Facultad de Agronomía (Maracay). 11(1-4):283-389.
  19. VÁZQUEZ MORENO, L.L.; MATIENZO BRITO, Y.; VEITÍA RUBIO, M.M.; ALFONSO SIMONETTI, J. 2008. Conservación y manejo de enemigos naturales de insectos fitófagos en los sistemas agrícolas de Cuba. CIDISAV (Cuba). 198p.
  20. WHARTON, R.A.; MARSH, P.M.; SHARKEY, M.J.; MARSH, P.M. 1997. Manual of the New World genera of the family Braconidae (Hymenoptera). The International Society of Hymenopterists. Number 1. 439p.



# Quiescence as a strategic stage for the infective process of *Colletotrichum* species

## La quiescencia como estado estratégico del proceso infectivo de especies de *Colletotrichum*

Alberto Páez-Redondo<sup>1\*</sup> ; Dov Prusky<sup>2</sup> ; Lilliana Hoyos-Carvajal<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Magdalena, Programa de Ingeniería Agronómica. Santa Marta - Magdalena, Colombia; e-mail: apaez@unimagdalena.edu.co

<sup>2</sup>Institute of Postharvest and Food Sciences, The Volcani Center, Agricultural Research Organization. Rishon LeZion, Israel; e-mail: dovprusk@volcani.agri.gov.il

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Departamento de Ciencias Agronómicas. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: limhoyosca@unal.edu.co

\*corresponding author: apaez@unimagdalena.edu.co

**How to cite:** Páez-Redondo, A.; Prusky, D.; Hoyos-Carvajal, L. 2022. Quiescence as a strategic stage for the infective process of *Colletotrichum* species. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2073. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2073>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** August 30, 2021

**Accepted:** September 22, 2022

**Edited by:** Helber Adrian Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

*Colletotrichum*, a genus of Ascomycota fungi with a diversity of species grouped into several species complexes, or clades, is associated with diseases known as “Anthracnose”. It affects significantly different tropical and subtropical fruit species. Infections occur in the field and postharvest; quiescent stages are mainly responsible for postharvest losses. An analysis of this pre-infective stage is made based on consulted papers. The infective process is modulated by the length of the quiescent period of the fungus during the vegetative or pre-productive stages of trees. Quiescent stage is determined by the host’s biochemical responses and the pathogen’s activity. Once the pathogen is activated, it develops an infectious necrotrophic process. *Colletotrichum* quiescence has been studied mainly in subtropical fruits and horticultural species, and the studies highlight the role of volatile compounds, metabolites and enzymes involved in the length and breaking of quiescence, as well as the differential responses according to the phenological stage and the genotype of the plant. Transcriptomic and proteomic analysis of the host-fungus interaction have revealed the role of genes in the occurrence and breaking of quiescence. Knowledge about

the quiescence of *Colletotrichum* in tropical fruits is necessary to improve management efficiency. Detection and induction of quiescent infections has been studied and genomics has allowed to understand the occurrence of quiescence in the infective process; however, in crops in the tropics, such as mango, an important crop in Colombia, questions about associated species and biology of their quiescence are still unanswered.

**Keywords:** Anthracnose; Fruit trees; Hemibiotrophic lifestyle; Infective process; Mango.

### RESUMEN

*Colletotrichum* es un hongo ascomicete, con diversidad de especies agrupadas en complejos o clados y se asocia a enfermedades conocidas, como “Antracnosis” y afecta significativamente especies de frutas tropicales y subtropicales. Las infecciones ocurren en el campo y postcosecha; los estados quiescentes son los principales responsables de pérdidas en postcosecha. Se realizó un análisis de esta etapa pre-infectiva, a partir de publicaciones consultadas. La infección está modulada por la duración del período de quiescencia

del hongo durante las etapas vegetativa o pre-productivas de los árboles y está determinado por las respuestas bioquímicas del hospedante y la actividad del patógeno. Una vez se activa el patógeno, se desarrolla un proceso infeccioso necrotrófico. La quiescencia de *Colletotrichum* se ha estudiado, principalmente, en frutas subtropicales y especies hortícolas y destacan el papel de compuestos volátiles, metabolitos y enzimas en la duración y en la pérdida de la quiescencia, así como las respuestas diferenciales, según la fenología y el genotipo. Análisis transcriptómicos y proteómicos de la interacción hospedante-hongo han revelado el papel de genes en la ocurrencia y pérdida de quiescencia. Conocer la quiescencia de *Colletotrichum* en frutas tropicales es necesario para hacer más eficiente el manejo de la enfermedad. Se ha estudiado la detección e inducción de infecciones quiescentes y estudios genómicos han permitido entender su ocurrencia durante la infección; sin embargo, en cultivos en el trópico, como el mango, un cultivo importante en Colombia, las preguntas sobre las especies asociadas y la biología de la quiescencia de estas, aún están sin respuesta.

Palabras claves: Antracnosis; Árboles frutales; Estilo de vida Hemibiotrófico; Mango; Proceso infeccioso.

## INTRODUCTION

*Colletotrichum* is a genus of the order Glomerellales, family Glomerellaceae that has high diversity and is grouped into several species complexes or clades (Jayawardena *et al.* 2021; Liu *et al.* 2022; Talhinas & Baroncelli, 2021). This genus comprises major plant pathogens that cause Anthracnose diseases in many crops worldwide (Zakaria, 2021; Gañán *et al.* 2015; Ismail *et al.* 2015; Sharma & Kulshrestha, 2015; Honger *et al.* 2014; Liu *et al.* 2014). *Colletotrichum* species present different lifestyles, from non-pathogenic endophyte to necrotrophic pathogen; as a causal agent of diseases, it has been considered a hemibiotrophic microorganism (Freeman *et al.* 2001).

Disease causes significant losses of the marketable production; in mango can cause losses between 39 and 50 % in harvest and 52 % or more in postharvest (Páez Redondo, 2003; Kumari & Singh, 2017). In postharvest, the infective process is regulated by the length of the quiescent stage of the fungus during immature stages of fruits and it is generally activated when organs mature (Prusky *et al.* 2013; Ploetz, 2007).

The infectious process varies among species of *Colletotrichum*, and the occurrence of quiescence is one of those differential aspects. In thale cress (*Arabidopsis thaliana*), *C. higginsianum* cause leaf Anthracnose and once the appressorium is activated, the germinated appressorium forms a biotrophic primary hyphae and the fungus invades the epidermal cells without causing any damage and confined to the first invaded host cell; subsequently, a necrotrophic secondary hypha is formed and hemibiotrophic infective process takes place, invading new cells and intercellular spaces (O'Connell *et al.* 2012). In tomato - *C. gloeosporioides* interaction, melanized appressorium are formed from conidia germinated, and maintain quiescent during some time; after, they develop a penetration peg

and differentiate to a dendritic like structure inside the fruit cuticle, still without penetration of the epidermal cells (Alkan *et al.* 2015); swollen hyphae within the epidermal cell were formed, these structures are also described in leaf infections by *Colletotrichum* species (O'Connell *et al.* 2012; Latunde-Dada, 2001). Usually, as the fruit ripen quiescence ends and infective hyphae extending from the swollen hyphae were observed; at this stage, the fungus shift to a necrotrophic phase (Alkan *et al.* 2015; O'Connell *et al.* 2012; Latunde-Dada, 2001).

Quiescence is part of the colonization process of several *Colletotrichum* species and occurs once the biotrophic phase begins in immature organs or during transition from the biotrophic to the necrotrophic stage (Prusky *et al.* 2013), in different hosts such as mango (Páez Redondo, 2003), tomato (Alkan *et al.* 2015), papaya (Amaral *et al.* 2017), avocado (Fischer *et al.* 2017), guava (Guédez & Rodríguez, 2021) and bananas (De Lapeyre de Bellaire *et al.* 2000), among others. Initial advances in transcriptomic studies have revealed the role of genes that are activated during the interaction between the fungus and some of its hosts, including quiescence. The amount and type of quiescence-related genes vary with the fungus species and the host involved, although some effectors and transcription factors are common (Fu *et al.* 2022; Korn *et al.* 2015; Alkan *et al.* 2015; O'Connell *et al.* 2012). However, the understanding of *Colletotrichum* species quiescence phase requires further research for different hosts, especially under tropical conditions. Therefore, this review aims to update the knowledge about quiescence in some *Colletotrichum* species in tropical fruit trees.

## MATERIALS AND METHODS

The present paper consists of a literature review and provides information about the quiescence of *Colletotrichum* spp. in fruit species, and factors associated with its occurrence and breaking are explicitly highlighted, mainly under subtropical conditions. Additionally, concepts that could be the basis of questions or hypotheses for future research are raised, especially for tropics where advances on the subject are still limited.

The information consulted was taken from different scientific articles, review articles and chapter of books available in different bibliographic databases such as Science Direct, Elsevier, Scopus and Google Scholar, emphasizing the aspects related to the occurrence of quiescence in the *Colletotrichum*-host interactions. Some keywords used were quiescence, *Colletotrichum*, quiescent infections, tropical fruit trees, Anthracnose, plant diseases, plant pathogens, management and endophytes, in different combinations of searches. No specific time period was defined for the search for information, to identify advances in knowledge on the topic; however, papers from the last 35 years were consulted, in English and Spanish.

## RESULTS AND DISCUSSION

**General aspects of quiescence.** Quiescence is considered part of pre-colonizing process in some species of plant pathogens and is

usually considered a resting stage of the microbe following the onset of infection, but before the necrotrophic colonization is initiated (Prusky *et al.* 2013). Quiescence is strategic for some phytopathogenic fungi, and occurs among biotrophic and necrotrophic stages of some hemibiotrophic pathogens (Figure 1); for some phytopathogenic fungi, it is not easy to distinguish whether their lifestyle is hemibiotrophic or totally necrotrophic (Rajarammohan, 2021) and in this situation, quiescence can be the difference between both lifestyles. Quiescence is reported for other pathogens fungi-host interactions, such as grapevine (*Vitis vinifera*) - *Neofusicoccum parvum* (Czemmel *et al.* 2015), apple (*Malus domestica*) - *Phlyctaena vagabunda* (Lattanzio *et al.* 2001), pistachio (*Pistacia vera*) - *Botryosphaeria dothidea* (Ahimera *et al.* 2003), *V. vinifera* - *B. cinerea* (Haile *et al.* 2017), papaya (*Carica papaya*) - *Lasiodiplodia theobromae* (Amaral *et al.* 2017), mango (*Mangifera indica*) - *Lasiodiplodia theobromae* and *Alternaria alternata* (Diskin *et al.* 2017), mango - *Botryosphaeria*, *Phomopsis* and *Pestalotiopsis* (Johnson *et al.* 1992). This article will only focus on *Colletotrichum*-host interactions.

Quiescent stages of *Colletotrichum* are reported in various fruit trees (Sharma & Kulshrestha, 2015; Prusky *et al.* 2013), such as banana and others Musaceae (Photita *et al.* 2005), guava (*Psidium guajava*) (Fischer *et al.* 2019), avocado (*Persea americana*) (Binyamini & Schiffmann-Nadel, 1972), mango (*Mangifera indica*) (Paramasivan *et al.* 2009), papaya (*Carica papaya*) (Siddiqui & Ali, 2014), passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* and *P. edulis* f. *edulis*) (Joy & Sherin, 2016) and citrus trees (*Citrus* spp.) (Peres *et al.* 2005). Quiescence in the genus *Colletotrichum* is reported for some species, mainly in *C. gloeosporioides* specie (Prusky *et al.* 2013).

Quiescence is modulated by the availability of nutrients, metabolic changes, and presence of antifungal compounds in the host (Prusky *et al.* 2013), as well as to the insufficient enzyme potential of the fungus to invade unripe fruit (Adikaram *et al.* 2015). Furthermore, quiescence can be a strategy of *Colletotrichum* to avoid toxic levels of antifungal compounds present in unripe fruits (Adikaram *et al.* 2015). In this way, the fungus escapes the action of management strategies, and remains as an inoculum to infect at any time during harvest and postharvest.

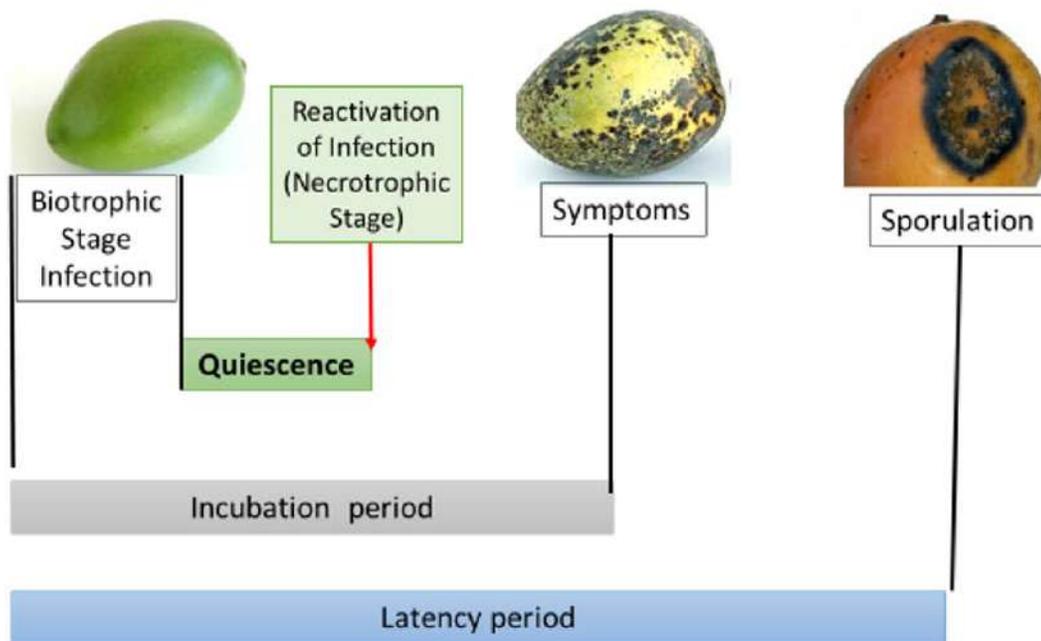


Figure 1. Scheme of an infective process by *Colletotrichum* sp. Quiescence after the biotrophic infective process has started; infection is reactivated and the fungus in its necrotrophic stage causes symptoms (incubation period) and subsequently produces a new inoculum (latency period).

The significant changes in metabolic synthesis and biochemical responses of the host fruit are regulated by differential genes expression that has been reported during the quiescent stage (Korn *et al.* 2015; Alkan *et al.* 2015; O'Connell *et al.* 2012). Genes that regulate infectious process of *Colletotrichum* are expressed differentially at each stage (Alkan *et al.* 2015; O'Connell *et al.* 2012; Latunde-Dada, 2001). The genes related to quiescence also differ according to the fungus species and infected host (Liu *et al.* 2022; Li *et al.* 2017; Korn *et al.* 2015; Alkan *et al.* 2015; Gan *et*

*al.* 2013; O'Connell *et al.* 2012). During appressoria development, a significant up-regulation of factors modulating the melanization of fungal cell wall is expressed and is concomitant with the accumulation of glycerol, factors that contribute to appressorial strength and the process of highly localized turgor pressure (Alkan *et al.* 2015). Also, cyclic adenosine monophosphate (*AMP*) and the mitogenic activation protein kinase (*MAPK*) signaling and other pathways, known to play a role in inducing appressoria formation and melanin biosynthesis in *Colletotrichum*, are up-regulated

(Shnaiderman *et al.* 2013). During quiescence of *C. gloeosporioides*, 178 genes could be defined as quiescent-specific, and are related with cell cycle components that regulated the DNA synthesis, genes encoding for a *G1/S-specific* cyclin, histone modifiers, and ATP-dependent chromatin remodeling complexes regulating DNA accessibility needed for gene activation/repression (Alkan *et al.* 2015). The production of ammonia during *Colletotrichum* colonization and alkalization of the environment has been previously reported as factors that break quiescence (Shnaiderman *et al.* 2013; Alkan *et al.* 2013a; Miyara *et al.* 2010).

In simultaneous analysis of tomato – *C. gloeosporioides* interaction, fruit transcripts were highly up-regulated during the quiescent stage. Defense pathways were further up regulated, including the phenylpropanoid pathway for phytoalexin and lignin. Pathways for the synthesis of phenylpropanoid derivatives as potential substrates for peroxidase activity, was also increased in the expression. These results have shown that phytoalexin biosynthesis and lignification comprise a major ongoing defense pathway used by the fruit in response to the quiescent fungi (Alkan *et al.* 2015). Transcript expression changes from rishitin to the  $\alpha$ -tomatine biosynthetic pathway, suggesting an effective response to *C. gloeosporioides*, creating a hostile environment that would signal the fungus to enter an extended quiescent stage (Alkan *et al.* 2015).

In *C. fructicola* – pear leaves interaction, the key regulators of plant Salicylic Acid-mediated defense response, were mainly upregulated at QS (Fu *et al.* 2022).

These findings indicate that quiescence is not a simple resting stage of the pathogen, also host gene response may contribute to activate some pathways before the necrotrophic colonization is initiated.

**Effect of host physiological changes on *Colletotrichum* quiescence.** Hormone ethylene is a factor that modulates appressoria formation in the host; during quiescence pathogen stimulate fruit ethylene production and defensive responses, so will also enhance the ripening process and accelerate the release from quiescence (Prusky & Sionov, 2021). Exposure of the spores of *C. gloeosporioides* and *C. musae* to ethylene, at  $\leq 1$  microl/liter, caused germination, branching of the germ tube, and formation of multiple appressoria from a single spore; propylene can induce spore germination and the formation of multiple appressoria, as well; ethylene induced germination and appressorium formation in the *Colletotrichum* sp. climacteric fruit but not in non-climacteric ones as citrus (Flaishman & Kolattukudy, 1994). While these results strongly suggest that this fruit fungal interaction have coevolved to develop a mechanism to use the host's ripening hormone as a signal to differentiate structure of infection; the fact is that processes do not occur concurrently and all appressoria formation for quiescence occurs in the orchard, away from the climacteric process where major ethylene quantities are produced (Prusky *et al.* 1996).

The breaking of quiescent stages includes a series of reactions that synchronize a decrease in the host's defense with the acceleration of the infective process by the fungus. This includes cuticle

degradation, cell wall degradation, fruit softening, increase in total soluble solids, changes in pH, decrease in preformed antifungal and inducible compounds, increase in reactive oxygen species (ROS) and hormones changes (Prusky & Sionov, 2021; Prusky *et al.* 2013). All these physiological changes associated with the fruit ripening create specific signals of fungal recognition for the initiation of the necrotrophic stage. Postharvest pathogens produce and secretes proteins and enzymes, which modify host cell walls, to overcome the physical constraints imposed by the wall and to release sugars to sustain its own energy needs. These processes might facilitate the intercellular expansion of hyphae and, thus, enhance the pathogen's ability to access cellular resources. On the other hand, use of the wall's sugar constituents for energy might require the complete breakdown of a variety of polysaccharides into monosaccharides (Prusky *et al.* 2016b). The degradation of the plant cell wall matrix by pathogens may affect the proteins embedded in the cell wall and are likely to activate PAMP-triggered immunity (Mengiste, 2012), which often leads to callose deposition at sites of penetration, accumulate phenolic compounds and various toxins in the cell wall and synthesize lignin-like polymers to reinforce the wall (Hückelhoven, 2007). Because fruit cell wall degrading enzymes (CWDEs) are normally activated during ripening, it was commonly assumed that fruit softening contributes to the transition to susceptibility to pathogens (Paniagua *et al.* 2014; Blanco-Ulate *et al.* 2013). However, in some cases fungal colonization occurs also in unripe fruits (Wang *et al.* 2007), suggesting the complexity of the changes modulating quiescence. Also, plants *PG* inhibiting proteins (*PGIPs*) may reduce the pathogen pectin degradation (De Lorenzo *et al.* 2001). For this reasons inhibition of cell wall softening usually delay fruit susceptibility.

The alkalization of the environment tissue round the quiescent infection by ammonia may contribute to breaking quiescence by activation of fungal transcription factors that modulate the synthesis of pectolytic enzymes. These pH changes are modulated by nutritional availability in unripe or ripening fruits (Prusky & Ziv, 2019; Ment *et al.* 2015; Prusky *et al.* 2016a).

**Chemical Compounds regulates quiescence in *Colletotrichum*-host interaction.** Quiescence in *Colletotrichum* could be regulated by the production of antimicrobial compounds, production of phytoalexins, new enzymes and even the formation of physical resistance structures (Sanzani *et al.* 2012). Chemical compounds from immature organs of bananas (De Lapeyre de Bellaire *et al.* 2000), avocados (Ahimera *et al.* 2003) and mangoes (Kienzle *et al.* 2014) determine the maintenance of quiescence of some *Colletotrichum* species. Relationship between quiescence and high levels of antifungal compounds in the peel of immature fruits of some fruit trees such as mango and avocado has been described (Beno-Moualem & Prusky, 2000; Droby *et al.* 1986; Cojocarú *et al.* 1986).

The accumulation and reduction of antifungal compounds, mainly derived from natural lipids such as 1-acetoxy-dihydroxy-n-heptadecane-16-ene and others with single or triple double bonds, are responsible for the occurrence of quiescence or breakdown of it

(Prusky & Ziv, 2019; Prusky *et al.* 2013); Recently, it has been shown that in the skin of Hass avocado fruits during ripening and storage, the persin and epicatechin contents decrease significantly (Bowen *et al.* 2018), which is related to the loss of quiescence of pathogens at maturity. These compounds have been specifically identified in immature avocado fruits, and inhibited germ tube elongation of *Colletotrichum* sp. conidia (Guetsky *et al.* 2005). The synthesis of resorcinols, gallotannins and chitinases in immature fruits is related to the quiescence of the pathogen; mango unripen fruits have shown a low susceptibility to *Colletotrichum* (Parthasarathy *et al.* 2015; Karunanayake *et al.* 2011; Paramasivan *et al.* 2009). In addition, the presence of potential sources of secondary metabolites such as n-hexane in the peel of immature fruits and latex of mango helps maintain the fungal quiescence (Sinniah *et al.* 2012).

Reactive oxygen species (ROS) synthesized by the host play a fundamental role in limiting the development of pathogens and maintaining their quiescence, because they modulate host's resistance; generally, their increment is associated with hydrogen peroxide increase or addition in the epidermis of immature fruits, where the levels of phenylalanine ammonia lyase (PAL) and epicatechin are also higher (Prusky *et al.* 2013). Accumulation of ROS are the result of the balance between ROS production and antioxidant activity. In grape and tomato, ROS, lipid peroxidation, and protein oxidation were increased at breaker stage conditions where the fungus was still in a quiescent stage; in many fruits, storage is associated with an increase in ROS, which results either from increased ROS production or from a decrease in antioxidative activity (Hodges, 2003). Antioxidants may inhibit fruit ripening and senescence (Lester, 2003), while high O<sub>2</sub> or application of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> leads to increase ROS and senescence (Tian *et al.* 2013). However post-harvest pathogens may modulate host ROS production by the secretion of elicitors, toxins, and antioxidants to modify the plant ROS production (Aver'Yanov *et al.* 2012; Alkan *et al.* 2013a; Alkan *et al.* 2013b).

**Pathogen development and break of quiescence.** The breaking of the quiescence is synchronically regulated by fungal effector proteins that manipulate their hosts for effective colonization. The pathogen must maintain host viability during initial biotrophic and quiescent interaction, but after needs to elicit host death for subsequent necrotrophic development. This elicitation process occurs in ripening fruits concurrently or as result of host ripening. Most fungal effector genes are host-induced and expressed in consecutive waves associated with pathogenic transitions, indicating distinct effector suites are deployed at each stage. Kleemann *et al.* (2012) demonstrated that antagonistic effectors either induce or suppress plant cell death. Based on these results obtained in an interaction with a non-host plant such as *Arabidopsis thaliana*, it can be concluded that the quiescence of a hemibiotrophic species of *Colletotrichum* is guided through a coordinated expression of antagonistic effectors that support cell viability or death that is probably modulated by metabolic changes in the host.

Internal metabolic factors of the pathogen that modulate appressorial formation and colonization, also induce breakdown

of quiescence. Ammonium secreted and or its accumulation by *C. gloeosporioides* during spore germination and host colonization contribute to pathogenicity (Prusky & Sionov, 2021; Prusky & Ziv, 2019; Ment *et al.* 2015; Prusky *et al.* 2016a; Prusky *et al.* 2016b; Miyara *et al.* 2010). *AMET* and *MEPB* genes modulate the secretion and accumulation of ammonia by the pathogen; in an investigation, the disruption of these genes resulted in 45 % less colonization of *C. gloeosporioides* in avocado fruits (Shnaiderman *et al.* 2013). The factors that active this nitrogen metabolism are still unknown, but it has been reported that nitrogen-metabolism genes *GDH2*, *GS1*, *GLT*, and *MEP* are differentially expressed during colonization by *C. gloeosporioides* in avocado (Miyara *et al.* 2010).

Another factor reported as an inducer of appressoria formation was the surface wax of the host; avocado (*Persea americana*) fruit wax induced germination and appressorium formation from the spores of *C. gloeosporioides* (Flaishman *et al.* 1995; Podila *et al.* 1993). On the other hand, the infective process of *Colletotrichum* species includes the degradation of the cuticle and cuticular waxes through cutinases, favoring the establishment of the pathogen and its penetration into the host's tissues (Villafana & Rampersad, 2020; Alkan *et al.* 2015).

#### **Quiescence and endophytic behavior of *Colletotrichum* species.**

Endophytic stage refers to a behavior or habitat type of a microbe, which does not generate apparent damage or symptom expression within its plant host despite being active in the tissues during part of its life cycle (Hyde & Soyong, 2008) and they are generally located in the intercellular spaces behaving as endosymbionts (Rodriguez *et al.* 2009). On the other hand, quiescence corresponds to a biotrophic stage of halted infection in which induction of symptoms does not occur, waiting for the right time of host response (Prusky *et al.* 2013). *Colletotrichum* as endophytic or quiescent pathogen is related to asymptomatic tissues, but subsequently may change to necrotrophic pathogen due to signals in the host, with the consequent expression of symptoms in them (Ranathunge & Sandani, 2016; Delaye *et al.* 2013; Kogel *et al.* 2006). It has been suggested that quiescence may be a form of endophytic behavior or survival strategy on non-host species.

Pathogenicity of the species *C. asianum*, *C. cliviae*, *C. dianesei* (synonym *C. melanocaulon*), *C. fructicola*, *C. karstii*, *C. tropicale* and *C. endomangiferae* corresponding to endophytic isolates from asymptomatic mango tissues, was confirmed on leaves and fruits of this same plant species (Vieira *et al.* 2014), indicating that endophytic stage may be a quiescence-like strategy. In others research, it has been shown that several strains of *Colletotrichum* spp. obtained as endophytes in several plant species have resulted pathogenic by artificial inoculations, such as *Phaseolus vulgaris* (Gonzaga *et al.* 2015) and tropical grasses (Manamgoda *et al.* 2013).

These reports raise the discussion if the quiescent stage could be part of endophytic style of some *Colletotrichum* species, since they do not generate visible infections during phenological stages where the tissues are immature. Recent studies indicate that *C. tropicale* isolated from symptomless leaves and stems of mango cultivar

Azúcar was pathogenic on ripen fruits (Quintero-Mercado *et al.* 2019). The study of endophytic species and the relationship of quiescence with this lifestyle of pathogenic species of *Colletotrichum* are part of the new focus of research, which will improve efficiency in the management of “Anthracnose”.

#### **Management of *Colletotrichum* spp. as quiescent fungi.**

Quiescent structures constitute a hidden source of inoculum that remains invisible mainly in flowers and fruits (Ploetz, 2007). In recent research, it was found that quiescent structures of *Colletotrichum* sp., were present in asymptomatic tissues of leaves and stems of mango cv. Azúcar (Quintero-Mercado *et al.* 2019). This way, the fungus can escape the action of chemical molecules and even the effect of cultural practices. When conditions are favorable for infection, the fungus leaves the quiescent stage and start necrotrophic phase in plant tissues; thus, that any management measure is unsuccessful (Páez Redondo, 2003).

Traditionally, the technological options implemented for the management of fruit Anthracnose consist in reducing the active inoculum in the field, avoiding conditions for re-infections through sanitation, pruning, the use of drainages in the soil, and application of fungicides (Páez Redondo, 2003). Conventional postharvest management based on hot water, fungicides, and lately chitosan, affect the inoculum from the field located on the surface of the fruits (Kumari & Singh, 2017; Chowdappa *et al.* 2014; Prusky *et al.* 2013); however, the quiescent or endophyte inoculum is not significantly affected. Therefore, this article highlights strategies focused on affecting quiescent structures of the fungus, and that can be applied in field and postharvest.

The use of a wrapper impregnated with a mixture of chitosan-vanillin and zeolite is proposed as packaging for fruits, which allows the excess of ethylene to be absorbed. Although the results in mango Nam Dok Mai were positive, its use must be validated commercially (Jaimun & Sangsuwang, 2019).

The combination of chitin, microbial suspensions and thermal treatments could reduce the expression of Anthracnose in postharvest; in mango cv. Azúcar, heat treatment, microbial activity and storage at 13 °C of the fruits, allowed a reduction of quiescent infections between 83 and 89 % (Zapata-Narváez *et al.* 2021).

The use of preformed antifungal compounds is an option that should be considered for postharvest management of Anthracnose; these compounds are naturally synthesized in early phenological stages of the fruit (Adikaram *et al.* 2017). In mango, higher levels of gallotannins, resorcinols and chitinases have been found in resistant genotypes; gallotannins activity decreased with fruit ripening but this decreased is 10 % less in resistant cultivars (Paramasivan *et al.* 2009). Recent research focuses on evaluating the effect of volatile compounds produced by microorganisms and plants (Cheng *et al.* 2022; Huang *et al.* 2021; Shi *et al.* 2021), which need to be evaluated under field and postharvest conditions.

Treatments of mango fruits with microorganisms is an option that is being evaluated in postharvest, specially bacteria that could prevent the activation of quiescent stage. *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Brevundimonas diminuta*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Candida membranifaciens* and yeasts induce the synthesis of lytic enzymes, chitinase and glucanase, which has resulted in a longer quiescence period and reduction of Anthracnose severity during storage (Vivekananthan *et al.* 2004). However, the use of biological control is still uncertain. On the other hand, the search for metabolites that affect the synthesis of compounds by the pathogen or that degrade cellular components of the fungus must be deepened.

*The induction of resistance can be considered in the control of infections from quiescent stages.* Banana fruits harvested from plants treated with salicylic acid (SA) and acibenzolar-S-methyl, showed reduced Anthracnose severity and delayed onset of disease symptom expression (Wanigasekara *et al.* 2014). Another compound that has been used in post-harvest treatments is Butyl Hydroxyanisole (BHA), which was evaluated in mango fruits through vacuum infiltration 72 hours prior to *C. gloeosporioides* inoculation; a significant reduction in the incidence and size of the lesion was observed, which was correlated with an improvement in the contents of peroxidases, polyphenoloxidases, chitinases, phenyl-amin-liases, glucanases, hydrogen peroxide and phenolic compounds in fruits (Zhu *et al.* 2008).

*Colletotrichum* as well as *Alternaria alternata*, secrete ammonium and alkalize the medium for the infective process. The immersion of mango fruits in hydrochloric acid (50 mM) alone delays the activation of quiescent *Alternaria* infections (Prusky *et al.* 2006). Acidification of the cell matrix is an option to consider in the short term for the treatment of infections from the quiescence of the fungus, however the use of fungicides in acidic solutions requires further investigation.

In conclusion, publications to date are clear and deep on infectious processes focused on the necrotrophic phase of the fungus, with good support from genomic studies on the interaction with the host. But, many aspects of the biology of quiescence and its expression in different *Colletotrichum* species, especially in mangoes and other tropical fruit crops, are still unknown. It is necessary to deepen the study of the relationship between endophytism and quiescence. In pathogenic endophytic species, such as *C. gloeosporioides*, the occurrence of quiescence can be considered a form of transition from endophytism to the necrotrophic phase, or could quiescence be considered a form of endophytism?

Holistic management of Anthracnose requires that we focus on how to manage the pathogenesis of an endophytic and quiescent fungus.

**Conflict of interests:** The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all authors, who declare that no conflict of interest is present that might question the validity of the results presented in the article.

## REFERENCES

1. ADIKARAM, N.; KARUNANAYAKE, C.; SINNIHAH, G.; VITHANAGE, I.K.; YAKANDAWALA, D. 2015. Fungal quiescence in fruit: an attempt to avoid toxic substances? *Journal of Mycopathological Research*. 53:1-7.
2. ADIKARAM, N.K.B.; KARUNANAYAKE, L.C.; SINNIHAH, G.D.; ABAYASEKARA, C.L.; KOMALA VITHANAGE, S.; YAKANDAWALA, D.M.D. 2017. A review of the role for natural defenses in the management of *Colletotrichum* rotting of ripe mangoes. *Acta Horticulturae*. 1183:229-232. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1183.32>
3. AHIMERA, N.; DRIEVER, G.F.; MICHAILIDES, T.J. 2003. Relationships among propagule numbers of *Botryosphaeria dothidea*, latent infections, and severity of panicle and shoot blight in pistachio orchards. *Plant Disease*. 87(7):846-853. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.7.846>
4. ALKAN, N.; ESPESO, E.A.; PRUSKY, D. 2013a. Virulence regulation of phytopathogenic fungi by pH. *Antioxidants & Redox Signaling*. 19(9):1012-1025. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5062>
5. ALKAN, N.; FRIEDLANDER, G.; MENT, D.; PRUSKY, D.; FLUHR, R. 2015. Simultaneous transcriptome analysis of *Colletotrichum gloeosporioides* and tomato fruit pathosystem reveals novel fungal pathogenicity and fruit defense strategies. *New Phytologist*. 205(2):801-815. <https://doi.org/10.1111/nph.13087>
6. ALKAN, N.; MENG, X.; FRIEDLANDER, G.; REUVENI, E.; SUKNO, S.; SHERMAN, A.; THON, M.; FLUHR, R.; PRUSKY, D. 2013b. Global aspects of pacC regulation of pathogenicity genes in *Colletotrichum gloeosporioides* as revealed by transcriptome analysis. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 26(11):1345-1358. <https://doi.org/10.1094/MPMI-03-13-0080-R>
7. AMARAL, D.D.; MONTEIRO, A.L.R.; DA SILVA, E.I.; DE OLIVEIRA LINS, S.R.; ALVES DE OLIVEIRA, S.M. 2017. Frequency of quiescent fungi and post-harvest alternative management of stem end rot in papaya. *Revista Caatinga*. 30(3):786-793. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n327rc>
8. AVER'YANOV, A.A.; BELOZERSKAYA, T.A.; GESSLER, N.N. 2012. Fungus Development and Reactive Oxygen: Phytopathological Aspects. En: Witzany, G. (ed.). *Biocommunication of Fungi*. Springer (Berlin). p.261-271.
9. BENO-MOUALEM, D.; PRUSKY, D. 2000. Early events during quiescent infection development by *Colletotrichum gloeosporioides* in unripe avocado fruits. *Phytopathology*. 90(5):553-559. <http://dx.doi.org/10.1094/PHTO.2000.90.5.553>
10. BINYAMINI, N.; SCHIFFMANN-NADEL, M. 1972. The utilization in vitro of different avocado fruit constituents by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Mycologia*. 64(4):916-919.
11. BLANCO-ULATE, B.; VINCENTI, E.; POWELL, A.L.T.; CANTU, D. 2013. Tomato transcriptome and mutant analyses suggest a role for plant stress hormones in the interaction between fruit and *Botrytis cinerea*. *Frontiers in Plant Science*. 4:142. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00142>
12. BOWEN, J.; BILLING, D.; CONNOLLY, P.; SMITH, W.; COONEY, J.; BURDON, J. 2018. Maturity, storage and ripening effects on anti-fungal compounds in the skin of "Hass" avocado fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 146:43-50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.005>
13. CHENG, Y.-J.; WU, Y.-J.; LEE, F.-W.; OU, L.-Y.; CHEN, C.-N.; CHU, Y.-Y.; KUAN, Y.-C. 2022. Impact of storage condition on chemical composition and antifungal activity of pomelo extract against *Colletotrichum gloeosporioides* and anthracnose in Post-harvest mango. *Plants*. 11(15):2064. <https://doi.org/10.3390/plants11152064>
14. CHOWDAPPA, P.; GOWDA, S.; CHETHANA, C.S.; MADHURA, S. 2014. Antifungal activity of chitosan-silver nano-particle composite against *Colletotrichum gloeosporioides* associated with mango anthracnose. *African Journal of Microbiology Research*. 8(17):1803-1812. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6584>
15. COJOCARU, M.; DROBY, S.; GLOTTER, E.; GOLDMAN, A.; GOTTLIEB, H.E.; JACOBY, B.; PRUSKY, D. 1986. 5-(12-Heptadecenyl)-resorcinol, the major component of the antifungal activity in the peel of mango fruit. *Phytochemistry*. 25(5):1093-1095. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)81560-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)81560-5)
16. CZEMMEL, S.; GALARNEAU, E.R.; TRAVADON, R.; MCELDRONE, A.J.; CRAMER, G.R.; BAUMGARTNER, K. 2015. Genes expressed in grapevine leaves reveal latent wood infection by the fungal pathogen *Neofusicoccum parvum*. *PloS One*. 10:e0121828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121828>
17. DE LAPEYRE DE BELLAIRE, L.; CHILLET, M.; MOURICHON, X. 2000. Elaboration of an early quantification method of quiescent infections of *Colletotrichum musae* on bananas. *Plant Disease*. 84(2):128-133. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.2.128>
18. DELAYE, L.; GARCÍA-GUZMÁN, G.; HEIL, M. 2013. Endophytes versus biotrophic and necrotrophic pathogens-are fungal lifestyles evolutionarily stable traits? *Fungal Diversity*. 60:125-135. <https://doi.org/10.1007/s13225-013-0240-y>

19. DE LORENZO, G.; D'OVIDIO, R.; CERVONE, F. 2001. The role of polygalacturonase-inhibiting proteins (PGIPs) in defense against pathogenic fungi. Annual review of phytopathology. 39:313-335.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.39.1.313>
20. DISKIN, S.; FEYGENBERG, O.; MAURER, D.; DROBY, S.; PRUSKY, D.; ALKAN, N. 2017. Microbiome alterations are correlated with occurrence of postharvest Stem-end rot in mango fruit. Phytobiomes. 1(3):117-127.  
<https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-17-0022-R>
21. DROBY, S.; PRUSKY, D.; JACOBY, B.; GOLDMAN, A. 1986. Presence of antifungal compounds in the peel of mango fruits and their relation to latent infections of *Alternaria alternata*. Physiological and Molecular Plant Pathology. 29(2):173-183.  
[https://doi.org/10.1016/S0048-4059\(86\)80019-4](https://doi.org/10.1016/S0048-4059(86)80019-4)
22. FISCHER, I.H.; DE MORAES, M.F.; FIRMINO, A.C.; AMORIM, L. 2019. Detection and epidemiological progress of quiescent avocado diseases. Ciência Rural. 49(8):e20180731.  
<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180731>
23. FISCHER, I.H.; SOARES-COLLETTI, A.R.; PALHARINI, M.C.D.A.; PARISI, M.C.M.; AMORIM, L. 2017. Temporal progress and spatial patterns of quiescent diseases inguava influenced by sanitation practices. Scientia Agricola. 74(1):68-76.  
<http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0425>
24. FLAISHMAN, M.A.; HWANG, C.S.; KOLATTUKUDY, P.E. 1995. Involvement of protein phosphorylation in the induction of appressorium formation in *Colletotrichum gloeosporioides* by its host surface wax and ethylene. Physiological and Molecular Plant Pathology. 47(2):103-117.  
<https://doi.org/10.1006/pmpp.1995.1046>
25. FLAISHMAN, M.A.; KOLATTUKUDY, P.E. 1994. Timing of fungal invasion using host's ripening hormone as a signal. Proceedings of the National Academy of Sciences. 91:6579-6583.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.91.14.6579>
26. FREEMAN, S.; HOROWITZ, S.; SHARON, A. 2001. Pathogenic and nonpathogenic lifestyles in *Colletotrichum acutatum* from strawberry and other plants. Phytopathology. 91(10):986-992.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.10.986>
27. FU, M.; BAI, Q.; ZHANG, H.; GUO, Y.; PENG, Y.; ZHANG, P.; SHEN, L.; HONG, N.; XU, W.; WANG, G. 2022. Transcriptome analysis of the molecular patterns of pear plants infected by two *Colletotrichum fructicola* pathogenic strains causing contrasting sets of leaf symptoms. Frontiers in Plant Science. 13:761133.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.761133>
28. GAN, P.; IKEDA, K.; IRIEDA, H.; NARUSAKA, M.; O'CONNELL, R.J.; NARUSAKA, Y.; TAKANO, Y.; KUBO, Y.; SHIRASU, K. 2013. Comparative genomic and transcriptomic analyses reveal the hemibiotrophic stage shift of *Colletotrichum* fungi. New Phytologist. 197(4):1236-1249.  
<https://doi.org/10.1111/nph.12085>
29. GAÑÁN, L.; ÁLVAREZ, E.; CASTAÑO ZAPATA, J. 2015. Identificación genética de aislamientos de *Colletotrichum* spp. causantes de Antracnosis en frutos de aguacate, banano, mango y tomate de árbol. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas Física y Naturales. 39(152):339-347.  
<http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.192>
30. GONZAGA, L.L.; COSTA, L.E.O.; SANTOS, T.T.; ARAÚJO, E.F.; QUEIROZ, M.V. 2015. Endophytic fungi from the genus *Colletotrichum* are abundant in the *Phaseolus vulgaris* and have high genetic diversity. Journal of Applied Microbiology. 118(2):485-496.  
<https://doi.org/10.1111/jam.12696>
31. GUÉDEZ, C.; RODRÍGUEZ, D. 2021. Infecciones quiescentes por *Colletotrichum gloeosporioides* en las diferentes etapas de desarrollo del fruto de guayaba (*Psidium guajava* L.) en dos épocas de producción. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia. 38(4):751-770.  
[https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v38.n4.01](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n4.01)
32. GUETSKY, R.; KOBILER, I.; WANG, X.; PERLMAN, N.; GOLLOP, N.; AVILA-QUEZADA, G.; HADAR, I.; PRUSKY, D. 2005. Metabolism of the flavonoid epicatechin by laccase of *Colletotrichum gloeosporioides* and its effect on pathogenicity on avocado fruits. Phytopathology. 95(11):1341-1348.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1341>
33. HAILE, Z.M.; PILATI, S.; SONEGO, P.; MALACARNE, G.; VRHOSEK, U.; ENGELEN, K.; TUDZINSKY, P.; ZOTTINI, M.; BARALDI, E.; MOSER, C. 2017. Molecular analysis of the early interaction between the grapevine flower and *Botrytis cinerea* reveals that prompt activation of specific host pathways leads to fungus quiescence. Plant, Cell & Environment. 40(8):1409-1428.  
<https://doi.org/10.1111/pce.12937>
34. HODGES, D.M. 2003. Chapter 1. Overview: Oxidative stress and postharvest produce. En: Postharvest oxidative stress in horticultural crops. CRC Press (New York). p.1-12.
35. HONGER, J.O.; OFFEI, S.K.; ODURO, K.A.; ODAMTTEN, G.T.; NYAKU, S.T. 2014. Identification and species status of the mango biotype of *Colletotrichum gloeosporioides* in Ghana. European Journal of Plant Pathology.

- 140:455-467.  
<https://doi.org/10.1007/s10658-014-0480-z>
36. HUANG, X.; LIU, T.; ZHOU, C.; HUANG, Y.; LIU, X.; YUAN, H. 2021. Antifungal activity of essential oils from three *Artemisia* species against *Colletotrichum gloeosporioides* of mango. *Antibiotics*. 10(11):1331.  
<https://doi.org/10.3390/antibiotics10111331>
37. HÜCKELHOVEN, R. 2007. Cell wall-associated mechanisms of disease resistance and susceptibility. *Annual Review of Phytopathology*. 45:101-127.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.45.062806.094325>
38. HYDE, K.D.; SOYTONG, K. 2008. The fungal endophyte dilemma. *Fungal Diversity*. 33:163-173.
39. ISMAIL, A.M.; CIRVILLERI, G.; YASEEN, T.; EPIFANI, F.; PERRONE, G.; POLIZZI, G. 2015. Characterization of *Colletotrichum* species causing Anthracnose disease of mango in Italy. *Journal of Plant Pathology*. 97(1):167-171.  
<http://dx.doi.org/10.4454/JPP.V97I1.011>
40. JAIMUN, R.; SANGSUWAN, J. 2019. Efficacy of chitosan-coated paper incorporated with vanillin and ethylene adsorbents on the control of anthracnose and the quality of Nam Dok Mai mango fruit. *Packaging Technology and Science*. 32(8):383-394.  
<https://doi.org/10.1002/pts.2446>
41. JAYAWARDENA, R.S.; BHUNJUN, C.S.; HYDE, K.D.; GENTEKAKI, E.; ITTHAYAKORN, P. 2021. *Colletotrichum*: lifestyles, biology, morpho-species, species complexes and accepted species. *Mycosphere*. 12(1):519-669.  
<https://doi.org/10.5943/mycosphere/12/1/7>
42. JOHNSON, G.I.; MEAD, A.J.; COOKE, A.W.; DEAN, J.R. 1992. Mango stem end rot pathogens-Fruit infection by endophytic colonization of the inflo-rescence and pedicel. *Annals of Applied Biology*. 120(2):225-234.  
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1992.tb03420.x>
43. JOY, P.P.; SHERIN, C.G. 2016. Diseases of passion fruit (*Passiflora edulis*) and their management. In: Pandey, A.K.; Mall, P. (eds.). *Insect pests management of fruit crops*. Biotech. p.453-470.
44. KARUNANAYAKE, L.C.; ADIKARAM, N.; KUMARIHAMY, B.M.; BANDARA, B.M.; ABAYASEKARA, C. 2011. Role of antifungal gallotannins, resorcinols and chitinases in the constitutive defence of immature mango (*Mangifera indica* L.) against *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of Phytopathology*. 159(10):657-664.  
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2011.01818.x>
45. KIENZLE, S.; CARLE, R.; SRUAMSIRI, P.; TOSTA, C.; NEIDHART, S. 2014. Occurrence of Alk(en)ylresorcinols in the fruits of two mango (*Mangifera indica* L.) cultivars during on-tree maturation and postharvest storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62(1):28-40.  
<https://dx.doi.org/10.1021/jf4028552>
46. KLEEMANN, J.; RINCON-RIVERA, L.J.; TAKAHARA, H.; NEUMANN, U.; VAN THEMAAT, E.V.L.; VAN DER DOES, H.C.; HACQUARD, S.; STÜBER, K.; WILL, I.; SCHMALENBACH, W.; SCHMELZER, E.; O'CONNELL, R.J. 2012. Sequential delivery of host-induced virulence effectors by appressoria and intracellular hyphae of the phytopathogen *Colletotrichum bigginsianum*. *PLoS Pathogens*. 8:e1002643.  
<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002643>
47. KOGEL, K.H.; FRANKEN, P.; HÜCKELHOVEN, R. 2006. Endophyte or parasite—what decides? *Current Opinion in Plant Biology*. 9(4):358-363.  
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.05.001>
48. KORN, M.; SCHMIDPETER, J.; DAHL, M.; MÜLLER, S.; VOLL, L.M.; KOCH, C. 2015. A genetic screen for pathogenicity genes in the hemibiotrophic fungus *Colletotrichum bigginsianum* identifies the plasma membrane proton pump Pma2 required for host penetration. *PLoS One*. 10:e0125960.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125960>
49. KUMARI, R.; SINGH, R. 2017. Anthracnose of mango incited by *Colletotrichum gloeosporioides*: A comprehensive review. *International Journal Pure & Applied Bioscience*. 5(1):48-56.  
<http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.2478>
50. LATTANZIO, V.; DI VENERE, D.; LINSALATA, V.; BERTOLINI, P.; IPPOLITO, A.; SALERNO, M. 2001. Low temperature metabolism of apple phenolics and quiescence of *Phlyctaena vagabunda*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49(12):5817-5821.  
<https://doi.org/10.1021/jf010255b>
51. LATUNDE-DADA, A.O. 2001. *Colletotrichum*: tales of forcible entry, stealth, transient confinement and breakout. *Molecular Plant Pathology*. 2(4):187-198.  
<https://doi.org/10.1046/j.1464-6722.2001.00069.x>
52. LESTER, G. 2003. *Oxidative stress affecting fruit senescence. Postharvest oxidative stress in horticultural crops*. CRC Press (New York). p.113-129.
53. LI, X.; WU, Y.; LIU, Z.; ZHANG, C. 2017. The function and transcriptome analysis of a bZIP transcription factor CgAP1 in *Colletotrichum gloeosporioides*. *Microbiological Research*. 197:39-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.01.006>

54. LIU, F.; CAI, L.; CROUS, P.W.; DAMM, U. 2014. The *Colletotrichum gigasporum* species complex. *Persoonia-Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*. 33:83-97. <http://dx.doi.org/10.3767/003158514X684447>
55. LIU, F.; MA, Z.Y.; HOU, L.W.; DIAO, Y.Z.; WU, W.P.; DAMM, U.; SONG, S.; CAI, L. 2022. Updating species diversity of *Colletotrichum*, with a phylogenomic overview. *Studies in Mycology*. 101(1):1-56. <https://doi.org/10.3114/sim.2022.101.01>
56. MANAMGODA, D.S.; UDAYANGA, D.; CAI, L.; CHUKEATIROTE, E.; HYDE, K.D. 2013. Endophytic *Colletotrichum* from tropical grasses with a new species *C. endophytica*. *Fungal Diversity*. 61:107-115. <https://doi.org/10.1007/s13225-013-0256-3>
57. MENGISTE, T. 2012. Plant immunity to necrotrophs. *Annual review of phytopathology*. 50:267-294. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-172955>
58. MENT, D.; ALKAN, N.; LURIA, N.; BI, F.-C.; REUVENI, E.; FLUHR, R.; PRUSKY, D. 2015. A role of AREB in the regulation of PACC-dependent acid-expressed-genes and pathogenicity of *Colletotrichum gloeosporioides*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 28(2):154-166. <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-14-0252-R>
59. MIYARA, I.; SHAFRAN, H.; DAVIDZON, M.; SHERMAN, A.; PRUSKY, D. 2010. pH regulation of ammonia secretion by *Colletotrichum gloeosporioides* and its effect on appressorium formation and pathogenicity. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 23(3):304-316. <https://doi.org/10.1094/MPMI-23-3-0304>
60. O'CONNELL, R.J.; THON, M.R.; HACQUARD, S.; AMYOTTE, S.G.; KLEEMANN, J.; TORRES, M.F.; DAMM, U.; BUIATES, E.A.; EPSTEINS, L.; ALKAN, N.; ALTMÜLLER, J.; ALVARADO-BALDERRAMA, L.; BAUSER, C.A.; BECKER, C.; BIRREN, B.W.; CHEN, Z.; CHOI, J.; CROUCH, J.A.; DUVICK, J.P.; FARMAN, M.A.; GAN, P.; HEIMAN, D.; HENRISSAT, B.; HOWARD, R.J.; KABBAGE, M.; KOCH, C.; KRACHER, B.; KUBO, Y.; LAW, A.D.; LEBRUN, M.-H.; LEE, Y.-H.; MIYARA, I.; MOORE, N.; NEUMANN, U.; NORDSTRÖM, K.; PANACCIONE, D.G.; PANSTRUGA, R.H.; PLACE, M.; PROCTOR, R.H.; PRUSKY, D.; RECH, G.; REINHARDT, R.; ROLLINS, J.A.; ROUNSLEY, S.; SCHARDL, C.L.; SCHWARTZ, D.C.; SHENOY, N.; SHIRASU, K.; SIKHAKOLLI, U.R.; STÜBER, K.; SUKNO, S.A.; SWEIGARD, J.A.; TAKANO, Y.; TAKAHA-RA, H.; TRAIL, F.; VAN DER DOES, H.C.; VOLL, L.M.; WILL, I.; YOUNG, S.; ZENG, Q.; ZHANG, J.; ZHOU, S.; DICKMAN, M.B.; SCHULZE-LEFERT, P.; VAN THEMAAT, E.V.L.; MA, L.-J.; VAILLANCOURT, L.J. 2012. Lifestyle transitions in plant pathogenic *Colletotrichum* fungi deciphered by genome and transcriptome analyses. *Nature Genetics*. 44:1060-1065. <https://doi.org/10.1038/ng.2372>
61. PÁEZ REDONDO, A.R. 2003. Tecnologías sostenibles para el manejo de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc.) en papaya (*Carica papaya* L.) y mango (*Mangifera indica* L.). Corporación colombiana de investigación agropecuaria-AGROSAVIA (Bogotá, Colombia). 18p.
62. PANIAGUA, C.; POSÉ, S.; MORRIS, V.J.; KIRBY, A.R.; QUESADA, M.A.; MERCADO, J.A. 2014. Fruit softening and pectin disassembly: an overview of nanostructural pectin modifications assessed by atomic force microscopy. *Annals of botany*. 114(6):1375-1383. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu149>
63. PARAMASIVAN, M.; MOHAN, S.; SYED ALI, G.; MATHIYAZHAGAN, S.; MUTHUKRISHNAN, N. 2009. Detection of latent infections in mango fruit with herbi-cides. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 42(4):318-326. <https://doi.org/10.1080/03235400601069696>
64. PARTHASARATHY, S.; MOHAMMAD FAISAL, P.; PRABAKAR, K.; THIRIBHUVANAMALA, G.; RAJALAKSHMI, J. 2015. Profiling of antifungal compounds from n-hexane extracts of mango fruits against major post-harvest pathogens. *Annals of Plant and Soil Research*. 17:311-316.
65. PERES, N.A.; TIMMER, L.W.; ADASKAVEG, J.E.; COR-RELL, J.C. 2005. Lifestyles of *Colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*. 89(8):784-796. <https://dx.doi.org/10.1094/PD-89-0784>
66. PHOTITA, W.; TAYLOR, P.W.J.; FORD, R.; HYDE, K.D.; LUMYONG, S. 2005. Morphological and molecular characterization of *Colletotrichum* species from herbaceous plants in Thailand. *Fungal Diversity*. 18:117-133.
67. PLOETZ, R.C. 2007. Diseases of tropical perennial crops: challenging problems in diverse environments. *Plant Disease*. 91(6):644-663. <https://doi.org/10.1094/PDIS-91-6-0644>
68. PODILA, G.K.; ROGERS, L.M.; KOLATTUKUDY, P.E. 1993. Chemical signals from avocado surface wax trigger germination and appressorium formation in *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Physiology*. 103(1):267-272. <https://doi.org/10.1104/pp.103.1.267>
69. PRUSKY, D.; ALKAN, N.; MENGISTE, T.; FLUHR, R. 2013. Quiescent and necrotrophic lifestyle choice during postharvest disease development. *Annual Review of Phytopathology*. 51:155-176. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102349>

70. PRUSKY, D.B.; BI, F.; MORAL, J.; BARAD, S. 2016a. How does host carbon concentration modulate the lifestyle of postharvest pathogens during colonization? *Frontiers in Plant Science*. 7:1306.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01306>
71. PRUSKY, D.; KOBILER, I.; AKERMAN, M.; MIYARA, I. 2006. Effect of acidic solutions and acidic prochloraz on the control of postharvest decay caused by *Alternaria alternata* in mango and persimmon fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 42(2):134-141.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.06.001>
72. PRUSKY, D.; WATTAD, C.; KOBILER, I. 1996. Effect of ethylene on activation of lesion development from quiescent infections of *Colletotrichum gloeosporioides* in avocado fruits. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 9(9):864-868.
73. PRUSKY, D.; ZIV, C. 2019. Mechanisms of fungal quiescence during development and ripening of fruits. In: Palou, L.; Smilanick, J.L. (eds.). *Postharvest pathology of fresh horticultural produce*. CRC Press. p.407-436.
74. PRUSKY, D.; BARAD, S.; MENT, D.; BI, F. 2016b. The pH modulation by fungal secreted molecules: a mechanism affecting pathogenicity by postharvest pathogens. *Israel Journal of Plant Sciences*. 63:22-30.  
<https://doi.org/10.1080/07929978.2016.1151290>
75. PRUSKY, D.B.; SIONOV, E. 2021. Special Issue "Interplay between Fungal Pathogens and Harvested Crops and Fruits". *Microorganisms*. 9(3):553.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9030553>
76. QUINTERO-MERCADO, A.; DANGON-BERNIER, F.; PÁEZ-REDONDO, A. 2019. Endophytic isolation of *Colletotrichum* spp. from the leaves and branches of mango (*Mangifera indica* L.) cultivar Azúcar in the municipality of Ciénaga, Magdalena, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 43(166):65-77.  
<https://doi.org/10.18257/raccefy.788>
77. RAJARAMMOHAN, S. 2021. Redefining plant-necrotroph interactions: the thin line between hemibiotrophs and necrotrophs. *Frontiers in Microbiology*. 12:673518.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673518>
78. RANATHUNGE, N.P.; SANDANI, H.B.P. 2016. Deceptive behaviour of *Colletotrichum truncatum*: strategic survival as an asymptomatic endophyte on non-host species. *Journal of Plant Protection Research*. 56(2):157-162.  
<https://doi.org/10.1515/jppr-2016-0026>
79. RODRIGUEZ, R.J.; WHITE JR, J.F.; ARNOLD, A.E.; REDMAN, R.S. 2009. Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New phytologist*. 182(2):314-330.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
80. SANZANI, S.M.; REVERBERI, M.; PUNELLI, M.; IPPOLITO, A.; FANELLI, C. 2012. Study on the role of patulin on pathogenicity and virulence of *Penicillium expansum*. *International Journal of Food Microbiology*. 153(3):323-331.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.11.021>
81. SHARMA, M.; KULSHRESTHA, S. 2015. *Colletotrichum gloeosporioides*: an anthracnose causing pathogen of fruits and vegetables. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 12(2):1233-1246.  
<http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1776>
82. SHI, X.-C.; WANG, S.-Y.; DUAN, X.-C.; WANG, Y.-Z.; LIU, F.-Q.; LABORDA, P. 2021. Biocontrol strategies for the management of *Colletotrichum* species in postharvest fruits. *Crop Protection*. 141:105454.  
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105454>
83. SHNAIDERMAN, C.; MIYARA, I.; KOBILER, I.; SHERMAN, A.; PRUSKY, D. 2013. Differential activation of ammonium transporters during the accumulation of ammonia by *Colletotrichum gloeosporioides* and its effect on appressoria formation and pathogenicity. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 26(3):345-355.  
<https://doi.org/10.1094/MPMI-07-12-0170-R>
84. SIDDIQUI, Y.; ALLI, A. 2014. Chapter 11-*Colletotrichum gloeosporioides* (Anthracnose). In: Bautista-Baños, S. (ed.). *Postharvest Decay. Control Strategies*. Academic Press. p.337-371.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00011-9>
85. SINNIAH, G.D.; ADIKARAM, N.K.B.; ABAYASEKARA, C. L. 2012. Differential defense responses expressed in mango (*Mangifera indica* L.) cultivars resistant and susceptible to *Colletotrichum gloeosporioides*. *Indian Phytopathology*. 65(4):2-6.
86. TALHINHAS, P.; BARONCELLI, R. 2021. *Colletotrichum* species and complexes: geographic distribution, host range and conservation status. *Fungal Diversity*. 110:109-198.  
<https://doi.org/10.1007/s13225-021-00491-9>
87. TIAN, S.; QIN, G.; LI, B. 2013. Reactive oxygen species involved in regulating fruit senescence and fungal pathogenicity. *Plant Molecular Biology*. 82:593-602.  
<https://doi.org/10.1007/s11103-013-0035-2>
88. VIEIRA, W.A.S.; MICHHEREFF, S.J.; DE MORAIS JR, M.A.; HYDE, K.D.; CÂMARA, M.P.S. 2014. Endophytic species of *Colletotrichum* associated with mango in northeastern Brazil. *Fungal Diversity*. 67:181-202.  
<https://doi.org/10.1007/s13225-014-0293-6>

89. VILLAFANA, R.T.; RAMPERSAD, S.N. 2020. Diversity, structure, and synteny of the cutinase gene of *Colletotrichum* species. *Ecology and evolution*. 10(3):1425-1443. <https://doi.org/10.1002/ece3.5998>
90. VIVEKANANTHAN, R.; RAVI, M.; RAMANATHAN, A.; SAMIYAPPAN, R. 2004. Lytic enzymes induced by *Pseudomonas fluorescens* and other biocontrol organisms mediate defense against the anthracnose pathogen in mango. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 20:235-244. <https://doi.org/10.1023/B:WIBI.0000023826.30426.f5>
91. WANG, A.; TAN, D.; TAKAHASHI, A.; ZHONG LI, T.; HARADA, T. 2007. MdERFs, two ethylene-response factors involved in apple fruit ripening. *Journal of Experimental Botany*. 58(13):3743-3748. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm224>
92. WANIGASEKARA, U.W.N.P.; ADIKARAM, N.K.B.; ABAYASEKARA, C.L. 2014. Pre-harvest chemical elicitor treatment enhances induced resistance in harvested banana fruit cv. 'Embul' and reduces Anthracnose caused by *Colletotrichum musae*. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*. 42(2):101-110. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v42i2.6994>
93. ZAKARIA, L. 2021. Diversity of *Colletotrichum* species associated with anthracnose disease in tropical fruit crops- A review. *Agriculture*. 11(4):297
94. ZAPATA-NARVÁEZ, Y.A.; IZQUIERDO-GARCÍA, L.F.; BOTINA-AZAÍN, B.L.; BELTRÁN-ACOSTA, C.R. 2021. Efficacy of microbial antagonists and chitin in the control of *Colletotrichum gloeosporioides* in postharvest of mango cv. Azúcar. *Revista mexicana de fitopatología*. 39(2):248-265. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2102-1>
95. ZHU, X.; CAO, J.; WANG, Q.; JIANG, W. 2008. Postharvest infiltration of BTH reduces infection of mango fruits (*Mangifera indica* L. cv. Tainong) by *Colletotrichum gloeosporioides* and enhances resistance inducing compounds. *Journal of Phytopathology*. 156(2):68-74. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01320.x>



# Influence of microbial consortia on the incidence of grey mold (*Botrytis cinerea*) in strawberry (Monterey variety)

## Influencia de consorcios microbianos en la incidencia del moho gris (*Botrytis cinerea*) en fresa (variedad Monterey)

Mario Alejandro Cano<sup>1\*</sup> ; Jairo Leonardo Cuervo<sup>2</sup> ; Aquiles Enrique Darghan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Agronómica. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: mmcano@udca.edu.co

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá, D.C., Colombia

\*corresponding author: mmcano@udca.edu.co

**How to cite:** Cano, M.A.; Cuervo, J.L.; Darghan, A.E. 2022. Influence of microbial consortia on the incidence of grey mold (*Botrytis cinerea*) in strawberry (Monterey variety). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2312. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2312>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** October 21, 2021

**Accepted:** November 15, 2022

**Edited by:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

*Botrytis cinerea*, the causal agent of grey mold disease, is one of the most destructive pathogens of strawberry crops, both in vegetative development and postharvest. The control of this pathogen is complex due to its aggressiveness and ability to attack and infect various plant tissues and is mainly based on chemical control; however, the incorrect use of pesticides, mainly due to overdosing, causes the presence of traces of these agrochemicals in the fruits, as well as the selection of pathogen resistance to fungicides, making it a risk to human health and the environment. The objective of the study was to use biological regulation strategies, with the application of microbial consortia made up of mycorrhizal fungi, antagonistic bacteria and *Trichoderma harzianum*, as an alternative for the management of grey mold in strawberry crops (Monterey variety) under field conditions. Treatments T4 (mycorrhizal fungi), T8 (mycorrhizal fungi, antagonistic bacteria and *T. harzianum*) and T2 (*T. harzianum*) presented the lowest incidence of the pathogen with 2.6, 3.1 and 3.6 %, respectively, compared to control plants with 16.6%. The influence of all biological treatments on the regulation of *B. cinerea* was greater than the control.

**Keywords:** *Botrytis cinerea*; Biological regulation; Microbial consortia; Mycorrhizae; Antagonistic bacteria; *Trichoderma harzianum*.

### RESUMEN

*Botrytis cinerea*, el agente causal de la enfermedad del moho gris, es uno de los patógenos más destructivos del cultivo de fresa, tanto en el desarrollo vegetativo como en poscosecha. El control de este patógeno es complejo, debido a su agresividad y capacidad de atacar e infectar diversos tejidos de la planta y se basa, principalmente, en el control químico; sin embargo, el uso incorrecto de plaguicidas, principalmente por sobredosificación, provoca la presencia de trazas de estos agroquímicos en los frutos, así como la selección de resistencia del patógeno a los fungicidas, convirtiéndolo en un riesgo para la salud humana y el ambiente. El objetivo del estudio fue utilizar estrategias de regulación biológica, con la aplicación de consorcios microbianos, conformados por hongos micorrízicos, bacterias antagonistas y *Trichoderma harzianum*, como alternativa para el manejo del moho gris, en cultivos de fresa (variedad Monterey), en condiciones de campo. Los tratamientos T4 (hongos micorrízicos), T8 (hongos micorrízicos, bacterias antagonistas y *T. harzianum*) y T2 (*T. harzianum*) presentaron la menor incidencia del patógeno, con 2,6, 3,1 y 3,6 %, respectivamente, en comparación con las plantas control, con 16,6 %. La influencia de todos los tratamientos biológicos en la regulación de *B. cinerea* fue mayor respecto al control.

Palabras clave: *Botrytis cinerea*; Regulación biológica; Consorcios microbianos; Micorrizas; Bacterias antagonistas; *Trichoderma harzianum*.

## INTRODUCTION

Strawberry (*Fragaria × ananassa*) is a crop with high economic, nutritional, medicinal and culinary value (Lantz *et al.* 2010; PTP *et al.* 2013), to the point that it is considered a nutraceutical product, because of its high content of flavonoids, anthocyanins, phenolic compounds, and vitamins (Cao *et al.* 2011). Between 2015 and 2020, the area planted in strawberry crops in Colombia increased by 59 %, going from 1,656 hectares to 2,638, with an increase in production from 55,719 tons to 86,534, respectively (Minagricultura, 2021).

However, its production has a negative environmental impact because it depends on frequent applications of chemical fertilizers and products such as insecticides, fungicides, and herbicides, since it is highly susceptible to pathogens (Pritts, 2002; Vestberg *et al.* 2004). Edaphic pathogens such as *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, and *Fusarium* attack the crop. Other fungal diseases such as soft rot (*Rhizopus stolonifer*) and black rot (*Mucor* spp., *Aspergillus niger*, and *Pythium* spp.) are also common in postharvest. Anthracnose is also one of the major diseases caused by several species of the genus *Colletotrichum*, including *C. acutatum*, *C. fragariae*, and *C. gloeosporioides* (Chalfoun *et al.* 2011). These diseases have great importance because they can affect all plant tissues, such as stolons, crowns, stems, leaves, flowers, and fruits (Freeman & Katan, 1997), severely affecting productivity and profitability. Similarly, grey mold, caused by *Botrytis cinerea*, is one of the most destructive diseases during crop development and postharvest, causing severe economic losses, estimated at around 30 % of total production (Zhang *et al.* 2007). Even in postharvest, this pathogen is even more aggressive, affecting 95 % of the fruits 48 hours after harvesting (Li *et al.* 2019).

Traditionally, diseases caused by fungi are controlled with synthetic fungicides. However, there is increasing concern over the possible harmful effects these fungicides may have on the environment and human health. For the specific case of grey mold control, farmers use, among other strategies, chemical control with the application of the following active ingredients: Captan, Chlorothalonil, Iprodione, Procymidone, Fenhexamid, Diclofluanid, Tebuconazole, Methyl thiophanate, and Pyrimethanil (Fillinger *et al.* 2008, Leroux *et al.* 2010; FRAC, 2013). However, *B. cinerea* has a high capacity to become resistant to fungicides.

According to the above, the search for biological alternatives, such as the use of antagonistic microorganisms and/or biological control agents (BCA), is relevant for sustainable agriculture systems in order to achieve safe products (Guédez *et al.* 2009). Various studies have proven the individual effectiveness of some microorganisms used as biological control agents, such as fungi of the genus *Trichoderma*, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant growth promoting bacteria (PGPB's) antagonistic bacteria. However, research using functional mixtures of microorganisms to regulate pathogen

populations and seek positive effects on crop yield and quality under field conditions have not been sufficient, due to the very complexity of soil-plant-microorganism-ambient interactions.

For the above the purpose of this research was to evaluate the effect of microbial consortia on the incidence of grey mold in strawberry under field conditions.

## MATERIALS AND METHODS

**Area location and time of the study.** The experiment took place on the campus of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, U.D.C.A, at the research and teaching center “El Remanso”. The center is located at an altitude of 2560 m a.s.l, with geographic coordinates of N 4°35 W 74°04. Using a freely exposed production system, with 8 raised beds, 0.6 m width per bed, 0.4 meters between furrows, and 41.22 m long, plants were planted with three 0.3 m arrangements.

**Agroclimatic data.** Data reported by the Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) at the time that the experiment was developed, showed an average temperature of 14.1 °C, and precipitation of 506.5 mm; however, the high level of rainfall was during the experiment, reporting more than 50 % of the precipitation for that year. This increased the relative humidity, which registered values between 80 and 90 %.

**Vegetable material and field distribution.** In total, 1920 strawberry plants Monterey variety were used, distributed in eight blocks, and each block had eight treatments with 30 plants per treatment (Table 1).

**Cultivation management.** The agronomic management of the crop was focused on a clean production system, which completely restricted the use of chemicals for phytosanitary protection, instead, the cultural practices included phytosanitary pruning, with proper management of the remains of the infected plants, which were removed from the crop immediately and transferred to covered compost to decrease the inoculum of the infection and the dispersion of the pathogens. In addition, microbial inoculants were added at the time of transplantation, and re-inoculation was done three months after planting as a strategy for the regulation of the pathogens.

The cultivation system contemplated the elevation of beds or furrows, which were covered with mulch/plastic to reduce the presence of pathogens and weeds as is done in commercial crops on the savanna of Bogota. The irrigation system that was implemented used dripping, which was also used for fertilization. The first fertilization was done three months after sowing and for the study area, according to the soil analysis, with a recommended application of 533 g of Nitrogen (N), 666 g of Phosphorus (P) and 930 g of Potassium (K).

However, the fertilization was reduced to 50 % of the recommended dose because of the inoculation of biological products that are

Table 1. Treatments and disposition of them in the field.

Treatment	Block	Randomization within blocks							
T1- Control (uninoculated plants)	I	T1	T6	T3	T5	T8	T4	T2	T7
T2 <i>Trichoderma</i> (I)	II	T3	T1	T5	T8	T7	T6	T4	T2
T3 Bacteria (B)	III	T3	T8	T6	T2	T5	T1	T7	T4
T4 Mycorrhizal fungi (M)	IV	T5	T1	T6	T8	T4	T2	T7	T3
T5 (I+B)	V	T8	T4	T7	T5	T3	T6	T2	T1
T6 (I+M)	VI	T2	T5	T3	T7	T6	T4	T1	T8
T7 (B+M)	VII	T6	T7	T4	T8	T1	T5	T2	T3
T8 (I+B+M)	VIII	T8	T3	T2	T7	T6	T5	T4	T1

sensitive to optimum levels of fertilizers. In addition, the inclusion of biofertilization practice (the inoculums used as biological control agents, are also known as biofertilizers) decreases the demand for synthetic fertilizers by optimizing soil nutrient mineralization and plant availability (Li *et al.* 2017; Mondal *et al.* 2017). Finally, 250 g of N, 300 g of P and 400 g of K, applications were prepared in a mixture of 11 L of water and applied for five minutes once a week for four weeks. The subsequent fertilization was done six months to the ninth month (after sowing) increasing the dose of calcium nitrate to 300 g (N), 380 g of diammonium phosphate (P) and 480 g of potassium nitrate (K), once a week for 4 weeks.

**Experimental inoculum.** Microbial inoculants and their bioregulatory effect on pathogens are listed in table 2. The selection of microbial inoculants and consortia and the mixture of these were carried out to potentiate the beneficial effects for plant growth and protection against *B. cinerea*, knowing the multifunctionality as plant growth biostimulants and control agents biological of each of the microorganisms that made up the mixtures. However, the mixture was also made to observe the compatibility and/or functional complementarity of these microorganisms. Each plant per treatment was inoculated with 100 mL of solution plus an adjuvant (Agrotin®)  $2 \text{ cm}^3\text{L}^{-1}$  at the time of transplantation and three months after the establishment of the crop.

**Presence or absence of grey mold.** The incidence of grey mold disease was evaluated in all plants, 90 days after transplantation. Only the incidence of the disease in fruits, as these are the main organ of interest in the production, was taken into account for the collection of the information, and for marking the plants according to diagnosis (diseased). The presence of at least one fruit affected by the disease was considered a diseased plant.

***Botrytis cinerea* natural inoculum.** *B. cinerea* was not introduced to the crop, but was present in the soil as sclerotia, due to the

previous sowing of strawberry Albión variety, during the semester immediately before the experiment, which presented estimated losses of over 30 % due to the presence of grey mold disease.

To monitor the grey mold disease at the time of sampling, the presence of the disease in fruits. After the field count, samples were taken to the vegetable sanitary laboratory in the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, to perform the microscopic observation of the pathogen and corroborate the presence of the disease in affected fruits.

**Experimental design and associated variables.** A simple factorial design was used in a randomized complete block design with eight blocks and eight treatments and 30 plants per treatment. The variable response was associated with the presence-absence dichotomy of grey mold and the explanatory variables involved blocking factors and biological treatments. The variables associated with the diagnosis of the disease (presence-absence) were evaluated in addition to the proportion of dead plants that were excluded from the modeling process since some of them died from causes different from the disease; for example, those that died from stress after transplantation. Table 1 shows the treatments and distribution of the treatments. The diagnosis was disaggregated by blocks and treatments.

**Statistical analysis.** Methodology for data analysis: The explanatory variables in logistic regression can be quantitative or qualitative, that is, factors such as treatments or blocks and covariates associated with physical and chemical properties of soil, air, and water. One of its advantages is that the interpretation of the model is possible by probabilities or disparity coefficients, which are a function of the model parameter (Stokes *et al.* 2012).

The statistical analysis included the descriptive component as the inferential. In the first case, the diagram of the spatial distribution of the plants was constructed according to the diagnosis of the

Table 2. Pathogen bioregulating microorganisms used in the experiment.

Microorganisms	Composition and dosification	Antagonistic effect
<b>Mycorrhizal fungi</b> <i>Kuklospora colombiana</i> <i>Glomus manibotis</i> , <i>G. intrarradices</i> , <i>G. etunicatum</i>	825 spores of each mycorrhiza species per pound of product. 100 g of product/25 liters of water	-Competition for space and nutrients. -Induction to systemic resistance in plants. -Changes in the composition of the rizospheric biota because of the mycorrhizal exudates.
<b>Antagonistic bacteria</b> <i>Azotobacter chroococcum</i> <i>Pseudomonas aureofaciens</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>B. megaterium</i> <i>B. subtilis</i>	2X10 <sup>10</sup> UFC viable per gram  1 g per liter of water	-Competition for space and nutrients. -Induction to systemic resistance in plants. -Production of antibiotics. -Production of lytic enzymes. -Production of siderophores.
<b>Antagonistic fungus</b> <i>Trichoderma harzianum</i>	Each gram has 5X10 <sup>8</sup> (500 millions) of Conidiospores viable  2 g of active ingredient per each 100 g of formulation	-Competition for space and nutrients. -Induction to systemic resistance in plants. -Production of siderophores. -Production of lytic enzymes. -Micoparasitism.

disease, discriminated by treatments and blocks. Subsequently, the crossed tables were obtained for the proportion of plants according to diagnosis and the corresponding block, accompanying each proportion with the respective marginal count. A bar chart was then presented for diagnosis only in the levels of presence and absence of the disease by treatments and blocks. In the inferential component, a logistic regression model for the response associated with the diagnosis was adjusted using treatments and blocking as explanatory variables. Finally, the table of proportions predicted or adjusted by the model was constructed for each explanatory variable, values being compared with the observed values were sufficient reason to validate the model. The diagram for visualization of the spatial pattern as well as the adjustment of the logistic regression model was made using free software R. The likelihood ratio test was used to verify the fit of the model, comparing the complete model with the reduced model (only treatments effect).

## RESULTS AND DISCUSSION

The presence of grey mold disease in strawberry fruits was evident, fruits collected in the field were taken to the plant health laboratory of the U.D.C.A, to make the respective macro and microscopic observations (Figure 1).

The spatial representation of the disease diagnosis in healthy (green) and diseased (red) levels is seen in figure 2. The blank spaces between furrows and plants of each line correspond to dead plants (which were discarded from all analyzes once detected). The figure 2 fits the actual scheme of the sowing method and the coordinates (x, y) represents the measurements in centimeters.

For the inferential component, a logistic regression model was fitted using treatments and blocks as a factor and, as a response, the presence or absence of grey mold in fruits. The binary response variable (denoted by y), associated with the presence or absence of grey mold was written as a function of two predictor variables (denoted by x and z), namely the type of treatment (x) and the block (z).

Results showed statistical significance for the intercept and the coefficient associated with the treatments ( $p < 5\%$ ), not for the effect of the blocks (Table 3). Equation 1 was written as:

$$\text{logit}[p(y=1)] = -2,47110 - 0,08398x_i + 0,06782z_j,$$

$$\ln \left[ \frac{p(y=1)}{1-p(y=1)} \right] = -2,47110 - 0,08398x_i + 0,06782z_j,$$

$$\frac{p(y=1)}{1-p(y=1)} = e^{-2,47110 - 0,08398x_i + 0,06782z_j},$$

$$p(y=1) = \frac{e^{-2,47110 - 0,08398x_i + 0,06782z_j}}{1 + e^{-2,47110 - 0,08398x_i + 0,06782z_j}},$$

Therefore, the incidence of the grey mold disease estimated for all blocks and treatments is obtained by substituting the values of i and j associated with the treatments and blocks, respectively. The estimated values by the model next to a visual diagram (Figure 3), were used to rank the treatments according to the response.

In addition to the spatial distribution, the estimation of statistical significance coefficients and distribution of prevalence according to

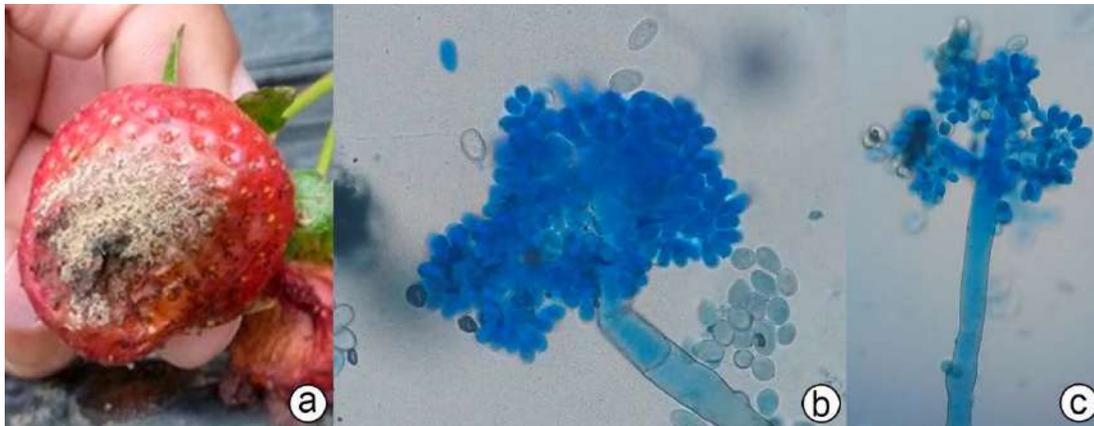


Figure 1. Presence of grey mold disease in the experimental field. a) Strawberry fruit with symptoms of grey mold; b) and c) microscopic observation of *Botrytis cinerea* conidiophores (40 and 10X).

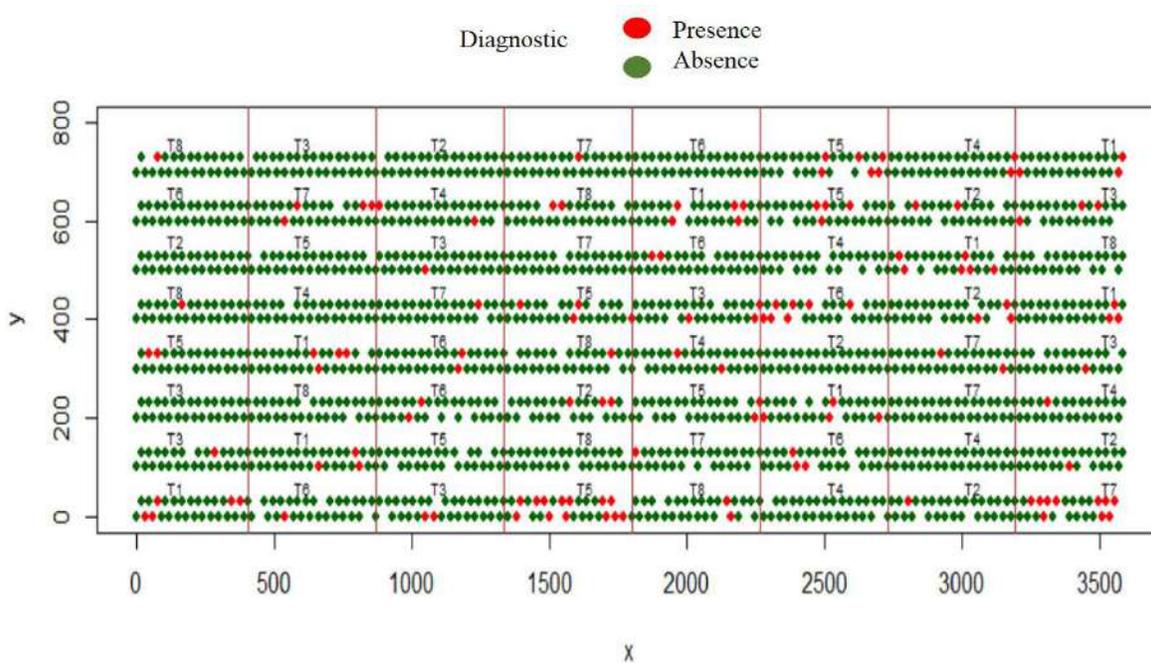


Figure 2. Spatial distribution of the disease diagnosis (Grey mold), according to treatment and shaped blocks 90 days after sowing.

Table 3. Estimated coefficients of the model and their statistical significance.

Coefficients	Estimate	Standard error	Value Z	Pr(>  z )
Intercept	-2,47110	0,26458	-9,340	< 2*10 <sup>-16</sup> ***
Treatments	-0,08398	0,03947	-2,127	0,0334 *
Blocks	0,06782	0,03935	1,724	0,0848 ·

diagnosis (in percentage), healthy, diseased and dead plants frequency per treatment was obtained (Figure 3). The values of the model adjustment (proof of the likelihood ratio) yielded a significance value of less than 5 %, placing the reduced model (without block effect)

as a better model, as compared to the complete model. This result was consistent with the value of the null deviation and the residual deviation of the model.

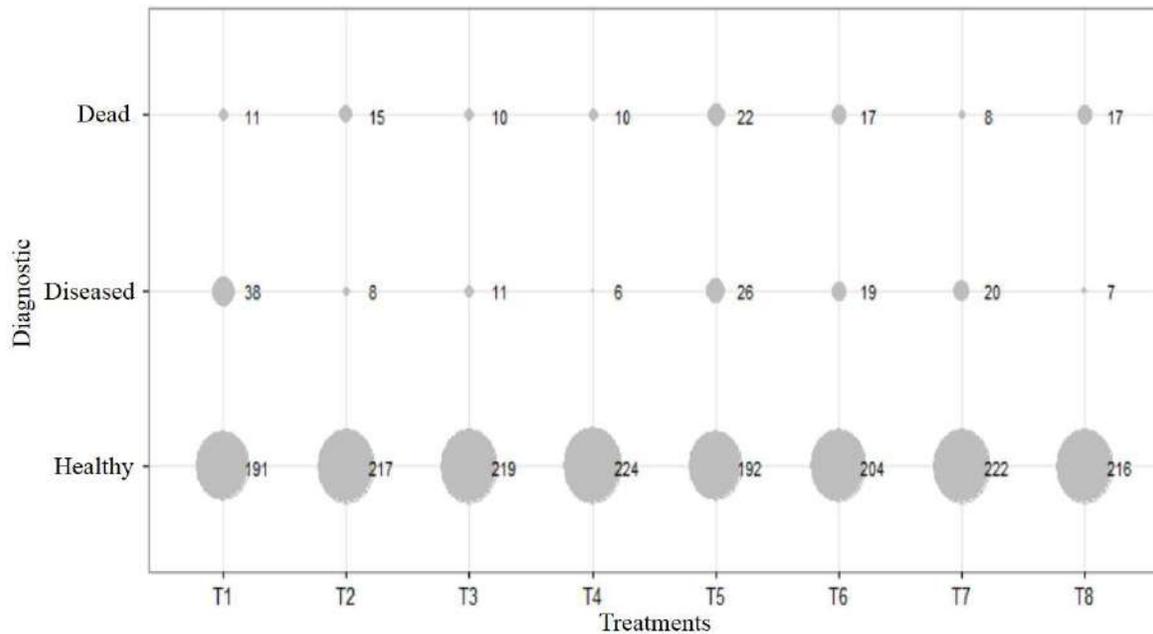


Figure 3. Marginal distribution of plant counts according to diagnosis (healthy, diseased, dead) for treatments: T1 Control (C), T2 *Trichoderma* (T), T3 Bacteria (B), T4 Mycorrhizal fungi (M), T5 (T + B), T6 (T + M), T7 (B + M) and T8 (T + B + M).

The size of the circles is proportional to the frequency of the data, so the higher count is associated with healthy plants in both treatments and blocks, and the smaller points are associated with the low presence of grey mold disease. The treated plants were compared to the control in the line of diseased plants.

In figure 3, it is observed the low presence of grey mold disease, noting the graphic variability in the small size of the circles for all the biological treatments applied, with percentages of incidence of the disease in ascending order of: 2.6 (T4); 3.1 (T8); 3.6 (T2); 8.5 (T6); 8.6 (T7); 11.9 (T5), compared with control plants, which were not inoculated, nor treated with any chemical and had the highest percentage of incidence of the disease 16.6 (T1). Similar results were found in grapes, where *B. cinerea* had effective control with using different biological control agents (Pertot *et al.* 2017).

It was observed that the lowest incidence rates of grey mold disease are possibly related to the presence of mycorrhizal fungal consortium (Figure 3). These results may suggest that mycorrhizal fungi are strong competitors for space and nutrients in the rhizosphere (Brimner & Boland, 2003; Selosse *et al.* 2004; Pozo & Azcón-Aguilar, 2007; Avis *et al.* 2008; Wehner *et al.* 2010), are capable of rapidly colonizing the interior of the roots and extending a network of hyphae to the exterior, thus hindering the passage and mobility of pathogens, and also stimulate the plant defense system (Hause *et al.* 2007; Hause & Schaarschmid, 2009). Indirectly, hyphae produce exudates, which can modify the microbiome, and this modulates interactions with other organisms present in the rhizospheric zone (Finlay, 2004).

Regarding the microbial consortium composed of all microorganisms used in this research (T8), the incidence of *B. cinerea* was low at 3.1

%, placing it as the second-best treatment, compared to the control and the other treatments. This result may suggest the existence of functional compatibility of the consortium, in terms of the biological regulation of pathogens. In addition, a certain number of soil microorganisms stimulate the predetermined, and internal protection and defense system of plants, diminishing the biotic or abiotic stress (Kapoor *et al.* 2008).

Even though the results of this research seem so strong, it is difficult to predict the result of the interactions between beneficial plants and soil microorganisms, even more among the species of microorganisms used (Vázquez *et al.* 2000). However, the interactions between microorganisms are complex and synergic effects can be presented that potentiate the benefits for the plant or, on the contrary, antagonistic effects or simply that no effect occurs (Cano, 2011).

According to Bisutti *et al.* (2017), the biological control is complex and even more so with microbial mixtures, elucidating the mode of action is difficult, but microorganisms directly exert a beneficial effect in the promotion of plant growth and the strengthening of plants, against pathogens and adverse environmental conditions.

The use of biological control agents for managing diseases represents a viable alternative to replace or reduce applications of chemical fungicides (Cotes, 2014). In this investigation, the microbial consortia possibly acted jointly, to a different extent, but with positive results regarding the reduced incidence of grey mold disease, for all biological treatments, compared with plants without inoculation. This result may be due to what was suggested by Pertot *et al.* (2017), who points out that the combined strategy of different microbial biological control agents did not differ from the results

when the individual treatments were applied, for the control of *B. cinerea* in grapes, which indicates that the microorganisms do not interfere negatively between them, and they could occupy different ecological niches. Likewise, similar results were presented by Pertot *et al.* (2008), using a different microbial consortium, composed of *Ampelomyces quisqualis* T. *harzianum* T39 and *Bacillus subtilis*, but to a lesser extent than chemical fungicides; however, biological control agents, reduce the use of chemical fungicides and can be applied alternately as part of an integrated disease management program.

According to the results of this research, the treatment T2 (*T. harzianum*), showed to be the third best treatment, very similar to the treatments T4 and T8 and compared with the control plants. Similar results were reported by Merchán-Gaitán *et al.* (2014), finding that in strawberry plants, the control obtained a greater incidence value of *B. cinerea*, than the treatments in which the biocontrollers (*T. harzianum* and *T. lignorum*) were applied (Ventana and Camino Real varieties).

*T. harzianum*, is one of the most widely distributed biological control agents in the world with a broad spectrum of pathogens that it regulates. It is also an excellent competitor, with high growth rates that surpasses most pathogens *in vitro* and is characterized by having different mechanisms and modes of action for bioregulation such as competition, mycoparasitism, production of lytic enzymes, antibiosis, production of siderophores, and stimulation of plants defense system (Harman *et al.* 2004; Harman, 2006). The results of this research concur with the literature because *T. harzianum* has a wide antagonistic potential that reduced the incidence of *B. cinerea*, compared with the plants that were not inoculated.

In this regard, Yang *et al.* (2009), in laboratory conditions, tested the bioregulatory efficiency of *T. harzianum* on *B. cinerea* isolated from the strawberry crop, obtaining positive results and mentioned that *T. harzianum* possesses a constitutive elicitor protein that acts against *B. cinerea* and other pathogens such as *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporum*. In the same way, Guédez *et al.* (2009), under similar conditions, dual tests in the laboratory, observed that the antagonist *T. harzianum* is a good competitor (rapid growth), and possibly its main mechanism of action is mycoparasitism, in common strawberry postharvest pathogens, such as *Rhizopus stolonifer*, *Mucor* spp., *Penicillium digitatum*, *Rhizoctonia solani*, *Aspergillus niger* and *Pythium* spp.

In contrast to the above, the treatments T5, T6, and T7, even though they had lower percentages of incidence of the disease 11.9, 8.5 and 8.6 %, respectively, compared to the control (T1) 16.6 %, the response was not as noticeable as the other treatments analyzed. It is possible that, as previously mentioned, these mixtures of microorganisms did not present adequate complementation in the regulation of the disease; some of the different microbial consortia members could alter the bioregulatory effect of others, affecting the effectiveness or efficiency of the consortium in the pathogen biological regulation.

Results of this investigation showed that the inoculation and co-inoculation of mycorrhizal fungi, antagonistic bacteria, and *T. harzianum*, interact positively in favor of the plants' health, managing to reduce the incidence of *B. cinerea* in strawberry fruits.

**Acknowledgment.** This research was supported by the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. We thank our colleagues from Universidad Nacional de Colombia, who provided technical advice, insight, and expertise that greatly assisted the research, and to every people that made possible the development of this project.

## REFERENCES

1. AVIS, T.J.; GRAVEL, V.; ANTOUN, H.; TWEDDELL, R.J. 2008. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(7):1733-1740. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.013>
2. BISUTTI, I.L.; PELZ, J.; BÜTTNER, C.; STEPHAN, D. 2017. Field assessment on the influence of RhizoVital® 42 fl. and Trichostar® on strawberries in the presence of soil-borne diseases. *Crop Protection*. 96:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.02.004>
3. BRIMNER, T.A.; BOLAND, G.J. 2003. A review of the non-target effects of fungi used to biologically control plant diseases. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 100(1):3-16. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00200-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00200-7)
4. CANO, M.A. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 14(2):15-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>
5. CAO, S.; HU, Z.; ZHENG, Y.; YANG, Z.; LU, B. 2011. Effect of BTH on antioxidant enzymes, radical-scavenging activity and decay in strawberry fruit. *Food Chemistry*. 125(1):145-149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.051>
6. CHALFOUN, N.R.; CASTAGNARO, A.P.; DÍAZ RICCI, J.C. 2011. Induced resistance activated by a culture filtrate derived from an avirulent pathogen as a mechanism of biological control of anthracnose in strawberry. *Biological Control*. 58(3):319-329. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.05.007>
7. COTES, A.M. 2014. Control biológico de enfermedades de plantas en Colombia. En: Bettioli, W.; Rivera, M.C.; Mondino, P.; Montealegre, J.R.; Colmenárez, Y.C. (eds). *Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe*. Universidad de la República. p.169-179.

8. FILLINGER, S.; LEROUX, P.; AUCLAIR, C.; BARREAU, C.; AL HAJJ, C.; DEBIEU, D. 2008. Genetic analysis of Fenhexamid-Resistant field isolates of the phytopathogenic fungus *Botrytis cinerea*. Antimicrobial agents and chemotherapy. 52(11):3933-3940. <https://doi.org/10.1128/aac.00615-08>
9. FINLAY, R.D. 2004. Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles. Mycologist. 18(2):91-96. [https://doi.org/10.1017/S0269-915X\(04\)00205-8](https://doi.org/10.1017/S0269-915X(04)00205-8)
10. FREEMAN, S.; KATAN, T. 1997. Identification of *Colletotrichum* species responsible for anthracnose and root necrosis of strawberry in Israel. Phytopathology. 87(5):516-521. <https://doi.org/10.1094/phyto.1997.87.5.516>
11. FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE, FRAC. 2013. List of plant pathogenic organisms resistant to disease control agents. FRAC. 71p. Disponible desde Internet en: [https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sdhi-fungicides/group/list-of-resistant-plant-pathogens\\_2012-edition.pdf](https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sdhi-fungicides/group/list-of-resistant-plant-pathogens_2012-edition.pdf)
12. GUÉDEZ, C.; CAÑIZÁLEZ, L.; CASTILLO, C.; OLIVAR, R. 2009. Efecto antagónico de *Trichoderma harzianum* sobre algunos hongos patógenos postcosecha de la fresa (*Fragaria* spp.). Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología. 29(1):34-38.
13. HARMAN, G.E. 2006. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. Phytopathology. 96(2):190-194. <https://doi.org/10.1094/phyto-96-0190>
14. HARMAN, G.E.; PETZOLDT, R.; COMIS, A.; CHEN, J. 2004. Interactions Between *Trichoderma harzianum* strain T22 and maize inbred line Mo17 and effects of these interactions on diseases caused by *Pythium ultimum* and *Colletotrichum graminicola*. Phytopathology. 94(2):147-153. <https://doi.org/10.1094/phyto.2004.94.2.147>
15. HAUSE, B.; MROSK, C.; ISAYENKOV, S.; STRACK, D. 2007. Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. Phytochemistry. 68(1):101-110. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.025>
16. HAUSE, B.; SCHAARSCHMIDT, S. 2009. The role of jasmonates in mutualistic symbioses between plants and soil-born microorganisms. Phytochemistry. 70(13-14):1589-1599. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.07.003>
17. KAPOOR, R.; SHARMA, D.; BHATNAGAR, A.K. 2008. Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. Scientia Horticulturae. 116(3):227-239. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.02.002>
18. LANTZ, W.; SWARTZ, H.; DEMCHAK, K.; FRICK, S. 2010. Season-long strawberry production with ever bearers for northeastern producers. University of Maryland Extension. 70p.
19. LEROUX, P.; GREDT, M.; LEROCH, M.; WALKER, A.-S. 2010. Exploring mechanisms of resistance to respiratory inhibitors in field strains of *Botrytis cinerea*, the causal agent of gray mold. Applied and Environmental Microbiology. 76(19):6615-6630. <https://doi.org/10.1128/aem.00931-10>
20. LI, R.; TAO, R.; LING, N.; CHU, G. 2017. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality. Soil and Tillage Research. 167:30-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.001>
21. LI, X.; XIE, X.; XING, F.; XU, L.; ZHANG, J.; WANG, Z. 2019. Glucose oxidase as a control agent against the fungal pathogen *Botrytis cinerea* in postharvest strawberry. Food Control. 105:277-284. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.05.037>
22. MERCHÁN-GAITÁN, J.B.; FERRUCHO, R.L.; ÁLVAREZ-HERRERA, J.G. 2014. Efecto de dos cepas de *Trichoderma* en el control de *Botrytis cinerea* y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria* sp.). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 8(1):44-56.
23. MINISTERIO DE AGRICULTURA, MINAGRICULTURA. 2021. Cadena de la fresa. Minagricultura. 22p. Disponible desde Internet en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fresa/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
24. MONDAL, T.; DATTA, J.K.; MONDAL, N.K. 2017. Chemical fertilizer in conjunction with biofertilizer and vermicompost induced changes in morpho-physiological and bio-chemical traits of mustard crop. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 16(2):135-144. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.001>
25. PERTOT, I.; GIOVANNINI, O.; BENANCHI, M.; CAFFI, T.; ROSSI, V.; MUGNAI, L. 2017. Combining biocontrol agents with different mechanisms of action in a strategy to control *Botrytis cinerea* on grapevine. Crop Protection. 97:85-93. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.010>
26. PERTOT, I.; ZASSO, R.; AMSALEM, L.; BALDESSARI, M.; ANGELI, G.; ELAD, Y. 2008. Integrating biocontrol agents

- in strawberry powdery mildew control strategies in high tunnel growing systems. *Crop Protection*. 27(3-5):622-631. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.09.004>
27. POZO, M.J.; AZCÓN-AGUILAR, C. 2007. Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*. 10(4):393-398. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004>
28. PRITTS, M. 2002. Growing strawberries, healthy communities, strong economies and clean environments: what is the role of the researcher? *Acta Horticulturae*. 567:411-417. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.85>
29. PROGRAMA DE TRANSFORMACIÓN PRODUCTIVA, PTP; ASOCIACIÓN HORTIFRUTICOLA DE COLOMBIA, ASOHOFRUCOL.; FONDO NACIONAL DE FOMENTO HORTIFRUTÍCOLA. 2013. Plan de negocios de fresa: Programa de transformación productiva. 171p.
30. SELOSSE, M.-A.; BAUDOIN, E.; VANDENKOORNHUYSE, P. 2004. Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. *Comptes Rendus Biologies*. 327(7):639-648. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2003.12.008>
31. STOKES, M.E.; DAVIS, C.S.; KOCH, G.G. 2012. *Categorical Data Analysis Using SAS*. Third Edition. SAS Institute Inc (Cary, NC). 590p.
32. VÁZQUEZ, M.M.; CÉSAR, S.; AZCÓN, R.; BAREA, J.M. 2000. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Applied Soil Ecology*. 15(3):261-272. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00075-5)
33. VESTBERG, M.; KUKKONEN, S.; SAARI, K.; PARIKKA, P.; HUTTUNEN, J.; TAINIO, L.; DEVOS, N.; WEEKERS, F.; KEVERS, C.; THONART, P.; LEMOINE, M.-C.; CORDIER, C.; ALABOUVETTE, C.; GIANINAZZI, S. 2004. Microbial inoculation for improving the growth and health of micropropagated strawberry. *Applied Soil Ecology*. 27(3):243-258. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.05.006>
34. WEHNER, J.; ANTUNES, P.M.; POWELL, J.R.; MAZUKATOW, J.; RILLIG, M.C. 2010. Plant pathogen protection by arbuscular mycorrhizas: A role for fungal diversity? *Pedobiologia*. 53(3):197-201. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2009.10.002>
35. YANG, H.-H.; YANG, S.L.; PENG, K.-C.; LO, C.-T.; LIU, S.-Y. 2009. Induced proteome of *Trichoderma harzianum* by *Botrytis cinerea*. *Mycological Research*. 113(9):924-932. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2009.04.004>
36. ZHANG, H.; WANG, L.; DONG, Y.; JIANG, S.; CAO, J.; MENG, R. 2007. Postharvest biological control of gray mold decay of strawberry with *Rhodotorula glutinis*. *Biological Control*. 40(2):287-292. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.10.008>



# Detección molecular de *Cucumber mosaic virus* y *Pepper severe mottle virus* en arvenses asociadas al cultivo de ají (*Capsicum* spp.)

## Molecular detection of *Cucumber mosaic virus* and *Pepper severe mottle virus* in weeds associated with chili pepper cultivation (*Capsicum* spp.)

Karina López-López<sup>1,2\*</sup> ; Andrea Corredor-Rodríguez<sup>1,2</sup> ; Juan Carlos Vaca-Vaca<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo IPMA Interacción Planta Microorganismo Ambiente. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: klopezl@unal.edu.co; acorredor@unal.edu.co; jcvacava@unal.edu.co

<sup>2</sup>Universidad del Valle, Centro de Investigación e Innovación en Bioinformática y Fotónica – CIBioFi. Cali - Valle del Cauca, Colombia.

\*autor de correspondencia: klopezl@unal.edu.co

**Cómo citar:** López-López, K.; Corredor-Rodríguez, A.; Vaca-Vaca, J.C. 2022. Detección molecular de *Cucumber mosaic virus* y *Pepper severe mottle virus* en arvenses asociadas al cultivo de ají (*Capsicum* spp.). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2277. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2277>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** mayo 4 de 2022

**Aceptado:** noviembre 10 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

En los últimos años, el ají (*Capsicum chinense*, *Capsicum frutescens* y *Capsicum annuum* var. *Acuminatum*), cultivado en el Valle del Cauca, se ha visto afectado por enfermedades virales causadas por *Cucumber mosaic virus* (CMV-ají) y *Pepper severe mottle virus* (PepSMoV). Pese a que estos dos virus son limitantes para producción del cultivo de ají, en la actualidad, pocos estudios han identificado los hospederos alternos de CMV-ají y PepSMoV. En este trabajo, se evaluó la presencia de CMV-ají y PepSMoV, mediante RT-PCR, en muestras de tejido foliar, de 121 plantas arvenses, asociadas al cultivo de ají, en el Valle del Cauca, Colombia. El análisis molecular indicó la presencia de CMV-ají, en el 21,4 % de las plantas recolectadas y de PepSMoV, en el 20,6 %. Se identificaron las especies arvenses *Amaranthus viridis*, *Parthenium hysterophorus*, *Hippobroma longiflora*, *Commelina diffusa*, *Clitoria ternatea*, *Crotalaria incana*, *Desmodium tortuosum*, *Desmodium intortum*, *Macroptilium lathyroides*, *Anoda acerifolia*, *Boerhavia erecta*, *Bougainvillea glabra*, *Rivina humilis*, *Browallia americana*,

*Capsicum rhomboideum*, *Solanum americanum* y *Lantana camara*, como hospederas de CMV-ají o PepSMoV. Se presentó infección mixta de CMV-ají y PepSMoV, en 57 % de las arvenses positivas a virus, las cuales, están distribuidas en zonas productoras de ají, localizadas en seis municipios del Valle del Cauca. Estos resultados brindan información sobre la distribución de estos virus en el Valle del Cauca, contribuyen al conocimiento de la epidemiología viral y servirán para diseñar medidas de manejo, orientadas a prevenir las infecciones virales en los cultivos de ají.

Palabras clave: Ají; Arvenses; Cucumovirus; Potyvirus; RT-PCR.

### ABSTRACT

In recent years, chili pepper (*Capsicum chinense*, *Capsicum frutescens* y *Capsicum annuum* var. *Acuminatum*) grown in Valle del Cauca has been affected by viral diseases caused by *Cucumber mosaic virus* (CMV-chili pepper) and *Pepper severe mottle virus* (PepSMoV). Although these two viruses are limiting to the production of

the chili pepper crop, at present, few studies have identified the alternate hosts of CMV-chili pepper and PepSMoV. In this work, the presence of CMV-chili pepper and PepSMoV were evaluated by RT-PCR in leaf tissue samples from 121 weed plants associated with chili pepper cultivation in Valle del Cauca, Colombia. Molecular analysis indicated the presence of CMV-chili pepper in 21.4 % of the collected plants and PepSMoV in 20.6 %. Weed species *Amaranthus viridis*, *Parthenium hysterophorus*, *Hippobroma longiflora*, *Commelina diffusa*, *Clitoria ternatea*, *Crotalaria incana*, *Desmodium tortuosum*, *Desmodium intortum*, *Macroptilium lathyroides*, *Anoda acerifolia*, *Boerhavia erecta*, *Bougainvillea glabra*, *Rivina humilis*, *Brouallia americana*, *Capsicum rhomboideum*, *Solanum americanum* and *Lantana camara*, as hosts of CMV-chili pepper or PepSMoV. Mixed infection of CMV-chili pepper and PepSMoV was present in 57 % of the weeds positive for viruses, which are distributed in chili pepper producing areas located in six municipalities of Valle del Cauca. These results provide information on the distribution of these viruses in Valle del Cauca. Contribute to the knowledge of viral epidemiology and will serve to design management measures aimed to prevent viral infections in chili pepper crops.

Keywords: Chili pepper; Weeds; Cucumovirus; Potyvirus; RT-PCR.

## INTRODUCCIÓN

El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanaceae, nativo de Centro y Sur América, comprende más de 30 especies, cinco de ellas cultivadas y utilizadas por el hombre para su consumo: *Capsicum annuum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum chinense*, *Capsicum pubescens* y *Capsicum baccatum* (Kenyon *et al.* 2014; Parisi *et al.* 2020). Las diferentes características y propiedades del ají (*Capsicum* spp.) hacen de esta hortaliza un producto atractivo en los mercados internacionales, puesto que, además de usarse como condimento en la cocina tradicional, el ají, es fuente de colorantes y de principios activos, empleados en la industria cosmética y farmacéutica (Kenyon *et al.* 2014; Parisi *et al.* 2020).

En la actualidad, la calidad del fruto y la productividad agrícola se ven afectados por el cambio climático y las enfermedades de origen bacteriano, fúngico y viral (Kenyon *et al.* 2014; Pinto *et al.* 2016; Parisi *et al.* 2020), incluso, se documenta que la incidencia viral en zonas productoras de ají ha aumentado en los últimos años, en las regiones tropicales y subtropicales (Kenyon *et al.* 2014).

En Colombia, esta problemática se evidencia en cultivares de ají, sembrados en el departamento del Valle del Cauca, en donde, recientemente, se aislaron y se caracterizaron, molecularmente, tres virus que afectan la producción de esta solanácea: el begomovirus (familia *Geminiviridae*), virus del mosaico rugoso del ají (*Pepper rugose mosaic virus*, PRMV), el cucumovirus (familia *Bromoviridae*) *Cucumber mosaic virus* (CMV-ají) y el potyvirus (familia *Potyviridae*), virus del moteado severo del ají (*Pepper severe mottle virus*, PepSMoV) (Vaca-Vaca *et al.* 2019; Rivera-Toro *et al.* 2020; Rivera-Toro *et al.* 2021). Investigaciones recientes demostraron que CMV-ají y PepSMoV son agentes infecciosos para las plantas de ají, ya que pueden inducir síntomas, como deformación y mosaicos

dorados en sus hojas, ocasionar retraso en el crecimiento de las plantas y afectar su desarrollo (Rivera-Toro *et al.* 2020; Rivera-Toro *et al.* 2021).

Aunque las investigaciones sobre las enfermedades de origen viral se realizan mayoritariamente en los cultivos es cierto que las plantas silvestres son fundamentales en la generación de variación genética viral y parte clave de la epidemiología viral en los agroecosistemas (Duffus, 1971; Prajapat *et al.* 2014; Rodríguez-Negrete *et al.* 2019). Las arvenses pueden ser fuentes de virus aun no conocidos, ser reservorios de virus importantes para la agricultura u hospederas de vectores biológicos (Apablaza *et al.* 2003; Wisler & Norris, 2005; Prajapat *et al.* 2014; Rodríguez-Negrete *et al.* 2019).

En este contexto, en el Valle del Cauca, se reporta la presencia de begomovirus en arvenses asociadas a los cultivos de tomate y ají (López-López *et al.* 2019; Vaca-Vaca *et al.* 2020). En el caso de PRMV, este se detecta en las especies arvenses *Eclipta prostrata*, *Desmodium tortuosum*, *Rhynchosia minima*, *Panicum polygonatum*, *Capsicum rhomboideum* y *Solanum americanum* (López-López *et al.* 2022); no obstante, hasta el momento, el conocimiento sobre los hospederos alternos de CMV-ají y PepSMoV en los ecosistemas agrícolas de Colombia es limitado.

Al considerar la diversidad de especies arvenses en las zonas productoras de ají y su papel como posibles reservorios de virus, que pueden ser transmitidos a nuevos hospederos, se justifica la realización del presente estudio, el cual, tuvo como objetivo identificar hospederos alternos de los virus CMV-ají y PepSMoV, en arvenses asociadas al cultivo de ají, en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Esta información es importante para conocer cuál es la distribución de estos virus, sus hospederos alternos y su papel en los ecosistemas agrícolas del departamento. Lo anterior, es de gran utilidad para implementar un manejo eficiente en el control de PepSMoV y CMV-ají, que permitan disminuir su incidencia en las plantas susceptibles y reducir el daño causado por las enfermedades virales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Recolección de material vegetal.** Durante el 2018, se recolectaron plantas arvenses en el departamento del Valle del Cauca, provenientes de nueve fincas productoras de ají, ubicadas en los municipios de Bolívar, Candelaria, La Unión, Roldanillo, Tuluá, Vijes y Yumbo (Figura 1). Las plantas, se seleccionaron de manera aleatoria dentro y alrededor de las parcelas. Las hojas de cada una de las plantas, se almacenaron en tubos cónicos de plástico con tapa de rosca Falcon<sup>TM</sup>, de 50 mL, con sílica gel, a temperatura ambiente; adicionalmente, parte del tejido foliar de cada arvense, se molió con nitrógeno líquido (N<sub>2</sub>) y se transfirió a tubos de plástico Eppendorf<sup>TM</sup> de 2 mL, para su almacenamiento final, a -20 °C, hasta su posterior análisis.

**Determinación taxonómica de las arvenses.** La determinación taxonómica de las arvenses, se llevó a cabo en el Herbario “José Cuatrecasas Arumí” de la Universidad Nacional de Colombia,

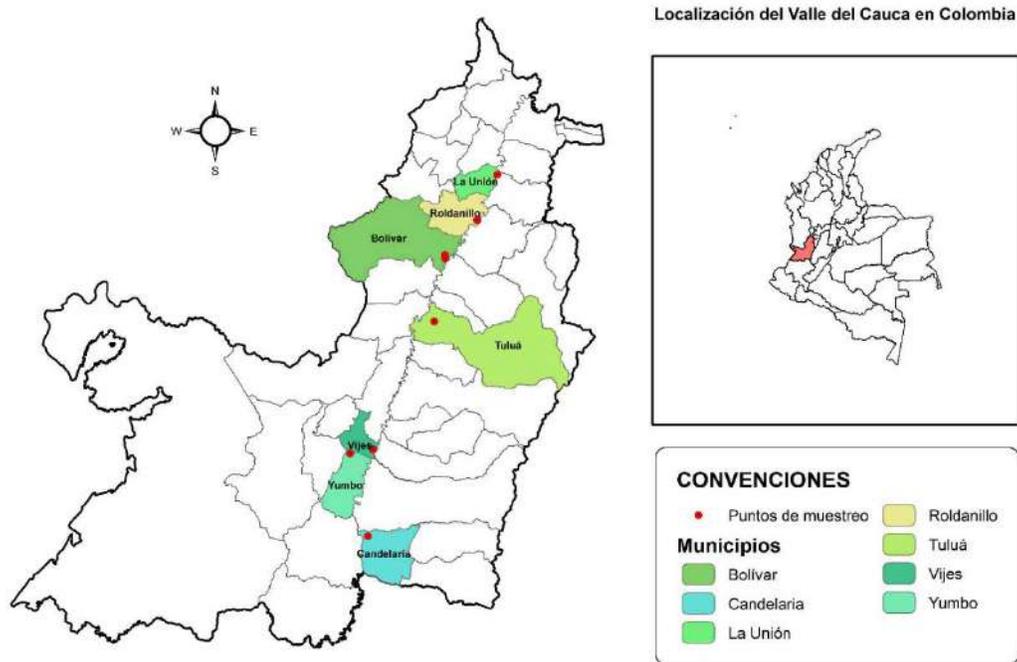


Figura 1. Localización geográfica de los puntos de muestreo de arvenses asociadas al cultivo de ají, con el fin de identificar hospederos alternos de los virus CMV-ají y PepSMoV, realizados en el Valle del Cauca, Colombia.

sede Palmira. Se utilizaron claves taxonómicas, se realizaron comparaciones con ejemplares del herbario y se corroboró la nomenclatura de cada especie, en la base de datos TROPICOS del Missouri Botanical Garden (<http://www.tropicos.org>).

**Extracción de ARN total.** El ARN total, se obtuvo empleando el reactivo TRIsure™ (Bioline), de acuerdo con las instrucciones del fabricante, a partir de 100 mg de tejido foliar deshidratado en sílica gel y molido, con N<sub>2</sub> líquido. La integridad del ácido nucleico, se verificó por electroforesis en geles de agarosa al 0,7 % (p/v), teñidos con bromuro de etidio (10 mg/mL), utilizando, como tampón, TAE 1X (tris-ácido acético-EDTA). En la electroforesis, se usó el marcador de peso molecular 1 kb DNA Ladder (New England Biolabs INC) y se visualizó 1 µL del ARN total. Los geles de agarosa, se revelaron en el transiluminador ChemiDoc™ XRS (BioRad™) y se fotografiaron con el Software Quantity One - 4.6.5.

**Síntesis de ADNc.** Una vez aislado el ARN total, se realizó la síntesis de ADN complementario (ADNc), mediante la reacción en cadena de la polimerasa con transcriptasa inversa (*Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction*, RT-PCR, por sus siglas en inglés). Para la reacción de RT-PCR, se empleó el Kit *RevertAid RT Reverse Transcription* (Thermo Scientific™), utilizando hexámeros al azar, en un volumen final de 20 µL, de acuerdo con el protocolo descrito por el fabricante. Cada reacción contenía: 0,5 µg de ARN, hexámeros al azar, buffer 5X, inhibidor de ARNasas RiboLock, 10mM de los cuatro dNTPs y 200 U de la enzima transcriptasa inversa RevertAid.

**Amplificación de secuencias virales empleando RT-PCR.** Para la amplificación de la secuencia de CMV, se utilizaron dos pares de cebadores: i) CMV-F (5'-CCT-CCG-CGG-ATG-CTA-ACT-T-3') y

CMV-R (5'-CGG-AAT-CAG-ACT-GGG-AGC-A-3'), descritos por Herrera-Vásquez *et al.* (2009), que amplifican un fragmento de 586 pb del gen CP (*Coat Protein*, CP); ii) CMV-Ají-F (5'-CTT-TAC-GAA-CTG-TCA-CCC-3') y CMV-Ají-R (5'-AAC-TAT-TAA-CCA-CCC-AAC-C-3'), cebadores específicos, diseñados por Rivera-Toro *et al.* (2020), para detectar la cuasiespecie CMV-ají aislado en plantas de ají y que amplifican un fragmento de 229 pb del gen CP.

Para determinar la presencia de potyvirus en las plantas arvenses, se empleó el par de cebadores Nib2F (5'-GTI-TGY-GTI-GAY-GAY-TTY-AAI-AA-3') y Nib3R (5'-TCI-ACI-ACI-GTI-GAI-GGY-TGN-CC-3'), descritos por Zheng *et al.* (2010), que amplifican una secuencia conservada de 350 pb de la región Nib (*Nuclear inclusion B*), del genoma potyviral. La detección específica de PepSMoV, se llevó a cabo con el par de cebadores Pep-F (5'-GTT-GGA-AAG-AAG-GTA-GTG-3') y Pep-R (5'-TGA-AGG-TAG-GTT-TCG-AGT-3'), descritos por Rivera-Toro *et al.* (2021) y que amplifican una secuencia de 289 pb de la región CP.

Las amplificaciones, se llevaron a cabo con el ADNc de las 121 plantas arvenses, utilizando la enzima ADN polimerasa OneTaq® (New England Biolabs), en los termocicladores T100 y C1000 (BioRad) y en un volumen final de 25 µL (1 µL de ADNc, buffer 1X, 200 µM de dNTPs, 0,2 µM de cada cebador, 1,25 U de ADN polimerasa OneTaq y agua Mili-Q).

Las condiciones de las PCR, se establecieron según lo descrito por los autores para cada par de cebadores (Herrera-Vásquez *et al.* 2009; Zheng *et al.* 2010; Rivera-Toro *et al.* 2020 y Rivera-Toro *et al.* 2021). Los fragmentos amplificados, se visualizaron por electroforesis en geles de agarosa al 0,8 % y 1 % (p/v); como marcador de peso molecular, se usó 1 kb DNA Ladder (New England Biolabs INC).

Los geles, se visualizaron en el transiluminador BioRad y el Software Quantity One - 4.6.5.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

121 arvenses fueron colectadas en nueve lotes de cultivo de ají (*Capsicum* spp.), localizados en siete municipios del Departamento del Valle del Cauca, Colombia: Bolívar (19 plantas), Candelaria (17),

La Unión (7), Roldanillo (25), Tuluá (38), Vijes (10) y Yumbo (5) (Figura 1). La mayoría de las muestras (113) fueron asintomáticas y solo 21 presentaron síntomas de infección viral: deformación en hojas, epinastia, clorosis o mosaicos dorados (Tabla 1; Figura 2c, 2j, 2i).

La presencia de virus CMV, CMV-ají, potyvirus y PepSMoV en las arvenses colectadas fue evaluada mediante RT-PCR. Los resultados de los ensayos moleculares en las 121 muestras de tejido

Tabla 1. Arvenses identificadas como reservorios de CMV-ají y PepSMoV en el Valle del Cauca.

Información de las arvenses				Cucumovirus		Potyvirus	
Especie	Familia	Municipio	Código	CMV <sup>1</sup> 586 pb	CMV-ají <sup>2</sup> 229 pb	Potyvirus <sup>3</sup> 350 pb	PepSMoV <sup>4</sup> 289 pb
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Roldanillo	AC1				+
<i>Macroptilium lathyroides</i>	Fabaceae	Roldanillo	AC5			+	+
<i>Partbenium hysterophorus</i>	Asteraceae	Roldanillo	AC6	+	+		+
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Roldanillo	AC8			+	+
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Roldanillo	AC9		+	+	+
<i>Macroptilium lathyroides</i>	Fabaceae	Roldanillo	AC10		+		
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Bolívar	AC15		+		+
<i>Bougainvillea glabra*</i>	Nyctaginaceae	Vijes	AC29	+	+		+
<i>Boerhavia erecta</i>	Nyctaginaceae	Vijes	AC31		+		+
<i>Capsicum rhomboideum</i>	Solanaceae	Yumbo	AC37	+	+		+
<i>Rivina humilis</i>	Phytolaccaceae	Roldanillo	AC57		+		+
<i>Amaranthus viridis</i>	Amaranthaceae	Roldanillo	AC65				+
<i>Rivina humilis</i>	Phytolaccaceae	Candelaria	AC72	+	+	+	+
<i>Desmodium intortum</i>	Fabaceae	Candelaria	AC73	+	+		
<i>Lantana cámara</i>	Verbenaceae	Candelaria	AC74	+	+	+	+
<i>Clitoria ternatea</i>	Fabaceae	Candelaria	AC78	+	+		+
<i>Desmodium intortum</i>	Fabaceae	Candelaria	AC79		+		+
<i>Commelina diffusa**</i>	Commelinaceae	Candelaria	AC80		+		
<i>Anoda acerifolia**</i>	Malvaceae	Candelaria	AC82		+		
<i>Anoda acerifolia**</i>	Malvaceae	Candelaria	AC83		+		
<i>Lantana cámara</i>	Verbenaceae	Candelaria	AC84				+
<i>Macroptilium lathyroides</i>	Fabaceae	Tuluá	AC87	+	+	+	+
<i>Rivina humilis</i>	Phytolaccaceae	Tuluá	AC88	+	+	+	+
<i>Solanum americanum***</i>	Solanaceae	Tuluá	AC95	+	+		
<i>Crotalaria incana</i>	Fabaceae	Tuluá	AC99				+
<i>Browallia americana</i>	Solanaceae	Tuluá	AC111	+	+	+	+
<i>Browallia americana</i>	Solanaceae	Tuluá	AC112	+	+	+	+
<i>Rivina humilis</i>	Phytolaccaceae	Tuluá	AC113		+		+
<i>Hippobroma longiflora</i>	Campanulaceae	Tuluá	AC116	+	+		
<i>Rivina humilis</i>	Phytolaccaceae	Tuluá	AC119	+	+	+	+
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Tuluá	AC121		+	+	+
<i>Desmodium tortuosum</i>	Fabaceae	Tuluá	AC122		+	+	+

<sup>1</sup>Herrera-Vásquez *et al.* (2009); <sup>2</sup>Rivera-Toro *et al.* (2020); <sup>3</sup>Zheng *et al.* (2010); <sup>4</sup>Rivera-Toro *et al.* (2021). Síntomas: \*Deformación en hojas \*\*Mosaicos dorados en hojas \*\*\*Epinastia.

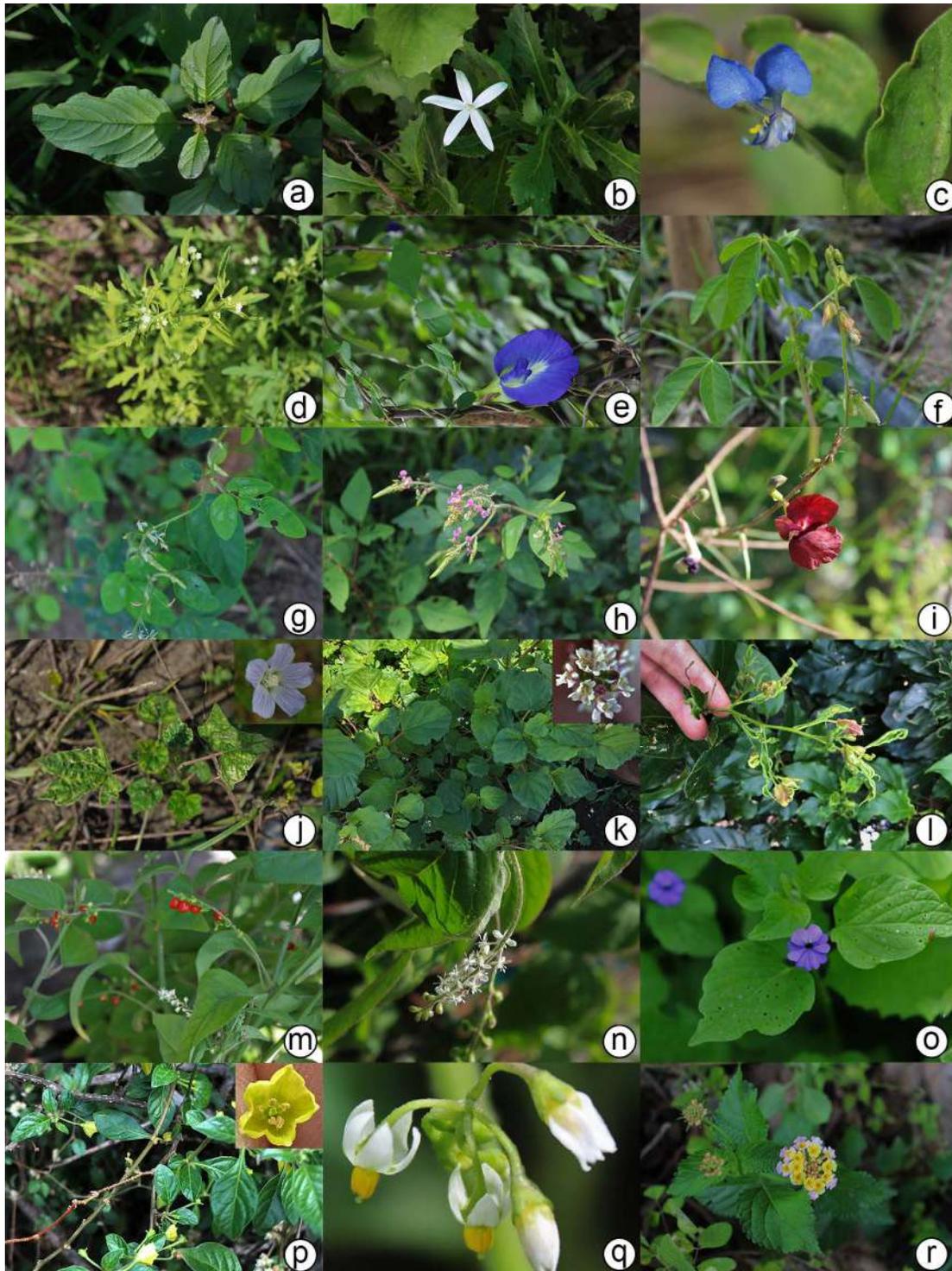


Figura 2. Arvenses asociadas al cultivo de ají, identificadas como reservorios de CMV-ají y PepSMoV, en el Valle del Cauca. a) *Amaranthus viridis* L.; b) *Hippobroma longiflora* (L.) G. Don; c) *Commelina diffusa* Burm. f.; d) *Parthenium hysterophorus* L.; e) *Clitoria ternatea* L.; f) *Crotalaria incana* L.; g) *Desmodium tortuosum* (Sw.) DC.; h) *Desmodium intortum* (Mill.) Urb.; i) *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb.; j) *Anoda acerifolia* Cav.; k) *Boerhavia erecta* L.; l) *Bougainvillea glabra* Choisy; m-n) *Rivina humilis* L.; o) *Browallia americana* L.; p) *Capsicum rhomboideum* (Dunal) Kuntze; q) *Solanum americanum* Mill.; r) *Lantana camara* L.

foliar analizadas revelaron una incidencia del 21,5 %, para la cepa CMV-ají; del 20,6 %, para PepSMoV; del 11,6 %, para CMV y del 10,7 %, para potyvirus (Tabla 1, Figura 3, Figura 4). CMV-ají, se detectó en 26 plantas provenientes de los municipios de Bolívar (1/19), Candelaria (8/17), Roldanillo (4/25), Tuluá (10/38), Vijes

(2/10) y Yumbo (1/5), pero no se detectó en las muestras originarias del municipio de La Unión (0/7) (Tabla 1, Figura 1, Figura 5). Dentro de este grupo de plantas están especies de las familias Amaranthaceae, Campanulaceae, Commelinaceae, Compositae, Leguminosae, Malvaceae, Nyctaginaceae, Phytolaccaceae,

Solanaceae y Verbenaceae, destacándose, entre ellas, la familia Leguminosae, con 13 individuos y cinco especies. Asimismo, sobresalen las especies *D. tortuosum* y *R. humilis* por presentar el mayor número de individuos con virus (Tabla 1). Scholthof *et al.* (2011) y Lim *et al.* (2022) estiman que en el mundo hay más de 1.200 especies hospederas de CMV, pertenecientes a más de 100 familias botánicas monocotiledóneas y dicotiledóneas. Dentro de este grupo de plantas, *P. hysterophorus*, *S. americanum* (sinonimia *Solanum ptycanthum*) y *C. diffusa* han sido reportados previamente como hospederos de CMV (Hobbs *et al.* 2000; Ormeño N. & Sepúlveda R., 2005; Sacristán *et al.* 2004; Farreyrol *et al.* 2010; Jalender *et al.* 2017). De acuerdo con la bibliografía, *H. longiflora*, *C. ternatea*, *D. tortuosum*, *D. intortum*, *M. lathyroides*, *A. acerifolia*, *B. erecta*, *B. glabra*, *R. humilis*, *B. americana*, *C. rhomboideum* y *L.*

*camara* representarían nuevos reportes como hospederas de CMV (Tabla 1, Figura 2).

PepSMoV, se detectó en 25 plantas recolectadas en los municipios de Bolívar (1/19), Candelaria (5/17), Roldanillo (8/25), Tuluá (9/38), Vijes (1/10) y Yumbo (1/5) y, al igual que el virus CMV-ají, PepSMoV no se detectó en muestras provenientes del municipio de La Unión (Tabla 1, Figura 4 y Figura 5). Estas 25 plantas están distribuidas en 7 familias, 12 géneros y 13 especies: *A. viridis*, *P. hysterophorus*, *C. ternatea*, *D. tortuosum*, *D. intortum*, *M. lathyroides*, *C. incana*, *Boerhavia erecta*, *B. glabra*, *R. humilis*, *B. americana*, *C. rhomboideum* y *L. camara* (Figura 2). Estudios previos reportan la presencia de potyvirus en *Abutilon abutilastrum*, *Amaranthus viridis*, *Anoda cristata*, *Clitoria ternatea*, *Crotalaria*

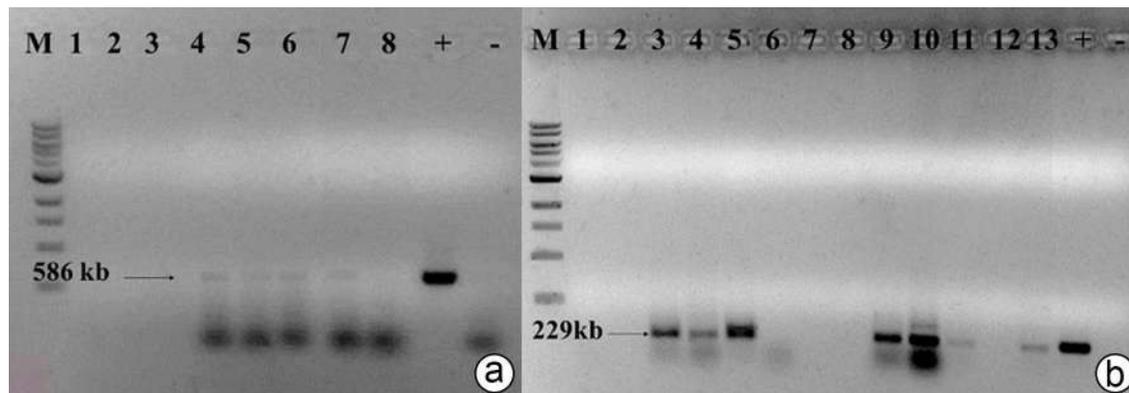


Figura 3. Detección viral del cucumovirus CMV por RT-PCR en arvenses asociadas al cultivo de ají, en el Valle del Cauca. a) Amplificación de un fragmento 586pb del gen de CP del virus CMV. 1) *Parthenium hysterophorus* (AC69), 2) *Lagascea mollis* (AC70), 3) *Ipomoea tiliacea* (AC71), 4) *Rivina humilis* (AC72), 5) *Desmodium intortum* (AC73), 6) *Lantana camara* (AC74.), 7) *Clitoria ternatea* (AC78), 8) *Lantana camara* (AC84). b) Amplificación por PCR de un fragmento de 229pb de la región CP del virus CMV-ají. 1) *Parthenium hysterophorus* (AC69), 2) *Lagascea mollis* (AC70), 3) *Rivina humilis* (AC72), 4) *Desmodium intortum* (AC73), 5) *Lantana camara* (AC74), 6) *Emilia sonchifolia* (AC75), 7) *Lagascea mollis* (AC76), 8) *Bidens pilosa* (AC77), 9) *Clitoria ternatea* (AC78), 10) *Desmodium intortum* (AC79), 11) *Commelina diffusa* (AC80), 12) *Ipomoea tiliacea* (AC81), 13) *Anoda acerifolia* (AC82). Visualizado en el gel de agarosa al 1%. M: Marcador de peso molecular 1kb DNA Ladder, (+) Control positivo ADN plasmídico, que porta un fragmento de CMV-ají; (-) control negativo.

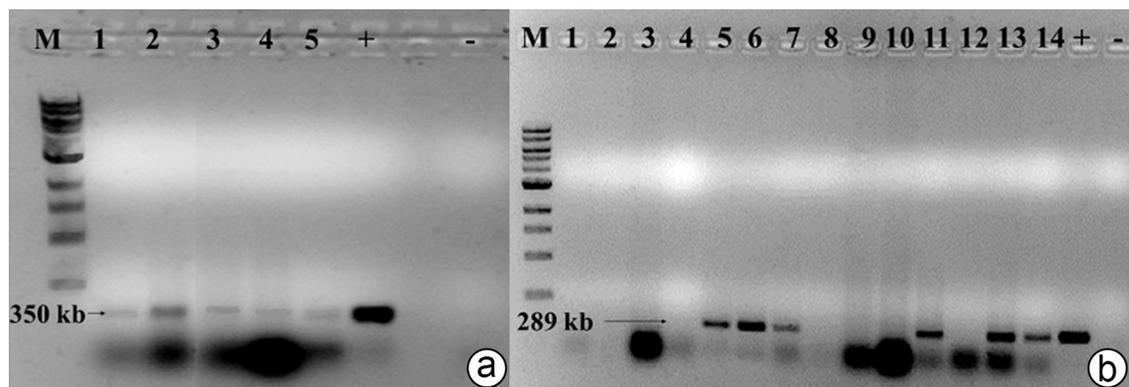


Figura 4. Detección del potyvirus PepSMoV por RT-PCR en arvenses asociadas al cultivo de ají .a) Amplificación de un fragmento de 350pb de la región NIb del genoma de los potyvirus. 1) *Macroptilium lathyroides* (AC87), 2) *Rivina humilis* (AC88), 3) *Browallia americana* (AC111), 4) *Rivina humilis* (AC119), 5) *Desmodium tortuosum* (AC122). b) Amplificación de un fragmento de 289pb de la región CP del virus PepSMoV. 1) *Cyanthillium cinereum* (AC107), 2) *Emilia sonchifolia* (AC108), 3) *Emilia sonchifolia* (AC109), 4) *Solanum americanum* (AC110), 5) *Browallia americana* (AC111), 6) *Browallia americana* (AC112), 7) *Rivina humilis* (AC113), 8) *Galinsoga parviflora* (AC115), 9) *Hippobroma longiflora* (AC116), 10) *Solanum americanum* (AC118), 11) *Rivina humilis* (AC119), 12) *Indigofera lespedezioides* (AC120), 13) *Desmodium tortuosum* (AC121), 14) *Desmodium tortuosum* (AC122). Visualizado en gel de agarosa al 1%. M: Marcador de peso molecular 1kb DNA Ladder. (+) Control positivo, ADN plasmídico que contiene un fragmento de PepSMoV (-) Control negativo.

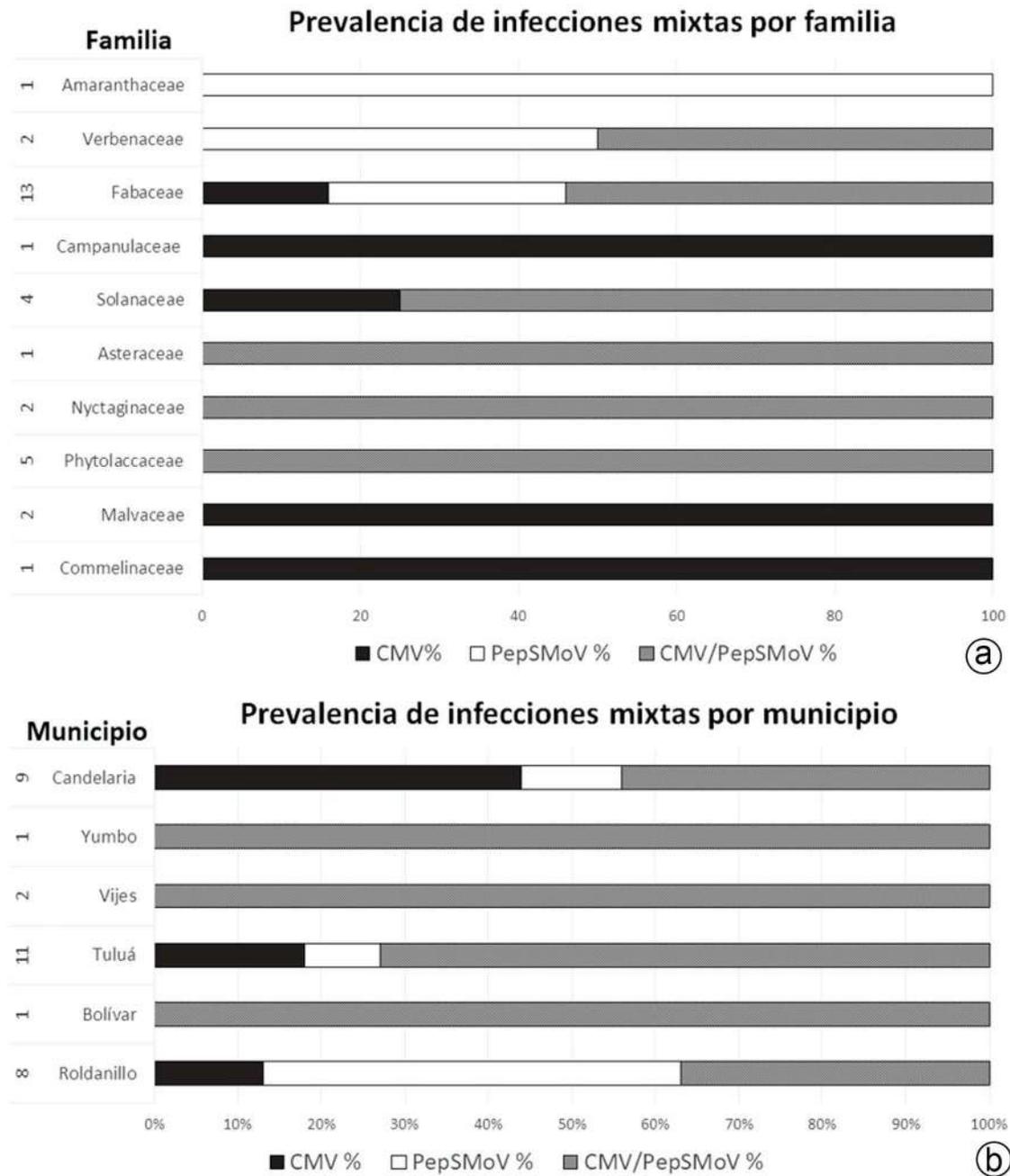


Figura 5. Prevalencia de infecciones mixtas de CMV y PepSMoV en arvenses asociadas al cultivo de ají, en Valle del Cauca. a) Por familia de arvense; b) Por municipio de colecta. En la columna de la izquierda, se muestra el número de muestras positivas para los virus CMV y PepSMoV.

*incana*, *Desmodium tortuosum*, *Solanum americanum* y *Solanum rostratum* (Spence & Walkey, 1995; Davis *et al.* 2002; Ormeño N. & Sepúlveda R., 2005; Segundo *et al.* 2007; Bermúdez-Guzmán *et al.* 2018; Sultana *et al.* 2019). En consecuencia, *P. hysterothorus*, *D. intortum*, *M. lathyroides*, *B. erecta*, *B. glabra*, *R. humilis*, *B. americana*, *C. rhomboideum* y *L. camara* representan nuevos reportes como hospederos de potyvirus (Tabla 1, Figura 2). Estas 13 especies representan los primeros reportes para Colombia y, a nivel mundial, de plantas silvestres hospederas de PepSMoV, un potyvirus reportado recientemente afectando cultivos de ají en Colombia (Rivera-Toro *et al.* 2021).

En cuanto a su distribución, los hallazgos presentados en este estudio comprueban que, tanto CMV-ají como PepSMoV, se encuentran ampliamente distribuidos en el departamento (Tabla 1, Figura 1 y Figura 5b).

Es importante señalar, que los virus PepSMoV (*Potyvirus*, familia *Potyviridae*) y CMV-ají (*Cucumovirus*, familia *Bromoviridae*) fueron aislados y caracterizados molecularmente en plantas de ají (*Capsicum* spp.), cultivadas a cielo abierto, en el departamento del Valle del ají (Rivera-Toro *et al.* 2020; 2021).

Apablaza *et al.* (2003) mencionan que las arvenses portadoras de virus sintomáticas y asintomáticas cumplen un rol importante en la propagación de los virus. En este estudio, los resultados muestran que el 84,4 % de las 32 plantas identificadas como hospederas de CMV-ají y PepSMoV fueron asintomáticas (Tabla 1). Los síntomas de infección viral (mosaicos dorados, deformación y enrollamiento en las hojas fueron observados en las arvenses *B. glabra* (AC29), *Commelina diffusa* (AC80), *Anoda acerifolia* (AC82 y AC83) y *S. americanum* (AC95) (Tabla 1; Figura 2c, 2j y 2i).

Los resultados de los análisis moleculares mostraron la presencia de infecciones mixtas de CMV-ají & PepSMoV, en 57 % (19/33), de las arvenses positivas a virus (Figura 5). El análisis de prevalencia de CMV-ají & PepSMoV por familia de arvense mostró que están distribuidas en 10 Familias, donde Fabaceae presentó la mayor cantidad de muestras positivas (7/13), seguido de Phytolaccaceae (5/5) (Figura 5a). La especie *Bougainvillea glabra* (Familia Nyctaginaceae) resultó positiva para CMV-ají & PepSMoV y mostró enrollamiento en sus hojas en el momento del muestreo (Figura 2i). Cuando se analiza la prevalencia de infecciones mixtas por municipio es preocupante encontrar que, en seis de siete municipios productores de ají, se identificaron arvenses que hospedaban ambos virus, CMV-ají & PepSMoV (Figura 5b).

En las plantas es común encontrar infecciones por uno o más virus y la variedad de síntomas observados en una infección mixta depende del tipo de interacción (sinergia, antagonismo o neutralismo), que se establece entre los virus coinfectantes (Mochizuki *et al.* 2016; Salánki *et al.* 2018). Varios autores, como Wang *et al.* (2002), Murphy & Bowen (2006) y Jaramillo Zapata *et al.* (2011) señalan que CMV tiene una relación sinérgica con los potyvirus. Asimismo, estos últimos, pueden interactuar de forma sinérgica con CMV y otros virus coinfectantes, favoreciendo el movimiento célula a célula, la acumulación de partículas virales, el acrecentamiento de los síntomas y la distribución del virus heterólogo (Mochizuki *et al.* 2016).

Los potyvirus (PepSMoV) y *cucumovirus* (CMV) son virus económicamente importantes en el sector agrícola, que usan como vector biológico de transmisión a los áfidos y su éxito adaptativo se explica por la diversidad genética de sus poblaciones (Adams *et al.* 2005; Revers & García, 2015; Jacquemond, 2012; Salánki *et al.* 2018). Hasta ahora, se han identificado más de 86 especies de áfidos transmisores de CMV, entre los cuales, se destacan *Myzus persicae* y *Aphis gossypii* (Hobbs *et al.* 2000; Jacquemond, 2012). Rivera-Toro *et al.* (2020) plantean que, posiblemente, CMV-ají (subgrupo IA) es transmitido con mayor frecuencia por *A. gossypii*, que por *M. persicae*. En el Valle del Cauca, la presencia de estas dos especies de áfidos, consideradas como vectores, se ha registrado en cultivos de ají en municipios en donde se han detectado los virus CMV-ají y PepSMoV (Gallo-Franco *et al.* 2019; Rivera-Toro *et al.* 2020; 2021); esto podría explicar la prevalencia de infecciones mixtas de CMV-ají & PepSMoV en las arvenses colectadas en los diferentes municipios de departamento del Valle del Cauca (Figura 5b). En *Parthenium hysterophorus* (AC9), un arvense que presentó infección mixta (Tabla 1), se observó la presencia de áfidos en campo durante la colecta, lo cual, indica que estos insectos están jugando un papel

importante en el movimiento de las partículas virales de CMV-ají & PepSMoV, entre el cultivo de ají y las arvenses aquí identificadas.

Dado que, en la actualidad, las interacciones entre CMV-ají & PepSMoV se desconocen, sería importante evaluar en futuros trabajos qué tipo de interacción - sinergismo, antagonismo o neutralismo - ocurre entre estos virus y qué consecuencias epidemiológicas podrían traer para el cultivo de ají.

**Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Este manuscrito es derivado del trabajo de grado “Detección y caracterización molecular de begomovirus, potyvirus y cucumovirus presentes en arvenses asociadas al cultivo de ají (*Capsicum* spp.) en el Valle del Cauca”. **Financiación:** Este estudio fue financiado con recursos del Sistema General de Regalías de Colombia (BPIN-2013000100007), Minciencias, Gobernación del Valle del Cauca, la Empresa Hugo Restrepo & Cía. S.A. y por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira (Proyecto con código Hermes, 41935).

## REFERENCIAS

- ADAMS, M.J.; ANTONIW, J.E.; FAUQUET, C.M. 2005. Molecular criteria for genus and species discrimination within the family *Potyviridae*. *Archives of Virology*. 150:459-479. <https://doi.org/10.1007/s00705-004-0440-6>
- APABLAZA, G.; APABLAZA, J.; REYES, P.; MOYA, E. 2003. Determinación de virosis e insectos vectores en malezas aledañas a cultivos hortícolas. *Ciencia e investigación agraria*. 30(3):175-186.
- BERMÚDEZ-GUZMÁN, M. DE J.; GUZMÁN-GONZÁLEZ, S.; LARA-REYNA, J.; PALMEROS-SUÁREZ, P.A.; LÓPEZ-MURAIRA, I.G.; GÓMEZ-LEYVA, J.F. 2018. Presencia de Papaya ringspot virus (PRSV) en arvenses asociadas a Carica papaya en Colima, México. *Revista mexicana de fitopatología*. 36(1):1-15. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-2>
- DAVIS, R.I.; THOMAS, J.E.; MCMICHAEL, L.A.; DIETZGEN, R.G.; CALLAGHAN, B.; JAMES, A.P.; GUMIA, T.G.; RAHAMMA, S. 2002. Plant virus surveys on the island of New Guinea and adjacent regions of northern Australia. *Australasian Plant Pathology*. 31:385-390. <https://doi.org/10.1071/AP02047>
- DUFFUS, J.E. 1971. Role of weeds in the incidence of virus diseases. *Annual Review of Phytopathology*. 9:319-340. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.09.090171.001535>
- FARREYROL, K.; GRISONI, M.; PEARSON, M.; RICHARD, A.; COHEN, D.; BECK, D. 2010. Genetic diversity of Cucumber mosaic virus infecting vanilla in French

- Polynesia and Réunion Island. Australasian Plant Pathology. 39:132-140.  
<https://doi.org/10.1071/AP09072>
7. GALLO-FRANCO, J.J.; DUQUE-GAMBOA, D.N.; TORO-PÉREA, N. 2019. Bacterial communities of *Aphis gossypii* and *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) from pepper crops (*Capsicum* sp.). Scientific Reports. 9:5766.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42232-8>
  8. HERRERA-VÁSQUEZ, J.A.; ALFARO-FERNÁNDEZ, A.; CÓRDOBA-SELLÉS, M.C.; CEBRIÁN, M.C.; FONT, M.I.; JORDÁ, C. 2009. First Report of Tomato torrado virus Infecting Tomato in Single and Mixed Infections with *Cucumber mosaic virus* in Panama. Plant Disease. 93(2):198.  
<https://doi.org/10.1094/PDIS-93-2-0198A>
  9. HOBBS, H.A.; EASTBURN, D.M.; D'ARCY, C.J.; KINDHART, J.D.; MASIUNAS, J.B.; VOEGTLIN, D.J.; WEINZIERL, R.A.; MCCOPPIN, N.K. 2000. Solanaceous weeds as possible sources of Cucumber mosaic virus in Southern Illinois for aphid transmission to Pepper. Plant Disease. 84(11):1221-1224.  
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.11.1221>
  10. JACQUEMOND, M. 2012. Chapter 13-Cucumber Mosaic Virus. En: Loebenstein, G.; Lecoq, H. (eds). Advances in Virus Research. Vol. 84. Academic Press. p.439-504.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394314-9.00013-0>
  11. JALENDER, P.; BHAT, B.N.; ANITHA, K.; VIJAYALAKSHMI, K. 2017. Survey for the Incidence of Cucumber Mosaic Virus in Tomato Growing Areas of Telangana and Andhra Pradesh. International Journal of Pure & Applied Bioscience. 5(4):2058-2063.  
<https://doi.org/10.18782/2320-7051.5763>
  12. JARAMILLO ZAPATA, M.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A.; COTES TORRES, J.M.; GONZÁLEZ JAIMES, E.P.; MARÍN MONTOYA, M. 2011. Detección de los Virus AMV, CMV y PLRV en cultivos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) en Antioquia, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 64(1):5831-5844.
  13. KENYON, L.; KUMAR, S.; TSAI, W.-S.; HUGHES, J. 2014. Chapter Six - Virus diseases of peppers (*Capsicum* spp.) and their control. En: Kielian, M.; Mettenleiter, T.C.; Roossinck, M.J. (eds.). Advances in Virus Research. Vol.90. Academic Press. p.297-354.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801246-8.00006-8>
  14. LIM, L.W.K.; HUNG, I.M.; CHUNG, H.H. 2022. Cucumber mosaic virus: Global genome comparison and beyond. Malaysian Journal of Microbiology. 18(1):79-92.  
<http://dx.doi.org/10.21161/mjm.211276>
  15. LÓPEZ-LÓPEZ, K.; CORREDOR-RODRÍGUEZ, A.; CORREA-FORERO, A.M.; ÁLVAREZ-RUBIANO, L.P.; SUAREZ-RODRÍGUEZ, A.; VACA-VACA, J.C. 2022. Detección molecular de begomovirus aislados de arvenses asociadas al cultivo de ají (*Capsicum* spp.) en el Valle del Cauca, Colombia. Acta Biológica Colombiana. 27(3):336-346.  
<https://doi.org/10.15446/abc.v27n3.89802>
  16. LÓPEZ-LÓPEZ, K.; JARA-TEJADA, F.; VACA-VACA, J.C. 2019. Caracterización molecular de un nuevo begomovirus aislado de cinco especies de arvenses colectadas en cultivos de tomate en Valle del Cauca. Acta Biológica Colombiana. 24(3):528-537.  
<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n3.79366>
  17. MOCHIZUKI, T.; NOBUHARA, S.; NISHIMURA, M.; M.; RYANG, B.-S.; NAOE, M.; MATSUMOTO, T.; KOSAKA, Y.; OHKI, S.T. 2016. The entry of cucumber mosaic virus into cucumber xylem is facilitated by coinfection with zucchini yellow mosaic virus. Archives of Virology. 161:2683-2692.  
<https://doi.org/10.1007/s00705-016-2970-0>
  18. MURPHY, J.F.; BOWEN, K.L. 2006. Synergistic disease in pepper caused by the mixed infection of *Cucumber mosaic virus* and *Pepper mottle virus*. Phytopathology. 96(3):240-247.  
<https://doi.org/10.1094/PHTO-96-0240>
  19. ORMEÑO N., J.; SEPÚLVEDA R., P. 2005. Presencia de diferentes virus de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en especies de malezas asociadas al cultivo. Agricultura Técnica. 65(4):343-355.  
<https://doi.org/10.4067/s0365-28072005000400001>
  20. PARISI, M.; ALIOTO, D.; TRIPODI, P. 2020. Overview of biotic stresses in pepper (*Capsicum* spp.): Sources of genetic resistance, molecular breeding and genomics. International Journal of Molecular Sciences. 21(7):2587.  
<https://doi.org/10.3390/ijms21072587>
  21. PINTO, C.M.F.; DOS-SANTOS, I.C.; DE ARAUJO, F.F.; DA-SILVA, T.P. 2016. Pepper Importance and Growth (*Capsicum* spp.). En: Do Rêgo, E.R.; Do Rêgo, M.M.; Finger, F.L. (eds.). Production and breeding of chilli peppers (*Capsicum* spp.). Springer, Cham (Switzerland). p.1-25.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-06532-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06532-8_1)
  22. PRAJAPAT, R.; MARWAL, A.; GAUR, R.K. 2014. Begomovirus associated with alternative host weeds: a critical appraisal. Archives of Phytopathology and Plant Protection. 47(2):157-170.  
<https://doi.org/10.1080/03235408.2013.805497>
  23. REVERS, F.; GARCÍA, J.A. 2015. Chapter three - Molecular biology of potyviruses. En: Maramorosch, K.; Mettenleiter,

- T.C. (eds.). *Advances in Virus Research*. Vol. 92. Academic Press (United States). p.101-199.  
<http://dx.doi.org/10.1016/bs.aivir.2014.11.006>
24. RIVERA-TORO, D.M.; LÓPEZ-LÓPEZ, K.; VACA-VACA, J.C. 2021. First molecular characterization of pepper severe mottle virus infecting chili pepper crops in Colombia. *Journal of Plant Pathology*. 103:321-325.  
<https://doi.org/10.1007/s42161-020-00735-8>
  25. RIVERA-TORO, D.M.; VACA-VACA, J.C.; LÓPEZ-LÓPEZ, K. 2020. Detection and molecular characterization of the *Cucumber mosaic virus* in chili pepper (*Capsicum* spp. L.) crops. *Agronomía Colombiana*. 38(2):279-286.  
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.82975>
  26. RODRÍGUEZ-NEGRETE, E.A.; MORALES-AGUILAR, J.J.; DOMÍNGUEZ-DURAN, G.; TORRES-DEVORA, G.; CAMACHO-BELTRÁN, E.; LEYVA-LÓPEZ, N.E.; VOLOUDAKIS, A.E.; BEJARANO, E.R.; MÉNDEZ-LOZANO, J. 2019. High-Throughput sequencing reveals differential begomovirus species diversity in non-cultivated plants in Northern-Pacific Mexico. *Viruses (Switzerland)*. 11(7):594.  
<https://doi.org/10.3390/v11070594>
  27. SACRISTÁN, S.; FRAILE, A.; GARCÍA-ARENAL, F. 2004. Population dynamics of Cucumber mosaic virus in melon crops and in weeds in Central Spain. *Phytopathology*. 94(9):992-998.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.9.992>
  28. SALÁNKI, K.; GELLÉRT, Á.; NEMES, K.; DIVÉKI, Z.; BALÁZS, E. 2018. Chapter Three-Molecular modeling for better understanding of cucumovirus pathology. En: Palukaitis, P.; Roossinck, M.J. (eds.). *Advances in Virus Research*. Vol. 102. p.59-88.  
<https://doi.org/10.1016/bs.aivir.2018.06.002>
  29. SCHOLTHOF, K.B.G.; ADKINS, S.; CZOSNEK, H.; PALUKAITIS, P.; JACQUOT, E.; HOHN, T.; HOHN, B.; SAUNDERS, K.; CANDRESSE, T.; AHLQUIST, P.; HEMENWAY, C.; FOSTER, G.D. 2011. Top 10 plant viruses in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*. 12(9):938-954.  
<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00752.x>
  30. SEGUNDO, E.; LESEMANN, D.E.; MARTÍN, G.; CARMONA, M.P.; RUIZ, L.; CUADRADO, I.M.; VELASCO, L.; JANSSEN, D. 2007. *Amaranthus leaf mottle virus*: 3'-end RNA sequence proves classification as distinct virus and reveals affinities within the genus *Potyvirus*. *European Journal of Plant Pathology*. 117:81-87.  
<https://doi.org/10.1007/s10658-006-9064-x>
  31. SPENCE, N.J.; WALKEY, D.G.A. 1995. Variation for pathogenicity among isolates of bean common mosaic virus in Africa and a reinterpretation of the genetic relationship between cultivars of *Phaseolus vulgaris* and pathotypes of BCMV. *Plant Pathology*. 44(3):527-546.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb01675.x>
  32. SULTANA, S.; ROY, B.; SHERPA, A.R. 2019. Natural occurrence of papaya ringspot virus in *Clitoria ternatea* in India. *Journal of Plant Pathology*. 101:183.  
<https://doi.org/10.1007/s42161-018-0128-5>
  33. VACA-VACA, J.C.; JARA-TEJADA, F.; LÓPEZ-LÓPEZ, K. 2020. Partial molecular characterization of begomoviruses isolated from weeds collected in tomato crops in the southeast of Valle del Cauca, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 14(1):115-124.  
<https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i1.10434>
  34. VACA-VACA, J.C.; MORALES-EUSE, J.; RIVERA-TORO, D.M.; LÓPEZ-LÓPEZ, K. 2019. Primer reporte de begomovirus infectando cultivos de ají (*Capsicum* spp.) en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. 24(3):452-462.  
<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n3.79367>
  35. WANG, Y.; GABA, V.; YANG, J.; PALUKAITIS, P.; GALON, A. 2002. Characterization of synergy between Cucumber mosaic virus and potyviruses in cucurbit hosts. *Phytopathology*. 92(1):51-58.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.1.51>
  36. WISLER, G.C.; NORRIS, R.F. 2005. Interactions between weeds and cultivated plants as related to management of plant pathogens. *Weed Science*. 53(6):914-917.  
<https://doi.org/10.1614/ws-04-051r.1>
  37. ZHENG, L.; RODONIN, B.C.; GIBBS, M.J.; GIBBS, A.J. 2010. A novel pair of universal primers for the detection of potyviruses. *Plant Pathology*. 59(2):211-220.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02201.x>



# Prevalencia de virus de ARN en tubérculos-semilla certificados de *Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro de la sabana Cundiboyacense

## Prevalence of RNA viruses in certified seed-tubers of *Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro from the highlands of Cundinamarca and Boyacá

Andrea García-Torres<sup>1</sup> ; Mónica Higueta-Valencia<sup>1</sup> ; Yuliana Gallo-García<sup>2</sup> ; Rodrigo Hoyos<sup>3</sup> ; Pablo Gutiérrez<sup>1</sup> ; Mauricio Marín<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Microbiología Industrial. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: asgarciat@unal.edu.co; mmhiguita@unal.edu.co; paguties@unal.edu.co

<sup>2</sup>Universidad CES, Facultad de Medicina, Grupo de investigación Ciencias Básicas. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: ygallo@ces.edu.co

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Laboratorio de Biotecnología Vegetal. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: rhoyos@unal.edu.co

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Biología Celular y Molecular. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: mamarinm@unal.edu.co

\*autor de correspondencia: mamarinm@unal.edu.co

**Cómo citar:** García-Torres, A.; Higueta-Valencia, M.; Gallo-García, Y.; Hoyos, R.; Gutiérrez, P.; Marín, M. 2022. Prevalencia de virus de ARN en tubérculos-semilla certificados de *Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro de la sabana Cundiboyacense. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2151. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2151>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** noviembre 8 de 2021 **Aceptado:** noviembre 16 de 2022 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum*) Diacol Capiro es uno de los cultivares con mayor producción y consumo interno en Colombia, siendo los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, los principales productores. Este cultivo, se ve afectado por un complejo de virus, que disminuye la calidad de los tubérculos y los rendimientos. En este trabajo, se evaluó la prevalencia de los virus de ARN: PLRV, PVY, PVX, PVS, PVV, PYVV, PMTV y PVB, en brotes de tubérculos-semilla certificados, provenientes de la sabana Cundiboyacense, mediante RT-qPCR. Los resultados revelan la ocurrencia de siete de los ocho virus en las muestras, con niveles de infección de 100 % (PVS, PVX y PYVV), 75 % (PLRV), 50 % (PVY), 37,5 % (PMTV) y 12,5 % (PVB). Adicionalmente, con el fin de obtener información de los genomas de los virus detectados, se utilizó secuenciación de alto rendimiento (HTS), de una muestra compuesta (*bulk*) de brotes, siendo posible obtener el genoma completo del PLRV y el genoma parcial del PVY. Los

análisis filogenéticos realizados con dichas secuencias ubicaron a los virus PLRV y PVY en clados, conformados por aislamientos colombianos, con niveles de identidad superiores al 97 %. Estos hallazgos evidencian la necesidad de fortalecer los programas de certificación de tubérculos-semilla de papa en el país, mediante la utilización de pruebas moleculares de detección viral.

Palabras clave: Detección de virus; RT-qPCR; Secuenciación de alto rendimiento; Semilla de papa; Virus de plantas.

### ABSTRACT

Diacol-Capiro is one of the most important potato (*Solanum tuberosum*) cultivars in Colombia with most production concentrated in the provinces of Cundinamarca and Boyacá. Unfortunately, this crop is seriously affected by several viruses that compromise the quality of tubers and yields. In this work, it was evaluated the prevalence of the RNA viruses: PLRV, PVY, PVX,

PVS, PVV, PYVV, PMTV, and PVB in certified tuber-seed sprouts produced in the highlands of Cundinamarca and Boyacá by RT-qPCR. Results revealed a prevalence of 100 % for PVS, PVX, and PYVV; 75 % for PLRV, 50 % for PVY, 37.5 % for PMTV, and 12.5 % for PVB. Additionally, high-throughput sequencing from a sprout's bulk sample was used to gather genomic information of infecting viruses, which resulted in a partial PVY sequence, and a complete PLRV genome. Phylogenetic analysis revealed that both assemblies cluster within clades comprising other Colombian isolates with more than 97 % nucleotide sequence identity. These findings highlight the need to update potato seed-tuber certification programs in Colombia with the implementation of more sensitive molecular tests.

Keywords: High-throughput sequencing; Plant viruses; Potato seed; RT-qPCR; Virus detection.

## INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es considerada como el cuarto cultivo alimenticio más importante, a nivel mundial, debido a que sus tubérculos poseen excelentes propiedades nutritivas (FAO, 2008), al ser fuente de carbohidratos, fibras, antioxidantes, proteínas, vitaminas y minerales (Burlingame *et al.* 2009). En Colombia, este cultivo se localiza en las zonas altas (> 2000 m s.n.m.) de las tres cordilleras, comprendiendo un área de 128.222 ha y un rendimiento promedio de 21 t ha<sup>-1</sup>. Cerca del 90 % de la producción de papa, se concentra en los departamentos de Cundinamarca (37 %), Boyacá (27 %), Nariño (20 %) y Antioquia (6 %), con unas 100 mil familias, dedicadas a este cultivo, como fuente principal de ingresos (MADR, 2020).

La susceptibilidad a plagas y enfermedades del cultivo de la papa y, en particular, las enfermedades de origen viral, generan grandes pérdidas en su producción, pues ocasionan reducciones significativas en los rendimientos y en el valor comercial de los tubérculos (Fedepapa, 2019; Kreuze *et al.* 2020). En el mundo, se han reportado alrededor de 53 especies de virus infectando a la papa, entre los que se destacan: Potato virus B (PVB), Potato virus S (PVS), Potato virus V (PVV), Potato yellow vein virus (PYVV), Potato mop-top virus (PMTV), Potato virus Y (PVY), Potato leafroll virus (PLRV) y Potato virus X (PVX); éstos tres últimos virus son los más restrictivos para los sistemas de producción de papa, a nivel mundial (Salazar, 2006; Chikh Ali *et al.* 2008; Kerlan, 2009; Kreuze *et al.* 2020). El PVY puede causar deterioro de los tubérculos (por ejemplo, anillos necróticos) y del tejido foliar, reduciendo los rendimientos en niveles del 40 al 70 % (Nolte *et al.* 2004); respecto a PLRV, se ha reportado que altos índices de prevalencia pueden ocasionar pérdidas del 50 al 100 % (Kerlan, 2009); para el caso de la infección por PVX, se han registrado reducciones del 15 al 20 % (Cox & Jones, 2010). PVX genera sinergismo con PVY, PVA y PVS, cuyas coinfecciones se manifiestan por mosaicos rugosos severos y reducciones en la producción de tubérculos superiores al 50 % (Beemster & Bokx, 1987; Hameed *et al.* 2014).

En Colombia, para el manejo de enfermedades virales, se utiliza semilla certificada, la que se genera en dos fases: la inicial, se realiza en laboratorio, invernadero o casa malla, para la producción de semilla súper élite y élite, siendo la primera, derivada de plantas *in vitro*, que se presumen están libres de virus; la segunda fase, se lleva a cabo en campo e incluye la producción de semilla básica, registrada y certificada (ICA, 2015).

A pesar de la importancia del cultivo de papa en Colombia existen deficiencias en las metodologías de detección viral, utilizadas en los procesos de certificación del material de siembra, pues, usualmente, se fundamentan solo en la observación de síntomas en campo de los lotes destinados a producción de semilla y, eventualmente, en el uso de pruebas de ELISA, para algunos virus (ICA, 2015). El presente trabajo tuvo como principal objetivo evaluar la prevalencia de ocho virus de ARN en material de siembra certificado de papa (*Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro), procedente de la sabana Cundiboyacense, utilizando pruebas de RT-PCR, en tiempo real (RT-qPCR). También, se obtuvo información sobre los genomas de algunos de los virus, detectados mediante análisis bioinformáticos de las secuencias obtenidas por secuenciación de alto rendimiento (HTS).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Material vegetal.** Las muestras de tubérculos-semilla de papa cv. Diacol Capiro certificados (8 lotes), se obtuvieron en los municipios de Zipaquirá (Cundinamarca) (2 lotes) (5°1'17,4" N, 73°59'27,59" W), Sotaquirá (4 lotes) (5°45'56,16" N, 73°14'50,64" W) y Ventaquemada (2 lotes) (5°22'0,12" N, 73.31'15,6" W) (Boyacá); además, con fines comparativos, se emplearon tres lotes de tubérculos-semilla no certificados, procedentes de los municipios de Villapinzón (5°12'54,72" N, 73°35'40,56" W) (2 lotes) (Cundinamarca) y Sotaquirá (1 lote) (Boyacá). Cada lote de semilla consistió en 10 a 15 tubérculos tomados al azar, que fueron sumergidos en una solución de 50 ppm de ácido giberélico (Sigma-Aldrich, EEUU), para inducir su brotación y luego fueron almacenados en oscuridad, a temperatura ambiente, durante 15 a 20 días. Posteriormente, para la extracción de los ácidos nucleicos, se realizaron mezclas al azar de brotes de 2 cm, recolectados en los tubérculos de cada lote de semilla evaluado (Gallo García *et al.* 2019; García *et al.* 2022).

**Detección de virus por RT-qPCR.** La extracción del ARN total, se realizó a partir de 100 mg de la mezcla de brotes de cada lote de semilla, con el kit GeneJET Plant RNA Purification Mini (Thermo Fisher Scientific, EEUU), previa maceración con nitrógeno líquido y elución en 40 µL de agua tratada con Dietilpirocarbonato (DEPC); la pureza y la concentración del ARN extraído, se determinó por lecturas a 260 nm y 280 nm, en un equipo Nanodrop 2000C (Thermo Fisher Scientific, EEUU). Luego, se sintetizó el ADNc, a través de una reacción de retro-transcripción en 20 µL de volumen, incubándose en un termociclador T3 (Biometra, Alemania), a 65 °C por 5 min, seguido de 42 °C por 1 h y, por último, 70 °C por 10 min, para desnaturalizar la enzima. En las reacciones de ADNc, se utilizaron 200U de la enzima RevertAid Reverse Transcriptase (RT) (Thermo Fisher Scientific, EEUU), 1X de buffer RT, 0,5mM

de dNTPs, 100 pmol de cada cebador reverso (Oligo-dt, 123end, PYVV\_R\_CP y PLRV\_R) (Tabla 1), 20U de inhibidor de ARNasas Ribolock (Thermo Fisher Scientific, EEUU) y 100 ng de ARN total (Sierra *et al.* 2021; García *et al.* 2022).

El ADNc sintetizado fue empleado como molde para la amplificación, mediante PCR en tiempo real (qPCR), en un volumen final de 14  $\mu$ L, conteniendo 6,25  $\mu$ L del kit Maxima SYBR Green/ROX Master Mix (2X) (Thermo Fisher Scientific, EEUU),

Tabla 1. Secuencias de los cebadores empleados en RT-qPCR para la detección de virus en papa cv. Diacol Capiro.

Virus	Primers	Secuencias	Referencia
PVY	PVY_Col_RV2	5' GCA TAC TTG GAG ARA CAT CYT CG 3'	García <i>et al.</i> (2022)
	PVY_Col_qFV2	5' TCG GAT TGG AYG GYG GCA T 3'	
PVV	qPVV_phu_R	5' CAT CCC GCT CCT CAA C 3'	Álvarez Yepes <i>et al.</i> (2016)
	PVV_phu_F	5' ATG CTG GAA AAG ATC CAG C 3'	
PVX	PVX_101-2_RP	5' GCT TCA GAC GGT GGC CG 3'	Agindotan <i>et al.</i> (2007)
	PVX_101-2_FP	5' AAG CCT GAG CAC AAA TTC GC 3'	
PVS	PVS_gen_RV2	5' ATT GRA ANC CCA TRG CTT GC 3'	García <i>et al.</i> (2022)
	qPVS_gen_F	5' CGG GRY TGA GRA ARG TGT G 3'	
PLRV	PLRV-Antisense	5' TTG AAT GCC GGA CAG TCT GA 3'	Yang <i>et al.</i> (2014)
	PLRV-sense	5' GCT CAA GCG AGA CAT TCG TG 3'	
	PLRV-R	5' GCA ATG GGG GTC CAA CTC CAA CTC AT 3'	Singh <i>et al.</i> (1995)
PYVV	qPYVV_R_CP	5' AGG TCT CAG GAT CTG GAT CAA CT 3'	Álvarez-Yepes <i>et al.</i> (2017)
	PYVV_F_CP	5' TCA GGT TAG AGC AGA CAG AGG 3'	
	PYVV_R_CP	5' AGT TGC TGC ATT CTT GAA CAG G 3'	
PMTV	PMTV-1948F	5' GTG ATC AGA TCC GCG TCC TT 3'	Mumford <i>et al.</i> (2000)
	PMTV-2017R	5' CCA CTG CAA AAG AAC CGA TTT C 3'	
	123-end	5' GTG AAC CAC GGT TTA RCC CTG KAA GC 3'	Savenkov <i>et al.</i> (1999)
PVB	Neponew_pol_F	5' TCG GCA CAA ACC CCT ATT CC 3'	García <i>et al.</i> (2022)
	Neponew_qpol_R	5' TCA ATA GAC CAT CGA ACC CAC T 3'	

4  $\mu$ L de agua estéril tratada con DEPC, 50-100 ng de ADNc y 0,3  $\mu$ M de los cebadores específicos para cada virus (Tabla 1). Las reacciones de RT-qPCR, se realizaron en un equipo Rotor-Gene Q-5plex Platform (Qiagen, Alemania). El programa consistió en 95  $^{\circ}$ C por 10 min, para la activación de la *Taq* polimerasa, seguido de 35 ciclos de 15 s a 95  $^{\circ}$ C y 60 s a 52  $^{\circ}$ C. Al finalizar las reacciones, se obtuvieron los valores del ciclo umbral (Ct) y temperatura de fusión (Tm), en el rango 50-99  $^{\circ}$ C. Las muestras que superaron el valor basal de fluorescencia antes del ciclo 35 y presentaron valores de Tm en el rango esperado, fueron consideradas como positivas (Gallo García *et al.* 2019; García *et al.* 2022). En todas las reacciones, se incluyó un control positivo y un control negativo, procedentes de tejidos foliares infectados o libres de cada virus evaluado.

**Secuenciación de alto rendimiento (HTS).** Con el fin de obtener secuencias de algunos de los genomas de los virus encontrados en los tubérculos-semilla de papa cv. Diacol Capiro certificados, se realizó una secuenciación de alto rendimiento del transcriptoma de una muestra compuesta (*bulk*), derivada de los ARN extraídos de los brotes de todas las muestras. La librería de ADNc, se construyó con el kit TruSeq Stranded Total RNA LT Sample Prep (Illumina, EEUU), con eliminación del ARN ribosomal, utilizando Ribozero (Illumina, EEUU) (Sierra *et al.* 2021; García *et al.* 2022); la secuenciación masiva, se realizó en un equipo Illumina Novaseq de la compañía Macrogen (Corea del Sur). Una vez obtenidas las secuencias, se determinó su calidad con el programa FastQC,

verificando que no se presentarían bases de baja calidad (Phred <30). La identificación preliminar viral fue realizada con el software Plant Virus Detection Platform, disponible en Internet en: <https://biotecnologiamicrobianaunalmed.github.io/Plant-Virus-Detection-Pipeline> (Gutiérrez *et al.* 2021). Posteriormente, se procedió al ensamblaje *de novo* de contigs con rnaSPAdes (Bushmanova *et al.* 2019). Los *contigs* correspondientes a genomas virales se identificaron mediante BlastN contra una base de genomas reportados en GenBank (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Los virus identificados, se verificaron y se ensamblaron por mapeo, utilizando la herramienta MagicBLAST (<https://ncbi.github.io/magicblast/>). Los alineamientos resultantes, se visualizaron con el programa Tablet (Milne *et al.* 2010), obteniendo las secuencias consenso para cada virus y, posteriormente, se identificaron los marcos abiertos de lectura (ORFs), con ORF finder (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/orffinder/>) y BlastX (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Los análisis filogenéticos, se realizaron comparando las secuencias obtenidas mediante HTS con secuencias de referencia, disponibles en la base de datos del GenBank y realizando un alineamiento con la herramienta Muscle del Software Mega-X (Kumar *et al.* 2018). Posteriormente, se construyeron los árboles filogenéticos, mediante el método de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*), con los modelos Tamura-Nei model (PVY) y General Time Reversible model (PLRV), y 1000 réplicas de *bootstrap*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Detección de virus por RT-qPCR.** Las muestras presentaron siete de los ocho virus evaluados, siendo los virus de mayor prevalencia: PVS (100 %), PVX (100 %) y PYVV (100 %), seguidos por PLRV (75 %), PVY (50 %), PMTV (37,5 %) y PVB (12,5 %); PVV no fue detectado en ninguna de las muestras en estudio (Figura 1a). Al compararse estos resultados con las muestras derivadas de tubérculos-semilla no certificados, se destaca que los virus PVS y

PVX fueron encontrados en la totalidad de muestras certificadas, pero solo en dos de los tres controles no certificados; lo contrario, se observó para los virus PVY y PLRV, pues sus niveles de detección fueron menores en los tubérculos certificados (PVY: 50 %; PLRV: 75 %), que en los controles no certificados (PVY: 66,7 %; PLRV: 100 %). El PYVV fue detectado en todas las muestras certificadas y no certificadas. Por último, el PMTV presentó niveles similares de detección en ambos materiales (Figura 1a).

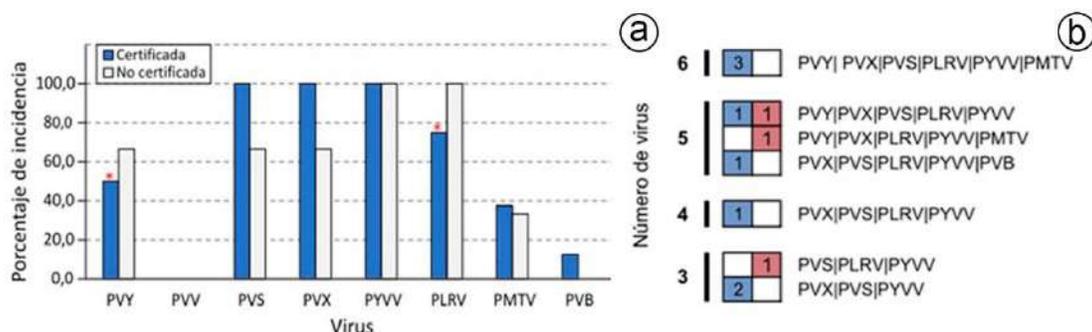


Figura 1. Detección de virus por RT-qPCR en tubérculos-semilla certificados de papa cv. Diacol Capiro, de la sabana Cundiboyacense. a) Gráfica de barras indicando la proporción de virus con resultados positivos en brotes de tubérculos certificados (azul), en comparación con controles de semillas no certificados (gris). Los asteriscos indican los virus detectados en menor proporción en los tubérculos certificados. b) Coinfecciones virales en tubérculos-semilla certificados de papa cv. Diacol Capiro, de la sabana Cundiboyacense. El rango de virus detectados en lotes de tubérculos certificados (azul) fue de tres a seis. Para las muestras no certificadas, empleadas con fines comparativos, el número total de virus osciló entre tres y cinco (rojo).

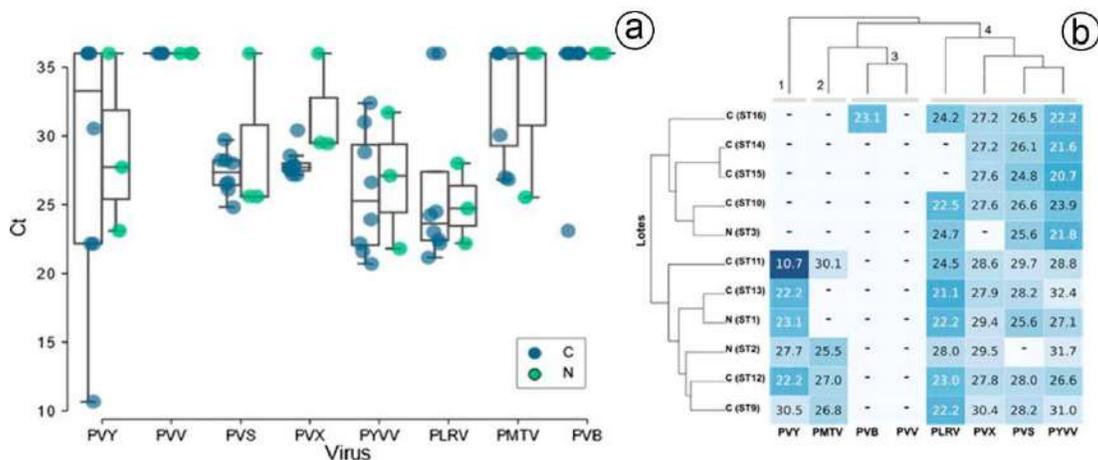


Figura 2. Distribución de los valores de Ct para todos los virus analizados en tubérculos-semilla certificados de papa cv. Diacol Capiro, de la sabana Cundiboyacense. a) Gráfico de cajas ilustrando los valores de Ct para las muestras individuales; cada punto representa un lote de tubérculo-semilla. b) Mapa de calor indicando los valores Ct para cada lote de semilla. La prevalencia de virus, se caracterizó por cuatro grupos: (4) PVS, PVX, PYVV y PLRV, son virus de alta prevalencia en las muestras; (3) PVB y PVV, son los virus con menor nivel de detección o ausentes en los tubérculos-semilla, seguidos por PVY (1) y PMTV (2). Nótese que no se presentó diferenciación de clados entre los materiales certificados y los tres controles no certificados utilizados, con fines comparativos. Las muestras, se representan con C (certificadas) y N (no certificadas).

El virus que presentó mayor carga, definida en términos de valores de Ct, fue PVY (Figura 2a), al presentar un valor promedio de 21,4 (SD=8,1) e, incluso, una de las muestras certificadas presentó un valor de Ct muy bajo (10,7); para los virus PVS, PVX, PLRV, PYVV, PMTV y PVB, los valores promedios de Ct fueron de 27,3

(SD=1,5), 28 (SD=1,1), 22,9 (SD=1,3), 25,9 (SD=4,5), 27,9 (SD=1,8) y 23,1 (SD=0), respectivamente. El promedio de valores de Tm para las muestras que resultaron positivas para los diferentes virus evaluados fue de  $79,0 \pm 0,8$  °C (PVY),  $78,4 \pm 1,9$  °C (PVS),  $83,8 \pm 0,4$  °C (PVX),  $78,8 \pm 0,6$  °C (PLRV),  $81,0 \pm 2,5$  °C (PYVV),

80,9 ± 0,5 °C (PMTV) y 78 °C (PVB). En los controles positivos utilizados en el estudio se amplificaron las regiones objetivo, con valores de Ct inferiores a 25 y de Tm, en los intervalos registrados previamente en el laboratorio.

**Análisis de coinfecciones.** Los tubérculos-semilla certificados presentaron diferentes tipos de coinfecciones virales, con un promedio de 4,7 virus por muestra. En dos lotes de semilla, se detectaron tres virus por muestra (PVX/PVS/PYVV), cuatro virus en un lote (PVX/PVS/PLRV/PYVV), cinco virus en dos lotes (PVX/PVS/PLRV/PYVV/PVB y PVY/PVX/PVS/PLRV/PYVV) y tres muestras presentaron la infección múltiple de seis virus (PVY/PVX/PVS/PLRV/PYVV/PMTV) (Figura 1b). En los controles no certificados, el promedio de virus por muestra fue de 4,3; dos muestras presentaron coinfección por cinco virus (PVY/PVX/PLRV/PYVV/PMTV y PVY/PVX/PVS/PLRV/PYVV) y el otro lote evaluado tuvo tres virus (PVS/PLRV/PYVV).

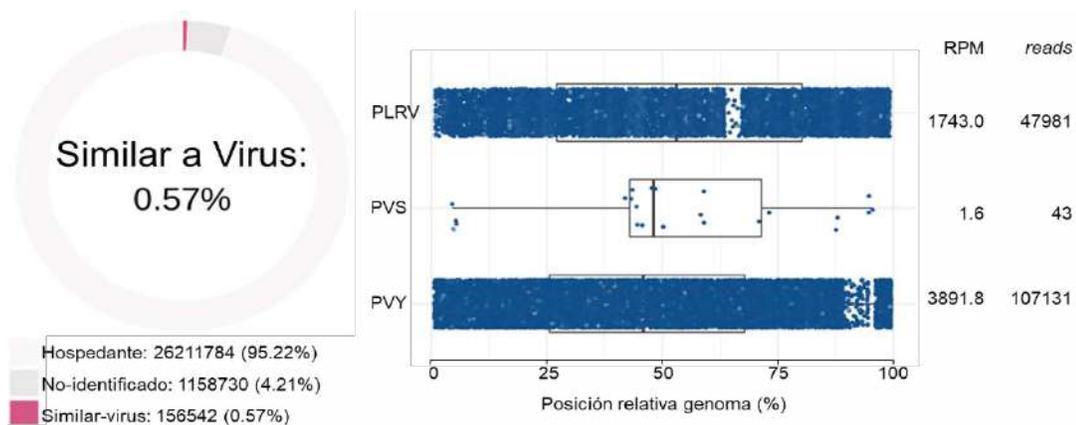


Figura 3. Análisis bioinformático de los datos de secuenciación HTS de virus en tubérculos-semilla certificados de papa cv. Diacol Capiro, de la sabana Cundiboyacense. El gráfico circular indica la proporción de lecturas virales (rosa) detectadas. La gráfica a la derecha ilustra la posición del mapeo de las lecturas a lo largo de cada segmento genómico de los virus detectados. Los virus dominantes en el set de datos fueron PLRV, PVY y PVS.

En términos generales, los resultados de este trabajo indicaron niveles muy altos de infección (> 37,5 %), en semilla certificada de papa cv. Diacol Capiro, procedente de la sabana Cundiboyacense, alcanzando, incluso, valores del 100 %, para los virus PYVV, PVX y PVS. El PVV fue el único virus no detectado en dichos materiales, lo que coincide con el hecho que este virus, hasta ahora, solo se ha encontrado en Colombia sobre cultivos de papa criolla (*S. phureja*), en el departamento de Antioquia (Riascos Chica *et al.* 2018).

La implementación de programas de certificación de tubérculos-semilla de papa es uno de los principales aspectos en los que se fundamenta el manejo de enfermedades virales en este y otros cultivos de propagación asexual (Frost *et al.* 2013). Desde el punto de vista fitosanitario, la certificación del material de siembra de papa tiene como objetivo principal limitar la degeneración de los tubérculos-semilla, dado el aumento progresivo de la carga viral, como resultado del uso sucesivo de dicho material, entre ciclos de siembra (Thomas-Sharma *et al.* 2016; Forbes *et al.* 2020). En Colombia, se estima que solo entre el 3 y 5 % del área cultivada con

**Secuenciación de alto rendimiento (HTS).** A partir de la secuenciación HTS del *bulk* de ARN de muestras, se encontraron 156.542 *reads* (0,57 % del total de las secuencias), asociados a genomas virales: PVY (107.131 *reads*; 99,4 % similitud), PLRV (47.981 *reads*; 98,8 % similitud) y PVS (43 *reads*; 97,8 % similitud). Las secuencias ensambladas a partir de los resultados de HTS, se utilizaron para la realización de análisis filogenéticos para los virus PVY y PLRV, con respecto a secuencias completas de genomas reportadas en el GenBank. Para el caso del PLRV, se presentó un porcentaje de identidad de 97 % con respecto a varios genomas de estos virus reportados sobre *S. tuberosum* del departamento de Antioquia (por ejemplo, MK613996 y KX712226), mientras que para PVY, la secuencia obtenida en los tubérculos de la sabana Cundiboyacense se situó en el clado correspondiente a la raza PVY<sup>NTN</sup>, presentando porcentajes de identidad del 99 %, con secuencias reportadas en Antioquia para diferentes aislamientos de esta raza (por ejemplo, MF176827 y MK563993) (Figura 3).

papa, se establece con semilla certificada (Fedepapa, 2017; 2019) y, adicionalmente, para el proceso de certificación solo se consideran evaluaciones de infecciones virales, a través de observaciones visuales de síntomas y, eventualmente, por pruebas de ELISA, para algunos de los virus (Guzmán-Barney *et al.* 2013; ICA, 2015; Gallo García *et al.* 2021; Sierra *et al.* 2021), lo que conduce a la subestimación de los niveles reales de infección de dicho material de siembra. En este sentido, dos trabajos recientes tendientes a evaluar la sanidad viral de los tubérculos-semilla del cultivar de papa Diacol Capiro utilizados en Antioquia, encontraron altos niveles de prevalencia de los virus PVY, PLRV, PYVV y PVS, con niveles que alcanzaron hasta el 70 %, para PYVV y 80 %, para PVY (Gallo García *et al.* 2021; Sierra *et al.* 2021). Más preocupante resulta la falta de diferencias en los niveles de prevalencia de virus entre los materiales certificados y no certificados y que, incluso, para un virus tan limitante en Colombia, como PYVV, Sierra *et al.* (2021) reportaron mayores niveles de infección (73,3 % vs 56,6 %) y menores valores de Ct (31,9 ± 3,5 vs 33,2 ± 3), en los materiales certificados. Dichos resultados son muy similares a los obtenidos en el presente

estudio sobre tubérculos-semilla, obtenidos directamente en la sabana Cundiboyacense, la principal región productora de material de siembra de papa en el país y plantean la necesidad urgente de revisar los programas de certificación en este cultivo, a partir de la utilización de técnicas de detección de virus altamente sensibles, como RT-qPCR y secuenciación HTS.

Adicional a los altos niveles de prevalencia de virus, en este trabajo, se identificaron coinfecciones en los materiales certificados con un promedio de 4,7 virus por muestra y casos externos, como la detección en tres lotes de semilla de la infección mixta de seis virus (PVY/PVX/PVS/PLRV/PYVV/PMTV); resultados similares han sido reportados por García *et al.* (2022), para tubérculos-semilla comercializados en Antioquia. En este caso, en muestras de semilla no certificada del cultivar Diacol Capiro, el promedio de coinfección fue de 4,6 virus por muestra, con un número mínimo de 4 y máximo de 6 virus, mientras que, en material certificado, el promedio de coinfección fue de 4 virus por muestra, con valores mínimos y máximos de 2 y 6 virus, respectivamente. Estos resultados, en su conjunto, aunque resultan muy alarmantes para la agroindustria de papa en Colombia, no son inesperados, por cuanto trabajos previos de detección de virus realizados directamente sobre material foliar de plantas de papa en estado de floración en Antioquia, han registrado niveles de infección del 88,9 %, para PVY, 75 %, para PVX y PYVV, 41,7 %, para PLRV y 25 %, para PVS (Gallo García *et al.* 2019).

Los altos niveles de infección viral de los materiales de siembra certificados del cultivar Diacol Capiro en Colombia pueden ser uno de los factores responsables de los bajos rendimientos de papa alcanzados en el país (21 t ha<sup>-1</sup>), si se comparan con los registrados en países, como Estados Unidos (49,02 t ha<sup>-1</sup>), Países Bajos (41,9 t ha<sup>-1</sup>) y Reino Unido (38,65 t ha<sup>-1</sup>), (FAOSTAT, 2018), incluso, son muy distantes al potencial productivo de 40 t ha<sup>-1</sup>, que se ha evaluado experimentalmente para este cultivar en Colombia (Ñustez, 2011; Porras Rodríguez & Herrera Heredia, 2015). En el mundo, diferentes estudios han demostrado que el uso de semilla de papa libre de virus puede conducir a aumentos en los rendimientos superiores al 30 % (Halterman *et al.* 2012; Frost *et al.* 2013; Thomas-Sharma *et al.* 2016) y que en combinación con otras prácticas de manejo, como el control de insectos vectores, eliminación de plantas “voluntarias” de papa y de arvenses hospedantes alternas de virus, además de procesos de selección positiva, exclusión temprana de plantas sintomáticas y sistemas efectivos de rotación de cultivos, pueden conducir a aumentos de rendimientos superiores al 70 % (Gildemacher *et al.* 2011; Schulte-Geldermann *et al.* 2012; Thomas-Sharma *et al.* 2016); un ejemplo de esto es Suiza, donde a partir de los años 1960, se logró un incremento del 70 % en los rendimientos por hectárea de papa, luego de establecer programas universales de siembra de semilla certificada y del establecimiento de otras medidas fitosanitarias, dirigidas a reducir la transmisión horizontal de virus (Schumpp *et al.* 2021).

Con el propósito de mejorar la calidad de tubérculos-semilla de papa en Colombia, los resultados del presente estudio y de otros recientes (Gallo García *et al.* 2021; Sierra *et al.* 2021; García *et al.*

2022), demuestran la necesidad de incorporar la detección de nuevos virus, como PMTV, PVV y PVB, en los procesos de certificación de semilla de papa del país y en la utilización de herramientas moleculares para su diagnóstico, entre las que se destacan, las derivadas de amplificación de ácidos nucleicos por PCR, como RT-PCR convencional y en tiempo real (RT-qPCR) e isotérmica, como RPA y LAMP (Nie & Singh, 2001; Xu *et al.* 2004; Raigond *et al.* 2020; Schumpp *et al.* 2021). Estas metodologías pueden ser complementadas con secuenciación HTS para monitorear los virus que circulan en los cultivos en diferentes regiones y épocas del año y para evaluar el estado fitosanitario de los materiales utilizados en las diferentes etapas del proceso de certificación de semilla (por ejemplo, súper élite, élite, básica, registrada). De esta forma, sería posible identificar rápidamente fenómenos de emergencia y re-emergencia de virus y de otros fitopatógenos, máxime cuando en los cultivos de papa del mundo se han reportado más de 50 especies de virus, cada uno, de los cuales, puede tener diferentes variantes genotípicas y razas (Marín Montoya & Gutiérrez Sánchez, 2016; Kreuze *et al.* 2020). En este sentido, en el presente estudio, mediante secuenciación HTS, se confirmó la circulación de tres de los virus detectados por RT-qPCR (PVY, PLRV y PVS), en el *bulk* del material de siembra evaluado, siendo posible, mediante análisis filogenéticos la identificación del PVY, como asociado a la raza necrosante PVY<sup>NTN</sup> (Gil *et al.* 2011; Henao-Díaz *et al.* 2013; Riascos Chica *et al.* 2018), considerada como la raza de mayor importancia económica de este virus, a nivel mundial, al inducir la enfermedad denominada *Potato tuber necrotic ringspot disease* (PTNRD) (Glais *et al.* 2005), mientras que la secuencia del genoma de PLRV, se ubicó en un clado, que contiene otros aislamientos del virus, previamente reportados, en cultivos de papa del país (Figura 4).

Se espera que los resultados de este trabajo sirvan de estímulo para que los gremios de productores, semilleristas, organismos de sanidad vegetal y centros de investigación emprendan con prontitud procesos que aumenten la calidad del material de siembra certificado de papa producido en el país y faciliten su distribución y utilización masiva, por parte de los agricultores de este cultivo.

**Agradecimientos.** Este trabajo fue financiado con recursos del Fondo de Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías del Departamento de Antioquia (Colombia), con el proyecto: #1101-805-62787 (Convenio #4600007658-779) y contó con la supervisión del Ministerio de Ciencia tecnología e Innovación de Colombia. Se agradece al personal técnico de la Federación Colombiana de productores de papa (Fedepapa), por su ayuda con la obtención de las muestras y al personal del laboratorio de Microbiología Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su apoyo durante el proceso de extracción de ácidos nucleicos. **Conflicto de interés:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Este artículo es derivado del trabajo de grado “Detección molecular y limpieza de virus en material de siembra de *Solanum tuberosum* y *S. phureja*” para optar al título de Magister en Ciencias – Biotecnología, del primer autor.

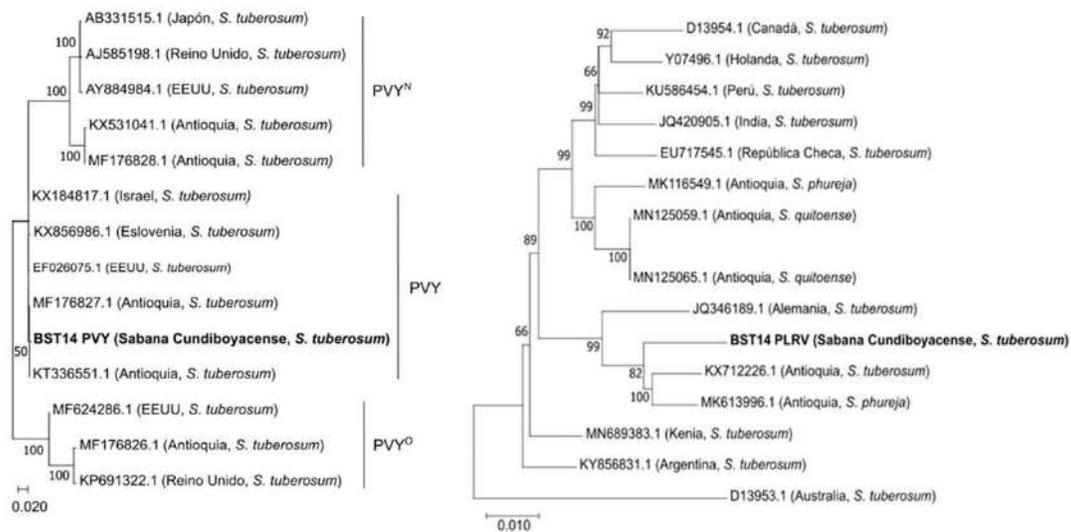


Figura 4. Árboles filogenéticos generados a partir de secuencias de genomas de PVY y PLRV, derivados de secuenciación masiva en tubérculos-semilla certificados de papa cv. Diacol Capiro, de la sabana Cundiboyacense. Los números sobre las ramas indican los valores de *bootstrap* y los nombres a la derecha indican las denominaciones registradas en la literatura para las razas de PVY. Las secuencias en negrita corresponden a las obtenidas de las muestras del presente estudio.

## REFERENCIAS

- AGINDOTAN, B.O.; SHIEL, P.J.; BERGER, P.H. 2007. Simultaneous detection of potato viruses, PLRV, PVA, PVX and PVY from dormant potato tubers by TaqMan® real-time RT-PCR. *Journal of Virological Methods*. 142(1-2):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2006.12.012>
- ÁLVAREZ YEPES, D.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A.; MARÍN MONTOYA, M. 2016. Caracterización molecular del *Potato virus V* (PVV) infectando *Solanum phureja* mediante secuenciación de nueva generación. *Acta Biológica Colombiana*. 21(3):521-531. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n3.54712>
- ÁLVAREZ-YEPES, D.; GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ, P.; MARÍN-MONTOYA, M. 2017. Secuenciación del genoma del *Potato yellow vein virus* (PYVV) y desarrollo de una prueba molecular para su detección. *Bioagro*. 29(1):3-14.
- BEEMSTER, A.B.R.; BOKX, J.A. 1987. Survey of properties and symptoms. En: Bokx, J.A.; Van der Want, J.P.H. (eds). *Viruses of potatoes and seed-potato production* (2ª ed.). Wageningen University (Netherlands). p.84-113.
- BURLINGAME, B.; MOUILLÉ, B.; CHARRONDIÈRE, R. 2009. Nutrients, bioactive non-nutrients and anti-nutrients in potatoes. *Journal of Food Composition and Analysis*. 22(6):494-502. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.09.001>
- BUSHMANOVA, E.; ANTIPOV, D.; LAPIDUS, A.; PRJIBELSKI, A.D. 2019. rnaSPAdes: a de novo transcriptome assembler and its application to RNA-Seq data. *GigaScience*. 8(9). <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz100>
- CHIKH ALI, M.; MAOKA, T.; NATSUAKI, K.T. 2008. The occurrence of potato viruses in Syria and the molecular detection and characterization of Syrian *Potato virus S* isolates. *Potato Research*. 51:151-161. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9099-9>
- COX, B.A.; JONES, R.A.C. 2010. Genetic variability in the coat protein gene of *Potato virus X* and the current relationship between phylogenetic placement and resistance groupings. *Archives of Virology*. 155:1349-1356. <https://doi.org/10.1007/s00705-010-0711-3>
- FAOSTAT. 2018. Food and agriculture data. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (con acceso el 10/09/2020)
- FEDEPAPA. 2017. Plan estratégico del subsector de la papa visión 20-20. Bogotá. Disponible desde Internet en: <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2017/01/Plan-sectorial.pdf> (con acceso el 30/01/2020).
- FEDEPAPA. 2019. Informe de gestión. Vigencia 2019. 219p. Disponible desde Internet en: [https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2022/05/INFO\\_RME-DE-GESTIO%CC%81N-VIGENCIA-2019.pdf](https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2022/05/INFO_RME-DE-GESTIO%CC%81N-VIGENCIA-2019.pdf) (con acceso el 15/07/2021)
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, FAO. 2008. El año internacional. Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/3/i0500s/i0500s01.pdf> (con acceso el 15/01/2020)

13. FORBES, G.A.; CHARKOWSKI, A.; ANDRADE-PIEDRA, J.; PARKER, M.; SCHULTE-GELDERMANN, E. 2020. Potato seed systems. En: Campos, H.; Ortiz, O. (eds). The potato crop. Springer (Switzerland). p.431-447. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_12)
14. FROST, K.E.; GROVES, R.L.; CHARKOWSKI, A.O. 2013. Integrated control of potato pathogens through seed potato certification and provision of clean seed potatoes. *Plant Disease*. 97(10):1268-1280. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-13-0477-FE>
15. GALLO GARCÍA, Y.; SIERRA MEJÍA, A.; DONAIRE SEGARRA, L.; ARANDA, M.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A.; MARÍN MONTOYA, M. 2019. Coinfección natural de virus de ARN en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* subsp. Andigena) en Antioquia (Colombia). *Acta Biológica Colombiana*. 24(3):546-560. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n3.79277>
16. GALLO GARCÍA, Y.M.; SIERRA MEJIA, A.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A.; MARÍN MONTOYA, M. 2021. Prevalencia de cinco virus de ARN en tubérculos-semilla de papa cultivados en Antioquia (Colombia). *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 19(1):66-78. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n1.2021.1343>
17. GARCÍA, A.; HIGUITA, M.; HOYOS, R.; GALLO, Y.; MARÍN, M.; GUTIÉRREZ, P. 2022. Indexing of RNA viruses in certified and uncertified potato seed-tubers from *Solanum tuberosum* cv. Diacol Capiro, and *S. phureja* cv. Criolla Colombia: a pilot study. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 55(9):1082-1101. <https://doi.org/10.1080/03235408.2022.2081760>
18. GIL, J.F.; COTES, J.M.; MARÍN, M. 2011. Incidencia de Potyvirus y caracterización molecular de PVY en regiones productoras de papa (*Solanum tuberosum* L) de Colombia. *Revista colombiana de biotecnología*. 13(1):85-93.
19. GILDEMACHER, P.R.; SCHULTE-GELDERMANN, E.; BORUS, D.; DEMO, P.; KINYAE, P.; MUNDIA, P.; STRUIK, P.C. 2011. Seed potato quality improvement through positive selection by smallholder farmers in Kenya. *Potato Research*. 54:253. <https://doi.org/10.1007/s11540-011-9190-5>
20. GLAIS, L.; TRIBODET, M.; KERLAN, C. 2005. Specific detection of the PVY<sup>N</sup>-W variant of *Potato virus Y*. *Journal of Virological Methods*. 125(2):131-136. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2005.01.007>
21. GUTIÉRREZ, P.; RIVILLAS, A.; TEJADA, D.; GIRALDO, S.; RESTREPO, A.; OSPINA, M.; CADAVID, S.; GALLO, Y.; MARÍN, M. 2021. PVDP: A portable open source pipeline for detection of plant viruses in RNAseq data. A case study on potato viruses in Antioquia (Colombia). *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 113:101604. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101604>
22. GUZMÁN-BARNEY, M.; HERNÁNDEZ, A.K.; FRANCO-LARA, L. 2013. Tracking foliar symptoms caused by tuber-borne *Potato yellow vein virus* (PYVV) in *Solanum Phureja* (Juz et Buk) Cultivar “Criolla Colombia”. *American Journal of Potato Research*. 90:284-293. <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9303-6>
23. HALTERMAN, D.; CHARKOWSKI, A.; VERCHOT, J. 2012. Potato viruses and seed certification in the USA to provide healthy propagated tubers. *Pest Technology*. 6(Special Issue 1):1-14.
24. HAMEED, A.; IQBAL, Z.; ASAD, S.; MANSOOR, S. 2014. Detection of multiple potato viruses in the field suggests synergistic interactions among potato viruses in Pakistan. *The Plant Pathology Journal*. 30(4):407-415. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.05.2014.0039>
25. HENAO-DÍAZ, E.; GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ, P.; MARÍN-MONTOYA, M. 2013. Análisis filogenético de aislamientos del *Potato virus Y* (PVY) obtenidos en cultivos de papa (*Solanum Tuberosum*) y tomate de árbol (*Solanum Betaceum*) en Colombia. *Actualidades Biológicas*. 35(99):219-232.
26. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 2015. Resolución 3168 de 2015. 97p. Disponible desde Internet en: <https://www.ica.gov.co/getattachmen/t/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx> (con acceso el 10/09/2020).
27. KERLAN, C. 2009. Potato viruses. En: Mahy, B.W.J.; Van Regenmortel, M.H.V. (eds). *Desk encyclopedia of plant and fungal virology*. Academic Press. p.458-471.
28. KREUZE, J.F.; SOUZA-DIAS, J.A.C.; JEEVALATHA, A.; FIGUEIRA, A.R.; VALKONEN, J.P.T.; JONES, R.A.C. 2020. Viral diseases in potato. En: Campos, H.; Ortiz, O. (eds). *The potato crop. Its agricultural, nutritional and social Contribution to Humankind*. Springer. p.389-431.
29. KUMAR, S.; STECHER, G.; LI, M.; KNYAZ, C.; TAMURA, K. 2018. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution*. 35(6):1547-1549. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>
30. MARÍN MONTOYA, M.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A. 2016. Principios de virología molecular de plantas tropicales. *Corpoica* (Colombia). 313p.

31. MILNE, I.; BAYER, M.; CARDLE, L.; SHAW, P.; STEPHEN, G.; WRIGHT, F.; MARSHALL, D. 2010. Tablet - next generation sequence assembly visualization. *Bioinformatics*. 26(3):401-402.  
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp666>
32. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 2020. Cadena de la papa. 21p. Disponible desde Internet en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Papa/Documentos/2020-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf> (con acceso el 17/08/20 21)
33. MUMFORD, R.A.; WALSH, K.; BARKER, I.; BOONHAM, N. 2000. Detection of *Potato mop top virus* and *Tobacco rattle virus* using a multiplex real-time fluorescent reverse-transcription polymerase chain reaction assay. *Phytopathology*. 90(5):448-453.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.5.448>
34. NIE, X.; SINGH, R.P. 2001. A novel usage of random primers for multiplex RT-PCR detection of virus and viroid in aphids, leaves, and tubers. *Journal of Virological Methods*. 91(1):37-49.  
[https://doi.org/10.1016/S0166-0934\(00\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0166-0934(00)00242-1)
35. NOLTE, P.; WHITWORTH, J.L.; THORNTON, M.K.; MCINTOSH, C.S. 2004. Effect of seedborne *Potato virus Y* on performance of russet burbank, russet norkotah, and shepody potato. *Plant Disease*. 88(3):248-252.  
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.3.248>
36. ÑUSTEZ, C.E. 2011. Variedades Colombianas de Papa. Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). 46p.
37. PORRAS RODRÍGUEZ, P.D.; HERRERA HEREDIA, C.A. 2015. Modelo productivo de la papa variedad Diacol Capiro para el departamento de Antioquia. Corpoica (Mosquera, Colombia). 92p.
38. RAIGOND, B.; VERMA, A.; PATHANIA, S.; J, S.; KOCHHAR, T.; CHAKRABARTI, S.K. 2020. Development of a reverse transcription loop-mediated isothermal amplification for detection of *potato virus a* in potato and in insect vector aphids. *Crop Protection*. 137:105296.  
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105296>
39. RIASCOS CHICA, M.; GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, P.A.; MARÍN MONTOYA, M.A. 2018. Identificación molecular de Potyvirus infectando cultivos de papa en el oriente de Antioquia (Colombia). *Acta Biológica Colombiana*. 23(1):39-50.  
<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v23n1.65683>
40. SALAZAR, L.F. 2006. Emerging and re-emerging potato diseases in the Andes. *Potato Research*. 49:43-47.  
<https://doi.org/10.1007/s11540-006-9005-2>
41. SAVENKOV, E.I.; SANDGREN, M.; VALKONEN, J.P.T. 1999. Complete sequence of RNA 1 and the presence of tRNA like structures in all RNAs of *Potato mop-top virus*, genus *Pomovirus*. *Journal of General Virology*. 80(10):2779-2784.  
<https://doi.org/10.1099/0022-1317-80-10-2779>
42. SCHULTE-GELDERMANN, E.; GILDEMACHER, P.R.; STRUIK, P.C. 2012. Improving seed health and seed performance by positive selection in three Kenyan potato varieties. *American Journal of Potato Research*. 89(6):429-437.  
<https://doi.org/10.1007/s12230-012-9264-1>
43. SCHUMPP, O.; BRÉCHON, A.; BRODARD, J.; DUPUIS, B.; FARINELLI, L.; FREI, P.; OTTEN, P.; PELLET, D. 2021. Large-Scale RT-qPCR diagnostics for seed potato certification. *Potato Research*. 64:553-596.  
<https://doi.org/10.1007/s11540-021-09491-3>
44. SIERRA, A.; GALLO, Y.; ESTRADA, M.; GUTIÉRREZ, P.; MARÍN, M. 2021. Detection of four RNA viruses in commercial and informal potato seed tubers in Antioquia (Co-lombia). *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 54(5-6):273-294.  
<https://doi.org/10.1080/03235408.2020.1829424>
45. SINGH, R.P.; KURZ, J.; BOITEAU, G.; BERNARD, G. 1995. Detection of *Potato leafroll virus* in single aphids by the reverse transcription polymerase chain reaction and its potential epidemiological application. *Journal of virological methods*. 55(1):133-143.  
[https://doi.org/10.1016/0166-0934\(95\)00056-z](https://doi.org/10.1016/0166-0934(95)00056-z)
46. THOMAS-SHARMA, S.; ABDURAHMAN, A.; ALI, S.; ANDRADE-PIEDRA, J.L.; BAO, S.; CHARKOWSKI, A.O.; CROOK, D.; KADIAN, M.; KROMANN, P.; STRUIK, P.C.; TORRANCE, L.; GARRETT, K.A.; FORBES, G.A. 2016. Seed degeneration in potato: The need for an integrat-ed seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*. 65(1):3-16.  
<https://doi.org/10.1111/ppa.12439>
47. XU, H.; DEHAAN, T.L.; DE BOER, S.H. 2004. Detection and confirmation of *Potato mop-top virus* in potatoes produced in the United States and Canada. *Plant Disease*. 88(4):363-367.  
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.4.363>
48. YANG, L.; NIE, B.; LIU, J.; SONG, B. 2014. A reexamination of the effectiveness of ribavirin on eradication of viruses in potato plantlets in vitro using Elisa and quantitative RT-PCR. *American Journal of Potato Research*. 91(3):304-311.  
<https://doi.org/10.1007/s12230-013-9350-z>



## Proposal of a system for measuring apparent electrical conductivity and moisture of soil for small farmers

## Propuesta de un sistema de medición de conductividad eléctrica aparente y humedad del suelo para pequeños agricultores

Jhonatan Paolo Tovar-Soto<sup>1\*</sup> ; Jesús Hernán Camacho-Tamayo<sup>2</sup> ; Leonardo Enrique Bermeo-Clavijo<sup>2</sup> ; Oscar Leonardo García-Navarrete<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: jtovar@usbog.edu.co

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería. Bogotá, D.C., Colombia; e.mail: jhcamachot@unal.edu.co; lbermeoc@unal.edu.co; olgarcian@unal.edu.co

\*corresponding author: jtovar@usbog.edu.co

**How to cite:** Tovar-Soto, J.P.; Camacho-Tamayo, J.H.; Bermeo-Clavijo, L.E.; García-Navarrete, O.L. 2022. Proposal of a system for measuring apparent electrical conductivity and moisture of soil for small farmers. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1592. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1592>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** September 6, 2020

**Accepted:** August 29, 2022

**Edited by:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

In the last 30 years soils decreased 73 % of their productive capacity in the world. One of the main reasons for this decrease has been the politics implemented, as well as the absence of opportunity for the small producer to implement improvement strategies that can increase their productivity in the field. Therefore, in this research a soil measurement system is proposed for small farmers, based on the design of two sensors of low cost: (i) Apparent electrical conductivity (ECa) sensor and (ii) moisture sensor. These measurement variables have the particularity that their characteristics can be associated with the physical properties of the soil for decision-making. The sensors developed in this work employ two techniques: Wenner's method for ECa and electrical impedance measurement to identify the dielectric permittivity associated with the water content of the soil. The system is controlled by the Raspberry Pi 3 board through developed software that allows correlating data with its geolocation. The device was tested in controlled laboratory measurements with calibrated instruments, obtaining a coefficient of . Finally, on-site tests were made to validate their use for small farmers.

**Keywords:** Agricultural soils; Low-cost technology; Physical characteristics; Sensors; Small farmers.

### RESUMEN

Durante los últimos 30 años, los suelos han disminuido un 73 % su capacidad productiva, a nivel mundial. Una de las principales razones para esta cifra a la baja son las políticas implementadas, así como la falta de oportunidad para que el pequeño productor adopte estrategias de mejora, con lo cual, pueda aumentar la productividad. Por lo anterior, en esta investigación, se propone un sistema de medición de suelo para pequeños productores, a partir del diseño de dos sensores de bajo costo: (i) sensor de conductividad eléctrica aparente (CEa) y (ii) sensor de humedad. Estas variables de medición tienen la particularidad que sus características se pueden asociar a las propiedades físicas del suelo, para tomar decisiones. Los sensores desarrollados en este trabajo usan dos técnicas: el método de Wenner, para la CEa y la medición de impedancia eléctrica, para identificar la permitividad dieléctrica asociada con el contenido de agua del suelo. El sistema es controlado mediante la tarjeta Raspberry Pi 3, a través de un software desarrollado, que permite correlacionar los datos con su geolocalización. El dispositivo, se probó en mediciones controladas en laboratorio, con instrumentos calibrados, obteniendo un coeficiente . Finalmente, se hicieron pruebas *in situ*, con el fin de validar su uso por pequeños agricultores.

Palabras clave: Características físicas; Sensores; Suelos agrícolas; Tecnología de bajo costo.

## INTRODUCTION

One of the objectives of agriculture is to improve the yield of crops (Cortés *et al.* 2013). Consequently, tools for the analysis of soil variability must be available, given that soils have no homogeneous characteristics (Stadler *et al.* 2015) and traditional measurement processes make the analysis of crop variability inaccurate. Growing conditions in crops change depending on variables such as apparent electrical conductivity (ECa) and soil moisture. Therefore, this situation requires actions to estimate these parameters, which are directly associated with crop yield. This also seeks to obtain efficient land management to reduce the negative impact on the environment (Stadler *et al.* 2015).

Some of the tools that are used for the study of crop variability are information and communication technologies (ICT) to optimize the production of crops in such a way that makes it possible to modify soil management in a specific site (Corwin & Lesch, 2003). For the inclusion of these technologies in agriculture, it is necessary to identify the variables that allow obtaining a direct relationship with the properties of the soil, and there is evidence that ECa and soil moisture fulfill this role. On the one hand, soil moisture depends on several soil properties, such as porosity, degree of compaction, soil structure, organic content, and temperature, among others physical characteristics (Susha Lekshmi *et al.* 2014). ECa, on the other hand, is a variable with which different parameters of the soil can be associated, such as salts, nutrients, water content, productivity, and crop growth (Stadler *et al.* 2015).

The measurement of soil moisture can be done using widely known techniques, such as the reflectometry technique (Menzianni *et al.* 1996), capacitive technique (Eller & Denoth, 1996), gamma ray technique, neutron scattering technique (Susha Lekshmi *et al.* 2014) and electric impedance technique. The most frequent methods for the measurement of soil moisture are dielectric techniques, which consist in finding the dielectric constant associated with the capacitance. The main differences between the existing methods are in the associated cost and the technology used. The ECa can be measured by obtaining electrical resistivity or electromagnetic induction (Corwin & Rhoades, 1984). Within the resistive technique, there is the 4-electrode resistivity method, which has two variations that are frequently used: The Schlumberger-Palmer arrangement and Wenner's arrangement (Wenner, 1915).

It should also be noted that the use of ICT allows conducting of studies on the yield and feasibility of soils by mapping the data obtained in real-time and then, obtaining more detailed information about the soil under study (Rambauth Ibarra, 2022). Consequently, this article presents the analysis and development of two measurement devices for obtaining ECa and soil moisture with its geolocation and with the least failures. The system was implemented with software in python language on the Raspberry Pi 3 board, in to provide low-cost equipment for the soil analysis and allow increased access of small farmers to these technologies.

## MATERIALS AND METHODS

### Measurement methods

Method for calculating the soil ECa. Wenner's method was used for the device configuration since the separation between electrodes is constant just as in commercial devices. Additionally, the electrode length does not change and therefore the measurement is not affected (IEEE, 2012). The pair of internal electrodes measure the electric potential difference (V) and the two external electrodes measure the electrical current (I). The resistance associated with a fraction of soil area is obtained using Ohm's law: . Wenner's arrangement (Figure 1a) is characterized by equid-spaced electrodes at a uniform distance that allows obtaining the resistivity in a determined area of the ground, and the measurement depends exclusively on the internal electrodes of the array. Apparent resistivity ( $\rho$ ) was calculated with equation 1 (Wenner, 1915).

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad \text{equation 1}$$

Where a is the distance between electrodes and b is the electrode length. The ECa is computed with equation 2.

$$ECa = \frac{1}{\rho} \quad \text{equation 2}$$

Method for calculating soil moisture. In this work, the electric impedance technique was chosen, due to the ease to obtain the variable of interest and the cost associated with the practical implementation of this method (Susha Lekshmi *et al.* 2014). To obtain soil moisture, the principle of dielectric permittivity was used and denoted as  $\epsilon$ . This is a parameter associated with most fluids, including water, and allows obtaining fundamental characteristics. Therefore, to implement the electric impedance technique, an electronic configuration known as the self-balanced bridge is used as shown in figure 1d. Through this configuration, the capacitance of the fluid present in the soil was obtained, which is directly related to the electric impedance and its moisture. The estimation of water content of the soil was made by computing the value of  $\epsilon$ , which is associated with the soil moisture percentage obtained by the ML2X commercial sensor (ICT International, 2015) in a total of 100 soil samples of the Marengo Agricultural Center (CAM) with different moisture content (mainly silt soil and clay soil with high content of sodium and salts). Likewise, this sensor was calibrated to be used as a standard in the measurement of soil moisture content. Once the values were obtained, the weighting was performed and the equation with the best coefficient of determination for the volumetric water content was calculated.

### Hardware design

ECa sensor. For the measurement of the electrical conductivity of soil, the system comprised a transmitter, a receiver, a power source, and electrodes connected to the ground (Seidel & Lange, 2007). It is necessary to use an AC generator, because using DC

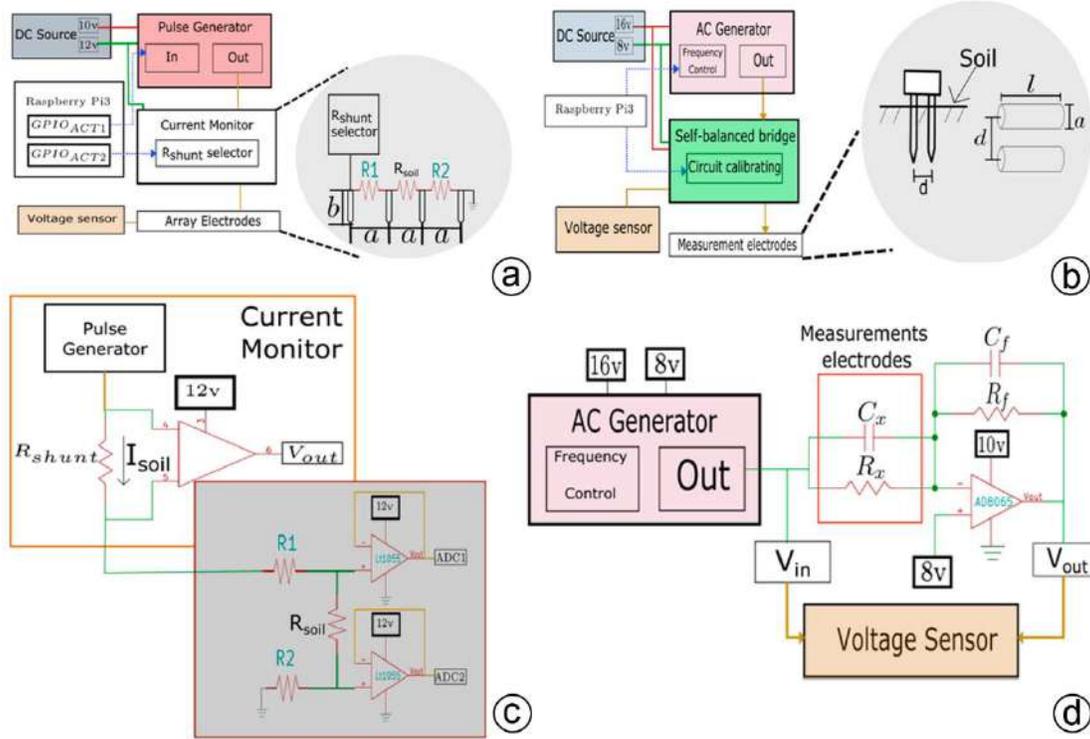


Figure 1. Methods of measurement for testing and hardware design for in situ tests. a) In the right, the Wenner's method for measurement of soil resistivity with 4 electrodes. In the left, the complete system of measurement of the apparent electrical conductivity with Raspberry pi 3; b) In the right, the capacitor of parallel cables for measurement moisture soil. In the left, the complete system of measurement of the moisture soil with Raspberry pi 3; c) Final device for measurement of current of soil and electrodes voltage for ECa; d) Final device for measuring moisture soil with self-balanced bridge configuration.

in the ground may produce spontaneous polarizations in the soil. To determine the appropriate values of the ECa sensor devices, tests were performed on soil samples with different values of water content (between dry and saturated soil). The test involved feeding the Wenner's array electrodes with 60 different values of low-frequency voltage (between 0.1 Hz and 10 Hz) to avoid polarization between electrodes due to DC current (Seidel & Lange, 2007), and thus establish the appropriate minimum and maximum voltage values of the generated AC signal.

For this purpose, the DC current was injected through 4 electrodes, in this case, 4 stainless steel rods with an approximate diameter of 1/4" (Wenner, 1915). The distance between each pair of electrodes is a constant value, in the same way, the length of each rod is equal for the 4 of them (IEEE, 2012). The measurement of the current flowing through the electrodes was made through a current monitor circuit (Figure 1c). This electronic configuration comprises an operational amplifier and a bypass resistor, and the selected current monitor is the integrated circuit INA213 (Texas Instruments, 2017). The derivation resistance is connected to the integrated differential inputs, and it was selected using the estimation of values given with the soil samples of the CAM. Additionally, it was decided to set up a monitoring system (Figure 1a) to control the selection of the resistance connected to the differential terminals of the current sensor. The change of resistance was made through a digital control from the embedded system, by choosing the resistance according to the current values measured.

The measured potential difference was obtained from the internal electrodes of Wenner's arrangement. To take this measure, the LT1055 op amp (Linear Technology, 1994) was used as a voltage follower. The differential variable of soil voltage was digitally obtained in the Raspberry Pi 3 board, by detecting the voltages in each of the internal electrodes of Wenner's method (the voltage over in Figure 1c).

**Moisture sensor.** The moisture sensor is composed of a circuit that generates a sine wave connected to the self-balanced bridge, a pair of electrodes inserted into the soil (Figure 1b), a circuit that allows calibrating the behavior of the self-balanced bridge, and a voltage detector circuit. The self-balanced bridge configuration comprises an operational amplifier AD8065 (Analog Devices, 2016), a transducer element formed by an analog peak detector to obtain the input and output voltages, an alternating current source made with the integrated circuit XR2206 (Exar Corporation, 2008), an unknown impedance (reactance given by the soil, measured with electrodes of the moisture sensor), a known impedance formed by a resistance ( $R_f$ ) and a capacitor ( $C_f$ ) in parallel of values and (Figure 1d). Starting from equation 3 the unknown capacitance is determined.

$$C_x = \frac{V_{input}^2}{V_{output}^2} C_f \quad \text{equation 3}$$

where  $C_x$  is the unknown capacitance of soil,  $C_0$  is the known capacitance,  $V_i$  is the input voltage and  $V_o$  is the output voltage. With this value, the approximate value of the soil dielectric permittivity can be found by using equation 4.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{\epsilon_0 K_g} \quad \text{equation 4}$$

Where  $\epsilon_r$  is the dielectric permittivity,  $\epsilon_0$  is the dielectric permittivity in free space and  $K_g$  is the capacitor geometric constant.

Additionally, to avoid voltage drops due to parasitic loads, a voltage follower with the AD812 operational amplifier (Analog Devices, 1998) was used between the signal generator circuit and the self-balanced bridge. Also, given the variable behavior of the capacitor at different frequencies, the circuit was evaluated in different ranges through a simulation analysis of the frequency response to determine the values of the known impedance of the self-balanced bridge, thus allowing a stable operation of the device (Agilent Technologies, 2006). Equation 5 was used to obtain the capacitance  $C_f$  of the circuit for the calibration.

$$C_f = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{V_{input}^2}{(R_x V_{output})^2} - \frac{1}{R_2^2}} \quad \text{equation 5}$$

The voltages  $V_{input}$  and  $V_{output}$  from equation 3 and equation 5 were obtained using an analog peak detector, which provides rapid detection and filters the signal avoiding noise. This peak detector was finally coupled to a voltage follower, with LT1055 amplifiers to avoid any voltage drop when connected to the Raspberry Pi 3 board. The measuring electrode design was based on a capacitor of parallel cables, using the following geometric considerations: stainless steel rods with a length ( $l$ ) of 13 cm and diameter ( $a$ ) of 3 mm (Figure 1b). All of the above was digitally controlled by the Raspberry Pi 3 board.

**Embedded system and peripherals.** The device required a data processing system; thus, the Raspberry Pi 3 board was used (Raspberry Pi Foundation, 2016), likewise, an integrated and compact user interface was programmed, using a 7" touch-sensitive screen to avoid the use of external peripherals, a tablet keyboard, and a small-sized frame to protect the device. The board works with a 5V to 2A power supply, since its current consumption increases if external peripherals are connected. To obtain the GPS measurements, a *UBLOX NEO 6M* module was used, which can be connected through one of the *USB* ports of the Raspberry Pi 3. Since the board needs an external A/D converter, the integrated *ADS1115* was chosen, as it provides a 12-bit precision and different gain options to obtain measurements in the millivolt range (*mV*).

**Software design.** The values of interest (ECa and soil moisture) are determined by two equations from the designed program, through the digital voltages collection associated with each sensor. Another programmed function is to obtain the geographical location (GPS) of the measurement with its associated parameters (ECa and moisture), which are reported in an Excel file. The programming was made in Python language.

**In situ testing.** The measurements were made at the UNAL campus located in the city of Bogotá, D.C. at the geographical coordinates 4°38'N, 74°04'O and at the CAM located in the municipality of Mosquera, Cundinamarca, at the geographical coordinates 4°42'N, 74°12'O. In the first case, 18 measurement points were determined randomly around the campus, using a 10 cm length ECa sensor electrode and the moisture electrode. Three different measurements of each variable were taken at each point to determine the data repeatability in the different measurements of the same point between 9:00 am and 12:00 pm. For these tests, the weather conditions were affected by constant rain and relatively high humidity in the environment, which allowed testing of the prototype in extreme conditions.

For identifying the viability and efficiency of the sensors' final design, the CAM was chosen for *in situ* testing in four soil lots the same day, in the time slot between 8:00 am and 4:00 pm. A total of 60 testing points aleatory distributed in the lots were obtained. The measurements were randomly distributed as follows: 13 measurements in Lot 3, 16 measurements in Lot 7, 14 measurements in Lot 12, 14 measurements in Lot 13, and 3 measurements on the way between Lot 7 and Lot 3, for a total of 60 samples obtained. With the previous planning in the measurement distribution, a single intake per point of both ECa and moisture was performed. Multiple measurements per point are not required, given the existing repeatability. The soil lots chosen on this date have no crops in their surfaces, are principally pastoring zones, and the grass specie is fundamentally kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). The weather conditions for this day were the following: cloudy sky, absence of rain, temperature of 21 °C approx., and relative humidity of 50 to 73 %.

**Feasibility study of the design.** This analysis was made through the estimation of the costs of the final prototype, which was compared with some commercial devices to establish its relevance for small farmers.

## RESULTS AND DISCUSSION

First, a set of tests were established with soil samples in different conditions of water content to determine the requirements for the design of the sensors. In the second stage, a validation test from the functional designs was made with a soil sample equally controlled in the laboratory. Third, the evaluation *in situ* was concluded for evidencing the operability of the proposed designs and, finally, to identify the economic feasibility of the designs.

### Sensor design

**ECa sensor.** The range of voltages contained between 1 and 30V (Figure 2a) shows the experiments in different voltage levels, thus allowing finding the approximate values of soil resistance. Figure 2a shows only two cases of the study, dry and saturated soil. Likewise, the current levels flowing over the selected samples were detected, thus finding the appropriate derivation resistance values for the current monitor circuit. The assembly diagram resulting from the

electronic configuration is shown in figure 1c. Table 1 details the approximate current values measured in cases shown in figure 2a. The current monitor derivation resistance ( $R_{bun}$ ) selection was established with the values found by the numerical calculation with Ohm's law which was 5.6 and 220 $\Omega$ , thus allowing optimal operation in soil measurements. Finally, the design of the measurement electrodes was specified according to the considerations established by Wenner's arrangement in terms of length and depth (IEEE, 2012). Three dimensions were manufactured with a length of 25, 20, and 10 cm, and the separations between electrodes were established according to their length and depth as follows: 4, 3, and 2 cm, respectively. With the dimensions, the geometric constant

of Wenner's arrangement was calculated and included directly in equation 1 through the software implemented.

**Moisture sensor.** To establish the moisture sensor final design, an initial measurement was made of the capacitance value given by the soil samples in a range value between dry and saturated conditions, resulting in the following values: 29pF-picoFarads- (dry soil) and 275pF (saturated soil). This data allowed us to infer that the values of capacitance in the soil are too low, so to obtain more efficient measurements and with low errors, high frequencies should be used (Susha Lekshmi *et al.* 2014). Additionally, to determine the circuit behavior in different frequency ranges and, consequently,

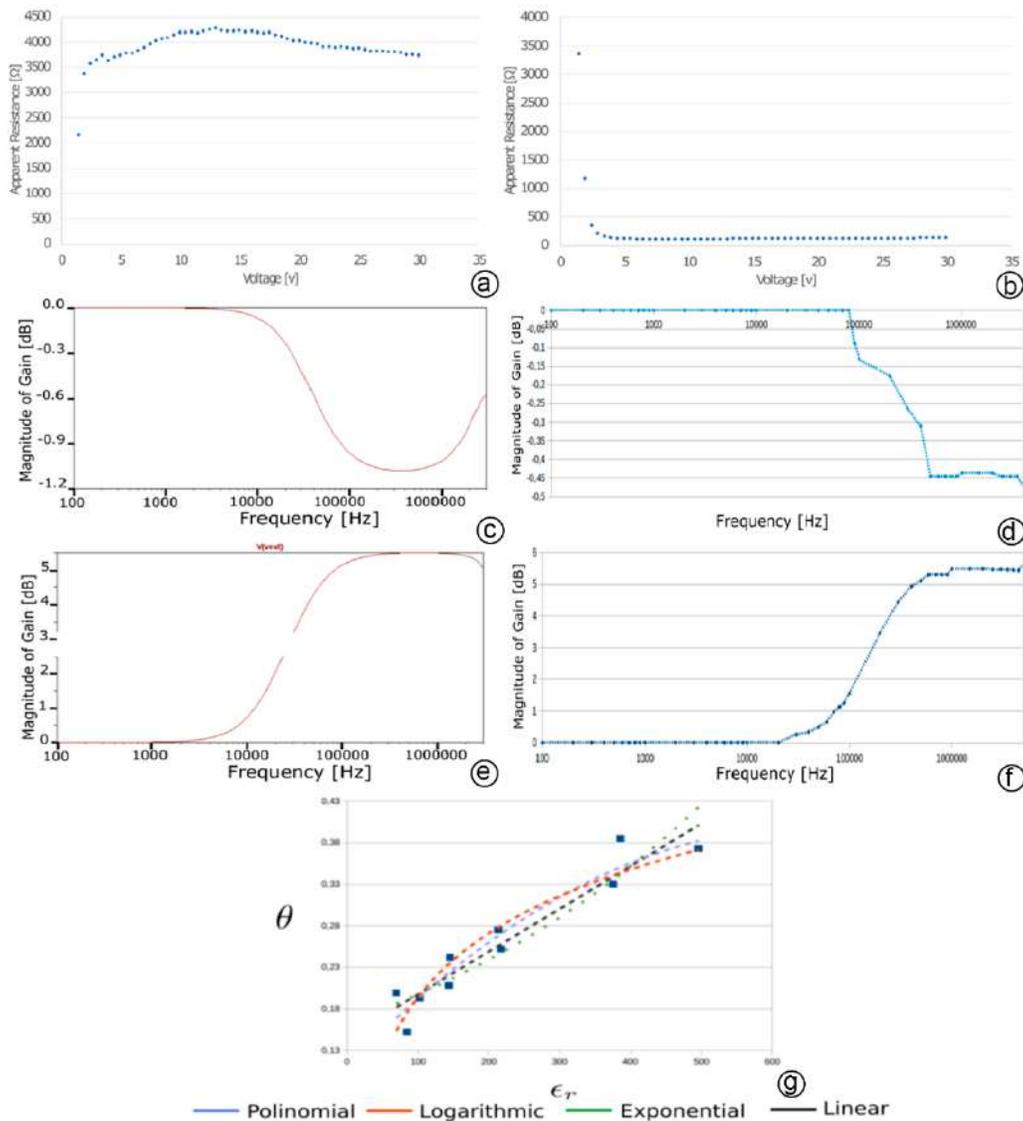


Figure 2. Testing for controlled samples in laboratory for sensor calibrating and final device selection. Testing for measurement apparent resistance: a) dry soil; b) saturated soil. Test for estimating the most stable range of frequencies in dry soil: c) bode diagram in simulation; d) real values on self-bridge balanced. Test for estimating the most stable range of frequencies in saturate soil: e) bode diagram in simulation; f) real values on self-bridge balanced; g) Ratio between dielectric permittivity ( $\epsilon_r$ ) and moisture content of soil ( $\theta$ ) for estimating the associated equation with better  $R^2$  coefficient.

Table 1. Current values in saturated and dry soil for the controlled samples in the laboratory.

Soil condition	Voltage [V]*	Current [mA]*
Dry	5	0.11
Dry	10	0.33
Dry	15	0.58
Dry	20	0.83
Dry	25	1.13
Saturated	5	6.51
Saturated	10	19.9
Saturated	15	32.7
Saturated	20	46.4
Saturated	25	62.6

\*The measurements were realized with commercial AC generator and DC source. The values of voltage and current were obtained with Fluke multimeter and commercial oscilloscope Tektronix.

to stabilize its behavior for the desired frequencies, the assembly shown in figure 1d was implemented using two values of unknown capacitance instead of the actual measurement electrodes (simulating the soil behavior) and in agreement with the previously obtained values of soil capacitance in a dry and saturated condition. The circuit behavior for the two capacitance values  $C_x$  was verified, by performing a sweep of frequencies between 0 Hz and 3 MHz with each capacitor. The practical results were compared with those expected in the simulation, as shown in figure 2b and 2c (Bode diagrams). In figure 2b it was shown that the behavior of soil is purely resistive below 100 kHz, on the other hand, figure 2c showed that at frequencies above 100 kHz, the gain of the self-balanced bridge depends exclusively on the relationship given by equation 2, and soil has a capacitive behavior. Therefore, these plots allowed to determine the circuit stability implemented in the range between 500 and 2 MHz. These sets of frequencies were taken as the measurement interval for the final device to obtain soil moisture in the in-situ test.

Additionally, a circuit for calibrating the self-balanced bridge was also established, due to possible fluctuations in the value of the known capacitor  $C_f$ , which generates changes in the system. Finally, the self-balanced bridge circuit was implemented with the calibration resistors of 120  $\Omega$  (alternate value of  $R_s$ ) and 220  $\Omega$  (alternate value of  $R_f$ ), and the values of the known capacitance  $C_f$ . The laboratory test showed that the change in frequency directly affects the value of the capacitor and that it is important to perform a constant calibration of this capacitance, since the numerical calculation of the soil capacitance, according to equation 2, is proportional to the value of the capacitance that must be calibrated.

With the design of the finished device, tests were made in the laboratory-controlled soil, performing various measurements with 10 soil conditions of moisture contents. To avoid bad measurements, the samples were irrigated with water without chlorine. The testing consisted in taking 10 measurements of each moisture state in the frequency range of interest. The water content value  $\theta$  was obtained with the commercial sensor, and the dielectric permittivity was

calculated using equations 2 and 4. These results allowed establishing that the variation in the value of dielectric permittivity is lower in the range of frequencies from 1.4MHz to 2MHz, with a value of  $\epsilon_r=106.2$  in 1.5MHz and a value of  $\epsilon_r=90$  in 2MHz. The values of dielectric permittivity are higher and more unstable in low frequencies.

Then, the equation associated with the soil water content was determined by relating the data average per dielectric permittivity obtained in the different soil moisture conditions with the estimation of the commercial sensor of the water content. Likewise, the data obtained were associated with 4 trend lines, as shown in figure 2d. The associated equations for trend lines for the dispersion graph were:

- Linear.  $\theta=0.513 \times 10^{-3} \epsilon_r^2 + 0.146$ .  $R^2 = 0.907$ .
- Polynomial.  $\theta=-6.69 \times 10^{-7} \epsilon_r^2 + 0.87 \times 10^{-3} \epsilon_r + 0.111$ .  $R^2 = 0.9257$ .
- Logarithmic.  $\theta=-0.1109 \ln \epsilon_r - 0.3167$ .  $R^2 = 0.8946$ .
- Exponential.  $\theta=0.1629 e^{1.92 \times 10^{-3} \epsilon_r}$ .  $R^2 = 0.8602$ .

Consequently, the line with the best coefficient of determination is the one belonging to the second-degree polynomial function, which has an  $R^2=0.9257$ . Finally, the separation between the electrodes of the moisture sensor was established, taking into consideration the geometric constant of a parallel cable capacitor (Eller & Denoth, 1996). By taking the 13 cm length ( $l$ ) and the 3 mm diameter ( $a$ ), it was found that the minimum spacing between rods is 3 mm, so it was decided to choose a separation ( $d$ ) greater than 1.5 cm (Figure 1b), to achieve a geometry factor of  $K_g=0.1782$  and avoid design problems and implementation by a minimum separation.

**ECa sensor evaluation results.** The sensor evaluation tests were performed in laboratory-controlled samples with two FLUKE multimeters. The voltage and current measurements were taken on Wenner's array electrodes. Likewise, the same measurements

Table 2. Results of evaluation of the final prototype for measurement of ECa and moisture of soil with relative error.

ECa with Fluke multimeter [mS / m]	ECa with prototype [mS / m]		Relative Error [%]
1.8	1.7		5.56
2.63	2.5		4.94
2.94	2.86		2.72
3.48	3.28		5.75
4.35	4.1		5.75
4.72	4.57		3.18
26.4	25.6		3.03
43.1	42.45		1.51
47.53	47.26		0.57
$\epsilon_r^*$	$\theta$ sensor ML2X [%]	$\theta$ self-balanced bridge [%]	
69,44	17.90	16.89	5.64
213.4	27.50	26.81	2.51
145.34	23.20	22.47	3.15
375.2	33	34.64	4.97
496	37.30	38.21	2,44
143.63	20.80	22.35	7.45
84.3	16.20	18.05	11.42
102.176	19.30	19.39	0.47
216.77	26.20	27.01	3.09
385.5	37.50	35.02	6.61

\*The dielectric permittivity is dimensionless.  $\theta$  value refers to water content that its directly related with moisture content of soil.

were made with the proposed prototype, and some of the results are shown in table 2 (only dry and saturated soil conditions). The relative error is under 6 % in controlled conditions, with ambient temperature and relative humidity of 45 % in the environment. The measurements were made with many soil samples and different soil moisture conditions (between dry and saturated soil). A total of 30 measurements were taken for each soil moisture condition in the range of 1 and 30V values. ECa was estimated for a total of 10 moisture conditions. These results were consistent with the behavior expected of soil, which is moderately and highly saline.

**Evaluation results of the moisture sensor.** The proposed moisture sensor was checked by performing measurements on soil samples with different moisture contents. A total of 100 measurements were averaged in a total of 10 soil moisture conditions for determining its dielectric permittivity. Moisture percentages identified were between 15.2 and 38.5 % (Table 2), without a specific order to avoid altering the measurements. Table 2 establishes the error in the actual measurements of the percentage of soil moisture (only some measurements). As demonstrated, the variations of the values measured with the self-balanced bridge and the commercial sensor are below 7 % (except for one measurement). This gives a percentage of reliability suitable for the prototype, very close to commercial devices.

The final prototype included the designs obtained with the previous analyses from each sensor in two PCB designed for this purpose, whose final implementation can be observed in figure 3a. The portable frame for the protection of the whole system is shown in figure 3b, including the peripherals used (GPS, electrodes for measurement, 7" screen, keyboard).

**In situ measurements in the UNAL Campus and CAM.** From this experiment, it was determined that the obtained values did not fluctuate and were constant, thus they were used to make the respective scatter plots observed in figure 3c. Once the previous measurements were completed, it was concluded that the data obtained yielded precise information that fits the stability considerations found in the laboratory tests.

Finally, in the CAM, 60 measurements were taken in the 4 selected lots. With this consideration, random points were established without a constant pattern per lot, so that there was no relationship between distributions of points in the selected lots. As indicated before, one of the project objectives is to obtain real-time data mapping that facilitates visualization in the field. This is evidenced in the contour plots obtained through the software developed, and in real-time in the prototype represented in figure 3d. The measurements obtained have coincided with the soil characteristics

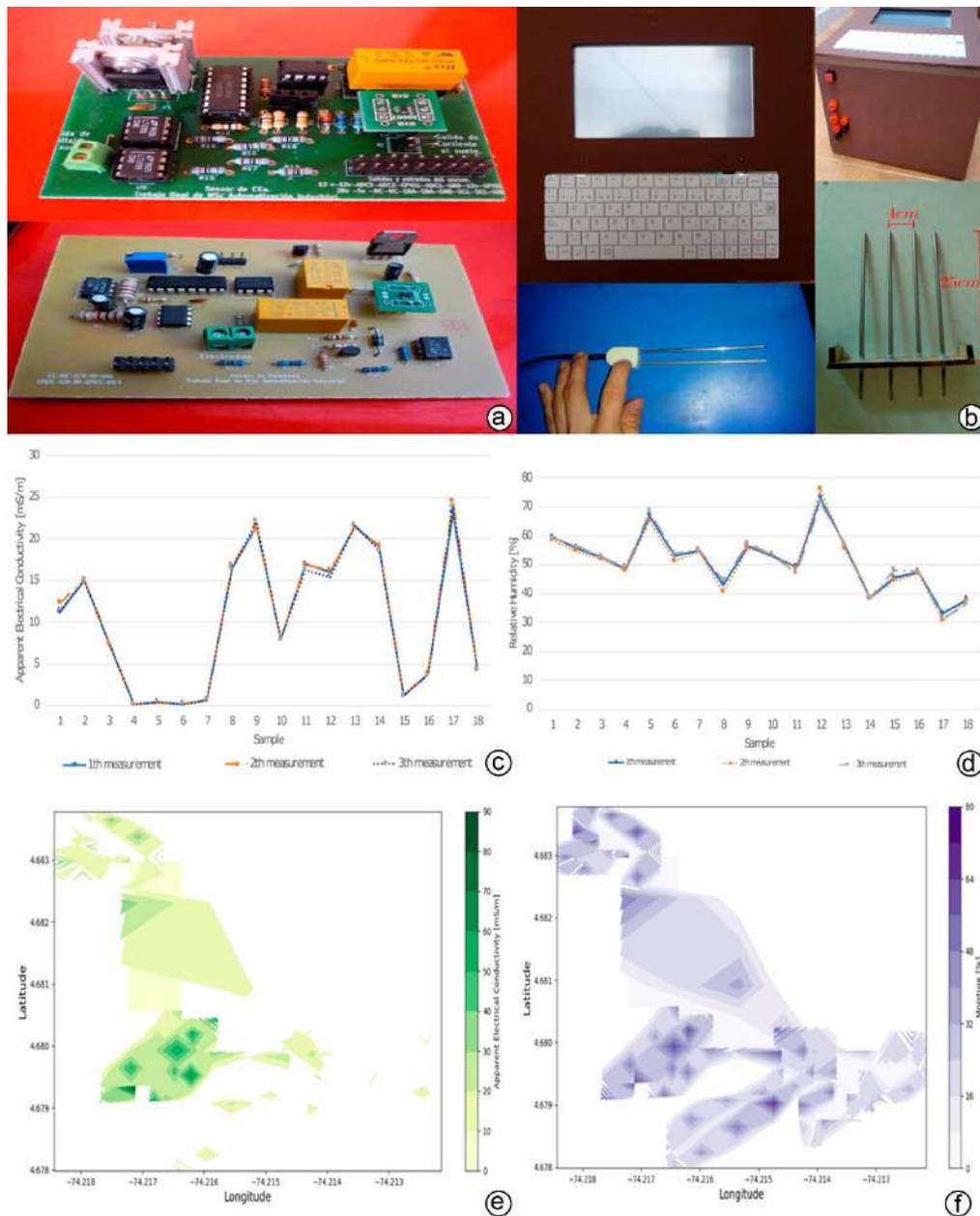


Figure 3. Final device and in-situ testing: a) final circuits on PCB. Up, the circuit of CEa sensor and down, the circuit of moisture sensor; b) Final prototype. Up, the box with screen and keyboard, with the circuits and peripherals necessary for its operation. Down, the electrodes for moisture and CEa measurements. Dispersion measure from the data obtained in UNAL Campus: c) CEa data; d) moisture data. Mapping with data from CAM obtained in the 4 lots: e) CEa data; f) moisture data.

of the CAM lots, so high reliability of the measurements in the designed devices is reported.

**Economics feasibility of the final design.** In the study of the feasibility, the comparison of average prices of principal commercial manufacturers (Delta T, Decagon, Omega) was included for sensors and portable sensor kit. With the final price, the prototype was developed. The total associated cost to the final device for this work is approximately the fourth part of the average price of the basic portable sensor kit for the measurement of both

variables (approximately US250 at present). Consequently, this design involved choosing between different alternatives for ECA measurement and soil moisture. By implementing those with the highest cost-effectiveness ratio, it was demonstrated that the system has low cost, and is an alternative for small farmers accessing these technologies and achieving better yield in the crops. As an important result, the integration of an embedded system with sensors for agricultural use, together with the use of geolocation, enhances the use of these technologies for their implementation in on-site measurements, thus establishing the importance of ICT for

soil study. As an added value, this device has the capacity of making graphs in real time of the measured variables in soil and storing the historical data in excel archives.

Finally, it should be noted that the greatest contribution achieved in this project, regarding the agricultural sector, is to provide a functional design, low cost, and with good precision for the chosen variables of soil diagnosis (ECa and Moisture). It is expected that these designs will serve as a basis for further studies in this area, which could add improvements for greater reliability in the data, including characteristics from different types of soils.

In this work, the design of a system that allows the estimation of the ECa and the moisture of soil was reported. The realization of this design involved choosing between different alternatives for ECa measurement and soil moisture, to implement those with the highest cost-effectiveness ratio.

As an important result, it is shown that the integration of an embedded system with sensors for agricultural use, together with the use of geolocation, enhances the use of these for their implementation of on-site measurements, establishing the importance of the ITC for soil study.

It should be noted that the greatest contribution achieved in this project, as regards the agricultural sector, is to provide a functional design, low cost, and with good precision for the variables of soil diagnosis chosen (ECa and Moisture). It is expected that these designs will serve as a basis for further studies in this area, which could add improvements to have greater reliability in the data, including characteristics from different types of soils.

**Acknowledgments.** This work has been extracted from the first author's master's thesis, entitled "Obtención de medidas de conductividad eléctrica aparente (CEa) y de humedad del suelo, con aplicación a la agricultura de precisión". It was developed at the Universidad Nacional de Colombia. The first author would like to thank the Faculty of Engineering of the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, for all its support.  
**Conflicts of interest:** No conflict of interest on the part of the authors.

## REFERENCES

1. AGILENT TECHNOLOGIES. 2006. Agilent Impedance Measurement Handbook. Ed. Agilent Technologies (USA). 126p.
2. ANALOG DEVICES. 1998. Dual, Current Feedback Low Power Op Amp. 16p. Disponible desde internet en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD812.pdf> (con acceso el 10/06/2017).
3. ANALOG DEVICES. 2016. High Performance, 145 MHz Fast FET Op Amps. 28p. Disponible en internet desde: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8065\\_8066.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8065_8066.pdf) (con acceso el 15/06/2017).
4. CORTÉS, D.; PÉREZ, J.; CAMACHO TAMAYO, J. 2013. Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 16(2):401-408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
5. CORWIN, D.; LESCH, S.M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal (USA)*. 95(3):455-471. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.4550>
6. CORWIN, D.L.; RHOADES, J.D. 1984. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Science Society of America Journal*. 48(2):288-291. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020011x>
7. ELLER, H.; DENOTH, A. 1996. A capacitive soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*. 185(1-4):137-146. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03003-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03003-4)
8. EXAR CORPORATION. 2008. XR-2206. Monolithic Function Generator. Disponible en internet desde: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206\\_104\\_020808.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf) (con acceso el 15/06/2017).
9. ICT INTERNATIONAL. 2015. Decagon 10HS Moisture. Disponible en internet desde: [http://www.ictinternational.com/pdf/?product\\_id=256](http://www.ictinternational.com/pdf/?product_id=256) (con acceso el 20/02/2017).
10. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE. 2012. IEEE 81-2012. IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system. Disponible desde internet en: <https://standards.ieee.org/standard/81-2012.html> (con acceso el 18/11/2016).
11. LINEAR TECHNOLOGY. 1994. LT1055/LT1056. Precision, high speed, JFET input operational amplifiers. Disponible en internet desde: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/10556fd.pdf> (con acceso el 15/10/2016)
12. MENZIANI, M.; RIVASI, M.; PUGNAGHI, S.; SANTANGELO, R.; VINCENZI, S. 1996. Soil volumetric water content measurements using TDR technique. *Annals of Geophysics*. 39(1):91-96. <https://doi.org/10.4401/ag-3953>
13. RAMBAUTH IBARRA, G.E. 2022. Agricultura de precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*. 3(1):34-38. <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>

14. RASPBERRY PI FOUNDATION. 2016. Raspberry Pi. Disponible en internet desde: <https://www.raspberrypi.org> (con acceso el 20/06/2016).
15. SEIDEL, K.; LANGE, G. 2007. Direct current resistivity methods. In: Environmental geology. Springer (Berlin, Heidelberg). p.205-237. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_8)
16. STADLER, A.; RUDOLPH, S.; KUPISCH, M.; LANGENSIEPEN, M.; VAN DER KRUK, J.; EWERT, F. 2015. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. European Journal of Agronomy. 64:8-20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.004>
17. SUSHA LEKSHMI, S.U.; SINGH, D.N.; SHOJAEI BAGHINI, M. 2014. A critical review of soil moisture measurement. Measurement (Italia). 54:92-105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
18. TEXAS INSTRUMENTS. 2017. INA21x voltage output, low- or high-side measurement, bidirectional, zero-drift series, current-shunt monitors. Disponible desde internet en: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos437j/sbos437j.pdf> (con acceso el 14/05/2016).
19. WENNER, F. 1915. A method of measuring earth resistivity. Bulletin of the Bureau of Standards. 18:469-478.



# Ajuste del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección

## Bean (*Phaseolus vulgaris*) basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) adjusted by remote sensing

Jheison A. Guerrero-Gutierrez<sup>1</sup> ; Enrique A. Torres<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia; e-mail: jhaguerrero@unal.edu.co, eatorresp@unal.edu.co

\*autor de correspondencia: eatorresp@unal.edu.co

**Cómo citar:** Guerrero-Gutierrez, J.A.; Torres, E.A. 2022. Ajuste del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1832. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1832>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** febrero 21 de 2021

**Aceptado:** noviembre 16 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Para realizar un manejo eficiente del agua en la agricultura es necesario conocer los requerimientos hídricos del cultivo, lo cual, se puede realizar de manera sencilla y rápida, con la ayuda de cámaras convencionales. En este estudio, se determinaron los requerimientos hídricos de un cultivo de frijol (variedad DIACOL CALIMA G4494), sembrado en CIAT, Palmira - Valle del Cauca, Colombia, mediante la estimación de la curva del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ), derivada de la curva de fracción de cobertura vegetal ( $F_{cv}$ ). Para determinar la curva de fracción de cobertura vegetal, se emplearon imágenes tomadas con una cámara digital en el espectro visible (RGB), a baja altura (menos de 3 m). Las necesidades hídricas del cultivo de frijol, se calcularon empleando los valores del coeficiente basal de cultivo derivados junto con la modelación FAO-56. Los resultados indican que la curva de  $K_{cb}$  ajustada por fotografía fue diferente a la curva estándar presentada en la publicación FAO-56 para frijol, mostrando, principalmente, diferencia en la duración de las etapas y los valores de  $K_{cb}$ , en estas etapas. En cuanto a las necesidades hídricas, al emplear la curva de  $K_{cb}$  ajustada por fotografías, se evidencia que el cultivo requiere más agua en las etapas media y final, para evitar estrés hídrico en las plantas.

Palabras clave: Evapotranspiración; FAO-56; Fracción de cobertura vegetal; Requerimientos hídricos de los cultivos; Sensores remotos.

### ABSTRACT

To carry out efficient water management in agriculture, it is necessary to know the water requirements of the crop, which can be done easily and quickly with the help of conventional cameras. In this study, the water requirements of a bean crop (DIACOL CALIMA G4494 variety) planted in CIAT, Palmira - Valle del Cauca, Colombia, were determined by estimating the curve of the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) derived from the vegetation cover fraction curve ( $F_{cv}$ ). To determine the vegetation cover fraction curve, images taken with a digital camera in the visible spectrum (RGB) at low height (less than 3m) were used. The water needs of the bean crop were calculated using the basal crop coefficient values derived together with the FAO-56 modelling. The results indicate that the  $K_{cb}$  curve adjusted by photography was different from the standard curve presented in the publication FAO-56 for beans, mainly showing a difference in the duration of the stages and the  $K_{cb}$  values in these stages. Regarding water needs, when using the  $K_{cb}$  curve adjusted by photographs, it is evident that the crop requires more water in the middle and final stages, to avoid water stress in the plants.

Keywords: Evapotranspiration; FAO-56; Plant cover fraction; Water requirements of crops; Remote sensing.

## INTRODUCCIÓN

El requerimiento hídrico, se define como la cantidad de agua que necesita ser suministrada al cultivo para compensar las pérdidas por evapotranspiración (ET) (Allen *et al.* 2006); sin embargo, este requerimiento es diferente durante cada fase de desarrollo de la planta, principalmente, por la estructura aérea de la planta o dosel, el tipo de raíces y las condiciones atmosféricas de la zona, de esta forma, la interacción entre la planta, el suelo y la atmósfera, determina la ET (Drerup *et al.* 2017). Es por esto que, cuantificar las necesidades hídricas del cultivo por medio de la estimación de la ET es fundamental para aplicar el agua, necesaria al cultivo y hacer un uso eficiente del recurso hídrico (Alam *et al.* 2018; Anderson & French, 2019).

La evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), se puede determinar utilizando la metodología que ha sido estandarizada por la FAO-56 y descrita por Allen *et al.* (2006), que emplea la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Esta metodología ha demostrado que proporciona precisión y confiabilidad de, aproximadamente, el 95 %, en las estimaciones diarias de  $ET_c$  y en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos (Allen & Pereira, 2009); además, se considera dentro del enfoque FAO-56, que los valores de  $ET_c$  son precisos, cuando se cuenta con los datos de las condiciones físicas del suelo y los reportes del seguimiento agronómico del cultivo (Olivera-Guerra *et al.* 2018).

Por otra parte, Bispo *et al.* (2022) y Pereira *et al.* (2015) definen el  $K_c$  como una relación entre la  $ET_c$  y  $ET_o$  y este coeficiente lo describen como un indicador de la demanda hídrica del cultivo y se deriva de las características físicas de la vegetación y de las condiciones climáticas de la zona (Ko *et al.* 2009); asimismo, el coeficiente se puede hallar con un enfoque único ( $K_c$ ), que tiene en cuenta las pérdidas por evaporación del suelo y transpiración de la planta o también como un enfoque doble, donde se divide el  $K_c$  en el coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) y el coeficiente de evaporación ( $K_e$ ); el  $K_{cb}$ , se observa cuando la superficie evaporable del suelo es cero, lo cual, indica que representa solo la variación de la transpiración de la planta (Abrisqueta *et al.* 2013); sin embargo, Fenner *et al.* (2016) afirman que  $K_c$  y  $K_{cb}$  tienen un comportamiento muy similar durante las fases de desarrollo del cultivo (inicial, media y final); por otro lado,  $K_{cb}$  varía por la altura de la planta, la fracción cubierta del suelo, el número de hojas, el funcionamiento de los estomas, la radiación de la superficie y la humedad en la zona radicular (Jamshidi *et al.* 2020; López-Urrea *et al.* 2009a).

En estudios, como el de Pôças *et al.* (2020), se presentan resultados significativos, que demuestra la estimación del  $K_{cb}$  y la programación de riego, basados en técnicas de teledetección (TT); estas TT, para el estudio de la vegetación, se basan en la respuesta espectral de las hojas, cuyas características varían por la morfología y la fisiología de cada especie (Calera *et al.* 2017; De la Casa *et al.* 2018). De acuerdo con Odi-Lara *et al.* (2013), existe una fuerte relación entre las características biofísicas del cultivo (área foliar, biomasa, altura y  $K_{cb}$ ) con la respuesta espectral de la vegetación. Por otro lado, aplicar las TT para el monitoreo de la vegetación resulta ser un método eficiente

en la toma de datos temporales, de tal forma, que las metodologías basadas en teledetección permiten estimar las necesidades hídricas de la planta, mediante el uso de índices de vegetación (IV), que se relacionan ampliamente con el coeficiente de cultivo (Campos *et al.* 2017; Er-Raki *et al.* 2010). Por otra parte, estudios han demostrado que las relaciones  $K_{cb}$ -IV apoyadas con un balance de agua en el suelo establecen una combinación operativa para realizar modelos de programación de riego en diferentes tipos de cultivos, a escala regional y de campo (Garrido-Rubio *et al.* 2020; Pôças *et al.* 2015; Reyes-González *et al.* 2018; Toureiro *et al.* 2017). Esta relación  $K_{cb}$ -IV, usando sensores remotos, el seguimiento de variables meteorológicas y la metodología FAO-56, han establecido estimaciones precisas de la  $ET_c$  y los requerimientos hídricos del cultivo (Campos *et al.* 2017; Odi-Lara *et al.* 2016; Ortiz & Torres, 2018).

Otro enfoque de uso común es obtener los valores  $K_{cb}$  mediante el seguimiento de la fracción de cobertura vegetal (Fcv), con fotografía en el visible (Chianucci, 2016; Song *et al.* 2015); por consiguiente, algunas investigaciones han demostrado resultados confiables con el enfoque  $K_{cb}$ -Fcv; por ejemplo, se tienen las aproximaciones de López-Urrea *et al.* (2009b; 2012; 2016) y Trout & DeJonge (2018), en diversos cultivos; por tanto, la relación  $K_{cb}$ -Fcv puede ser usada para estimar las necesidades hídricas, en gran variedad de cultivos (Chianucci *et al.* 2018).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la curva de coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*), variedad "Diacol Calima" G4494, a partir de la fracción de cobertura vegetal (Fcv), utilizando imágenes fotográficas a baja altura. Este trabajo, se presenta como una metodología sencilla que adapta los valores de  $K_{cb}$  de FAO-56 a condiciones de campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio, se realizó en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en Palmira - Valle del Cauca, Colombia, N3°32'21,98" O 76°18' 12,99", 969 m s.n.m., entre septiembre y diciembre de 2019, temporada de altas precipitaciones.

Para este trabajo, se sembró un cultivo de frijol variedad "Diacol Calima"; el período de estudio tuvo una duración de 94 días y comprendió desde el 26 de septiembre hasta el 27 de diciembre de 2019. Para el estudio, se consideraron las diferentes etapas fenológicas del cultivo, presentadas en la tabla 1. Para el experimento, se utilizó una parcela de 236 m<sup>2</sup>, donde se establecieron 5 surcos de siembra de 52,4 m de longitud y 0,5 m de ancho; la separación entre surcos fue de 0.9 m; la separación entre plantas fueron 10 cm, con lo que se obtuvo una densidad de plantas de 111.000 plantas ha<sup>-1</sup>; para minimizar las pérdidas por evaporación, se utilizó acolchado plástico color plata/negro.

Por otra parte, el suelo para la siembra fue preparado con una mezcla de materia orgánica en proceso de humificación (humus de lombriz), arena y turba de coco, metodología usada por el Programa de Recursos Genéticos (PRG), del CIAT. El suelo resultante corresponde a una textura arcillosa, con valores de humedad

Tabla 1. Fenología del cultivo de frijol.

Fenología	Etapa	Fecha	DDS	Día Juliano
Siembra		26/09/2019	0	269
Emergencia	V1	01/10/2019	5	274
1 hojas Trifoliadas		12/10/2019	18	285
3 hojas Trifoliadas	V4	18/10/2019	24	291
Prefloración	R5	25/10/2019	31	298
Floración	R6	31/10/2019	37	304
Formación de vainas	R7	11/11/2019	48	315
Maduración	R9	29/11/2019	66	333
Cosecha		27/12/2019	94	361

a capacidad de campo (CC), de 35,5 % y punto de marchitez permanente (PMP), de 22,6 %.

El manejo nutricional lo realizó el PRG del CIAT, mediante fertirrigación semanal, con Hidranova, Calcimit y elementos menores, con una concentración promedio de  $2 \text{ g l}^{-1}$ , durante todo el desarrollo del cultivo, hasta los 81 DDS.

Se instaló un sistema de riego por goteo, que compensó la demanda hídrica del cultivo con goteros de  $11 \text{ h}^{-1}$ , distanciados a 20 cm entre goteros y con un bulbo de humedecimiento de 20 cm de ancho, aproximadamente; las aplicaciones fueron realizadas de acuerdo con la programación establecida por el PRG del CIAT, para todo el ciclo del cultivo.

Para estimar la necesidad hídrica del cultivo, se utilizó la metodología FAO-56, propuesta por Allen *et al.* (2006). La  $ET_c$ , se calculó con la ecuación 1.

$$ET_c = ET_o \times (K_{cb} + K_c)$$

ecuación 1

Donde,  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo (mm),  $ET_o$  la evapotranspiración de referencia (mm),  $K_{cb}$  es el coeficiente basal de cultivo (transpiración) y  $K_c$  el coeficiente de evaporación de suelo.

Para la estimación de la  $ET_o$ , se trabajó con una estación meteorológica de marca DAVIS, instalada sobre una superficie de referencia (pasto), que mide las variables de humedad relativa, velocidad de viento, temperatura del aire y radiación solar, las cuales, se integran en la ecuación de Penman-Monteith, que es proporcionada por la FAO-56, como una de las metodologías más utilizadas para la estimación de la  $ET_o$  (Pereira *et al.* 2015).

La unidad experimental de este estudio fue la parcela de frijol (Diacol Calima), de  $236 \text{ m}^2$ . A esta parcela, se le realizó un seguimiento fotográfico (detallado más adelante), para el cual, se definieron cinco puntos al azar, distribuidos a lo largo de la parcela, como se observa en la figura 1. Los puntos de seguimiento, se marcaron con estacas y se mantuvieron fijos, durante el tiempo del cultivo.

El seguimiento, se realizó mediante una campaña fotográfica semanal (13 campañas en total), con una cámara digital Pentax,

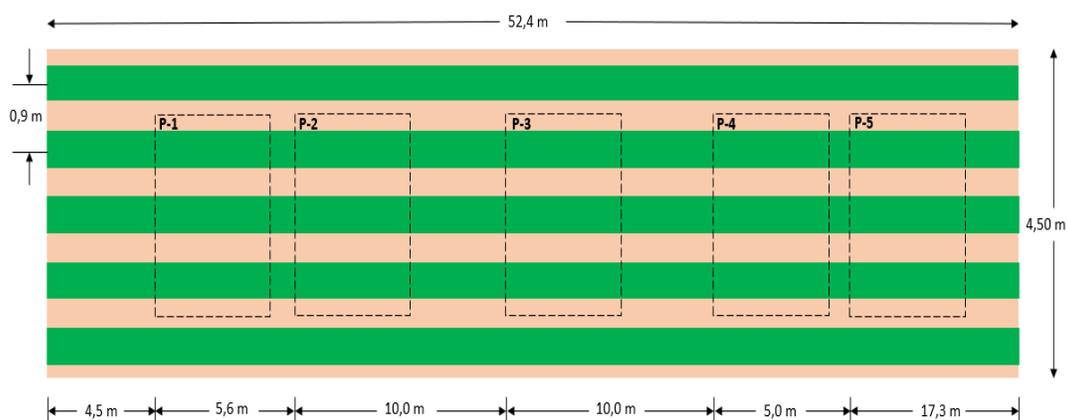


Figura 1. Distribución de las parcelas en el campo, líneas de surco (color verde), a 90 cm; los cuadros (líneas discontinuas) indican el área de cada parcela (unidad experimental) cubierta por la fotografía, respectivamente.

modelo Optio E85, de 12 megapíxeles, con un sensor CCD de 6,17 por 4,55 mm (sensible a las longitudes de onda del azul, verde y rojo) y un campo de visión de  $53,13^\circ$  (con una distancia focal de 32 mm). En cada uno de los cinco puntos de seguimiento, se tomaron

tres repeticiones fotográficas; para la toma de las fotografías, la cámara se instaló en una pértiga de aluminio en forma de "T", a una altura de 2,86 m del suelo y a una distancia horizontal (brazo), de 1,50 m. Esta altura de la cámara (en la pértiga), se estableció

para seguir los tres surcos centrales de la parcela, dejando un surco a cada lado sin fotografiar, para reducir el efecto de borde en el muestreo. El área de muestreo en cada fotografía fue de 7,71 m<sup>2</sup> (3,20m x 2,41m), aproximadamente. En cada campaña, la pértiga se instalaba en cada uno de los cinco puntos de muestreo definidos, se nivelaba y se tomaban tres fotografías verticales por punto, para un total de 15 fotografías por campaña. La toma de las fotografías, se realizó siempre en horas de la mañana, entre las 10 a. m. y las 12 del mediodía.

Con la herramienta ArcGIS 10.4.1, se realizó el tratamiento de las fotografías, mediante un proceso de clasificación supervisada; esta

herramienta permite diferenciar entre los píxeles de plástico, suelo y planta, obteniendo los porcentajes de Fcv, como se muestra en la figura 2. De esta forma, en cada campaña, se obtuvieron 15 datos de Fcv, con los cuales, se determinó el promedio y la desviación estándar, para cada fecha de la campaña de muestreo.

El tratamiento de los datos, se realizó semanalmente para cada campaña hasta la cosecha del cultivo (94 DDS). Luego, para la estimación del K<sub>cb</sub> del frijol, se utilizaron varios modelos K<sub>cb</sub>-Fcv, reportados en la literatura (Tabla 2). Para este trabajo, se utilizaron ocho aproximaciones matemáticas K<sub>cb</sub>-Fcv, para realizar la curva de K<sub>cb</sub>-Ajustado y determinar la duración de las etapas. Los valores de

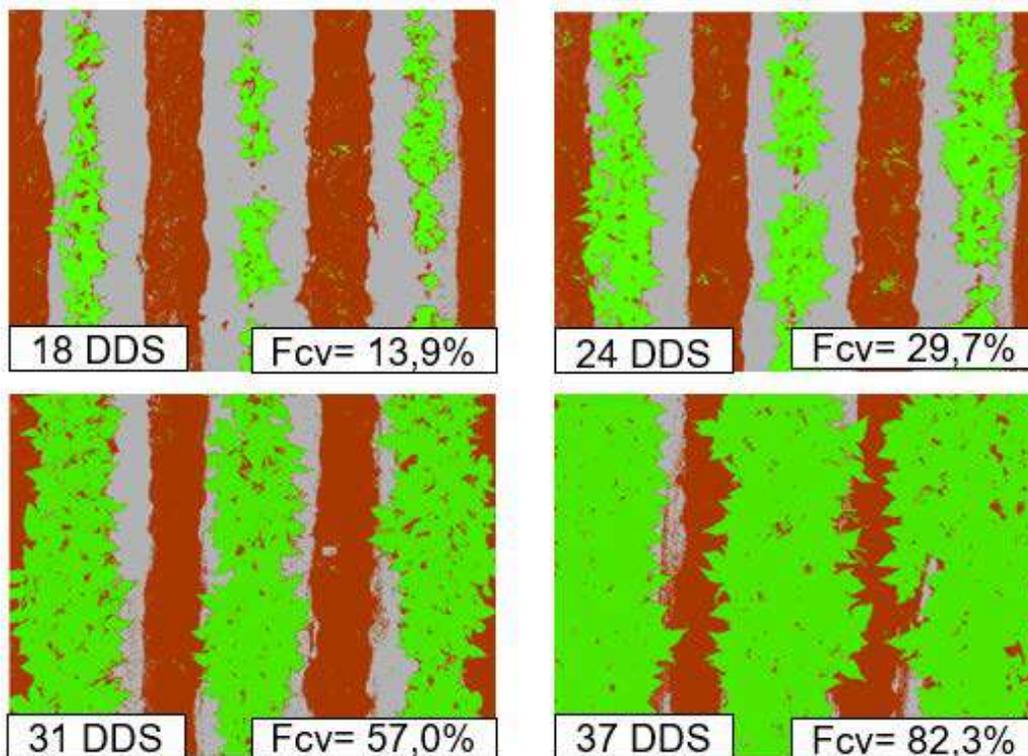


Figura 2. Clasificación supervisada realizada en las primeras 4 campañas de campo en el cultivo de frijol; color marrón, como suelo; color gris, como plástico y color verde, como vegetación.

Tabla 2. Modelos empleados de la relación entre la Fcv y el coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) reportados en la literatura, para la estimación de la curva de K<sub>cb</sub> en el cultivo de frijol.

Ecuación K <sub>cb</sub>	R <sup>2</sup>	Cultivo	Autor
$K_{cb} = 1,13F_{cv} + 0,14$	***	Maíz	Johnson & Trout (2012)
$K_{cb} = 1,10F_{cv} + 0,17$	0,91	Maíz_Fase Completa	Trout & DeJonge (2018)
$K_{cb} = 1,08F_{cv} + 0,17$	0,93	Maíz_Fase V	
$K_{cb} = 1,21F_{cv} + 0,10$	0,77	Maíz_Fase R	
$K_{cb} = -0,985F_{cv}^2 + 1,759F_{cv} + 0,272$	0,99	Ajo	Johnson & Trout (2012)
$K_{cb} = -0,078F_{cv}^2 + 1,124F_{cv} + 0,142$	0,99	Pimentón	
$K_{cb} = -0,933F_{cv}^2 + 1,756F_{cv} + 0,181$	0,99	Brócoli	
$K_{cb} = -0,07F_{cv}^2 + 1,08F_{cv} + 0,209$	0,99	Lechuga	

$K_{cb}$ -Ajustado presentados son el resultado del promedio de todas las aproximaciones matemáticas  $K_{cb}$ -Fcv empleadas.

Por último, se realizaron dos modelaciones basadas en la metodología FAO-56, con el fin de observar los efectos del  $K_{cb}$  estimado en el cálculo del requerimiento hídrico del cultivo. En primer lugar, la modelación FAO-56, que adopta la programación de riego y los valores de  $K_{cb}$  del cultivo de frijol descritos por la FAO-56. En segundo lugar, la modelación FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado, la cual, se basa en la programación de riego por FAO-56 con el  $K_{cb}$ -Ajustado, presentado en la figura 3c.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Usando los datos meteorológicos de la estación DAVIS, se calculó la  $ET_o$ , (Allen *et al.* 2006), para el periodo del cultivo, como se muestra en la figura 3a. En esta figura, se observa una  $ET_o$  promedio de 3,8 mm, un valor máximo de 5,3 mm, a los 2 DDS y un valor mínimo de 2,5 mm, a los 80 DDS; por otro lado, se observa el comportamiento de la precipitación que muestra un ciclo lluvioso, con una lámina total de 256,8 mm, una precipitación máxima diaria de 82,5 mm, a los 6 DDS y una mínima de 0,5 mm, a los 45 DDS.

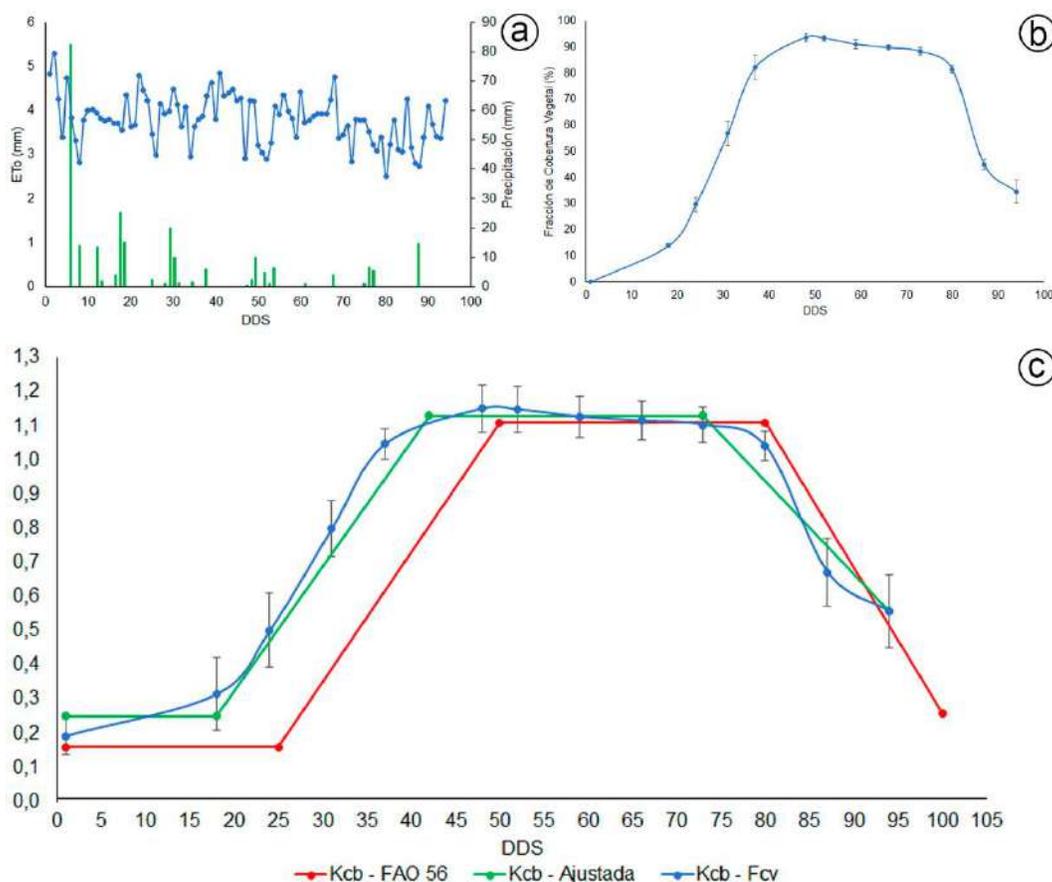


Figura 3. a) Comportamiento de la  $ET_o$  (línea azul) y precipitación (barras verdes). La línea roja horizontal muestra el promedio de  $ET_o$ . b) Evolución de la fracción de cobertura vegetal del cultivo de frijol DIACOL CALIMA G4494. Las líneas negras verticales indican la desviación estándar. c) Valores de  $K_{cb}$  del cultivo de frijol, la curva de  $K_{cb}$ -Fcv estimada con los modelos reportados en la tabla 2 (color azul), la curva de  $K_{cb}$ -FAO-56 (color rojo) y la curva  $K_{cb}$ -Ajustada (color verde).

Por otra parte, en la figura 3b, se muestran los resultados de la evolución de la fracción de cobertura vegetal, obtenida por TT, basadas en el seguimiento fotográfico al cultivo.

Los resultados muestran una Fcv máxima de 93,8 % (42 DDS), correspondiente a la formación de vainas y una Fcv final, 34,6 % (94 DDS). La desviación estándar osciló entre 0,8 y 4,8, presentándose las desviaciones más altas entre las etapas de prefloración y floración (31-37 DDS), así como en cosecha (87-94 DDS), por los cambios

de senescencia de las plantas en la última semana.

En la figura 3c, empleando los resultados de Fcv presentados en la figura 3b y los modelos  $K_{cb}$ -Fcv, presentados en la tabla 2, se estimó la evolución real del  $K_{cb}$  del cultivo ( $K_{cb}$ -Fcv, línea azul). En esta figura, también se muestra la curva de  $K_{cb}$ , que presenta la publicación FAO-56 ( $K_{cb}$ -FAO-56, línea roja) y la curva ajustada de  $K_{cb}$  ( $K_{cb}$ -Ajustada, línea verde), deducida de la curva  $K_{cb}$ -Fcv.

Al comparar la curva  $K_{cb}$ -FAO-56 (Allen *et al.* 2006) con la curva  $K_{cb}$ -Fcv, en la figura 3c, se observó que presentan el mismo patrón de desarrollo vegetativo, pero diferente en la etapa inicial, desarrollo y final, aunque coinciden parcialmente en la etapa media. Esto mostró, la necesidad de trazar una nueva curva de  $K_{cb}$ , la cual, se denominó  $K_{cb}$ -Ajustada. Esta curva  $K_{cb}$ -Ajustada presentó un valor

de  $K_{cb}$  de 0,24, en la etapa inicial, de 1,12, correspondiente a la etapa media y de 0,55, en la etapa final o de senescencia, diferentes a los presentados por la curva  $K_{cb}$ -FAO-56 (0,15, etapa inicial; 1,10, etapa media y de 0,25, etapa final). Los valores de  $K_{cb}$  duración de las etapas de la aproximación FAO-56 y la aproximación presentada en este estudio, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los valores de  $K_{cb}$ -Ajustados, duración de las etapas de crecimiento y modelaciones empleadas en la hoja de cálculo de FAO-56, en el cultivo de frijol, comparados con los valores de FAO-56.

Modelación	Etapas del cultivo	Duración (días)	Valores de $K_{cb}$	ET <sub>o</sub> (mm)	ET <sub>c</sub> (mm)	Riego (mm)
FAO-56	Inicial	25	0,15	99	61	56
	Desarrollo	25	0,15 - 1,10	99	98	81
	Media	30	1,10	110	131	152
	Final	20	0,25	71	58	23
	<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>379</b>	<b>347</b>	<b>312</b>
FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado	Inicial	18	0,24	71	48	46
	Desarrollo	24	0,24 - 1,12	96	97	94
	Media	31	1,12	118	144	149
	Final	21	0,55	72	64	24
	<b>Total</b>	<b>94</b>		<b>357</b>	<b>353</b>	<b>313</b>

Por otra parte, referente a la duración de las etapas de crecimiento mostradas en la tabla 3, los resultados indican que, con respecto a las duraciones presentadas en FAO-56, el cultivo presenta una etapa inicial más corta, con una diferencia de 7 días, mientras que las etapas de desarrollo y medias fueron prácticamente iguales (etapa de desarrollo, un día menor y etapa media y final, un día más). Por lo anterior, se observa que el cultivo de frijol sembrado bajo estas condiciones de campo es más precoz (6 días menos), que el presentado por FAO-56.

Para entender el efecto de la curva de  $K_{cb}$  ajustada en las necesidades hídricas del cultivo, se realizaron las simulaciones FAO-56, con las dos curvas de  $K_{cb}$ . En estas simulaciones, para observar mejor las diferencias en necesidades hídricas (ET<sub>c</sub>) de los dos escenarios y el riego aplicado, se eliminó la precipitación registrada durante la etapa de cultivo. Los resultados de las simulaciones, se presentan por etapa en la tabla 3. En términos generales, la ET<sub>c</sub> total es muy similar en las dos simulaciones (solo difieren en un 2 %), a pesar de los 6 días de diferencia, en la duración total del cultivo. Las diferencias principales en ET<sub>c</sub>, se presentan en la etapa media y final, donde, como consecuencia del  $K_{cb}$  (ajustado) más alto, la ET<sub>c</sub> es mayor en la modelación FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado, lo que indica, que no usar el  $K_{cb}$ -Ajustado, podría conducir a aplicar láminas de riego inferiores a las necesarias durante el llenado del grano, lo que podría generar la reducción de la producción. También, con el  $K_{cb}$ -Ajustado, se puede evitar el exceso de riego en la etapa inicial.

De la presente investigación, se concluye que el uso de la fotografía a baja altura permitió estimar la curva de  $K_{cb}$ -Ajustado para frijol, mediante Fcv y su consiguiente cuantificación de las necesidades hídricas del cultivo, para las condiciones del estudio en el Valle del Cauca. Esta curva de  $K_{cb}$  ajustada mostró diferencias con la curva publicada por FAO-56, en valores de  $K_{cb}$  y duraciones. A pesar de que la duración del cultivo de frijol en las condiciones del estudio, se redujo en 6 días, las necesidades hídricas se mantienen estables, debido a que los valores de  $K_{cb}$ , en las etapas media y final, son más altos, generando mayor consumo de agua del cultivo en estas etapas; sin embargo, esta curva de  $K_{cb}$ , estimada desde Fcv, permite aplicar, de forma precisa, el agua requerida por el cultivo, evitando el estrés del cultivo por bajas aplicaciones o la sobre irrigación en las etapas iniciales, por considerar  $K_{cb}$  más bajos de los reales.

Finalmente, la relación  $K_{cb}$ -Fcv se presenta como una alternativa sencilla, que permite a los agricultores estimar con precisión los requerimientos hídricos del cultivo y así, realizar un manejo eficiente del recurso hídrico.

**Agradecimientos.** En agradecimiento por la colaboración para la realización del presente estudio por medio del proyecto financiado “Manejo y uso eficiente del agua en la agricultura del Valle del Cauca como medida adaptación al cambio climático” con código 5060 – 202010013210 de la Universidad Nacional de Colombia; también al equipo y personal del Programa de Recursos Genéticos

(PRG) del CIAT por brindar las instalaciones para la realización de este estudio y por su gran apoyo y colaboración; también, agradecer al equipo de trabajo profesores y compañeros por su apoyo y dedicación en el proyecto de investigación.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. ABRISQUETA, I.; ABRISQUETA, J.M.; TAPIA, L.M.; MUNGUÍA, J.P.; CONEJERO, W.; VERA, J.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C. 2013. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agricultural Water Management*. 121:158-163. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.001>
2. ALAM, M.S.; LAMB, D.W.; RAHMAN, M.M. 2018. A refined method for rapidly determining the relationship between canopy NDVI and the pasture evapotranspiration coefficient. *Computers and Electronics in Agriculture*. 147:12-17. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.008>
3. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*. 28(1):17-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
4. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo : guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Roma). 298p.
5. ANDERSON, R.G.; FRENCH, A.N. 2019. Crop evapotranspiration. *Agronomy*. 9(10):614. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100614>
6. BISPO, R.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; GONÇALVES, I.Z.; NEALE, C.M.U.; TEIXEIRA, A.H.C. 2022. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. *Agricultural Water Management*. 271:107763. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107763>
7. CALERA, A.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; D'URSO, G.; MENENTI, M. 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors (Switzerland)*. 17(5):1104. <https://doi.org/10.3390/s17051104>
8. CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; SUYKER, A.E.; ARKEBAUER, T.J.; GONÇALVES, I.Z. 2017. Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. *Agricultural Water Management*. 187:140-153. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.022>
9. CHIANUCCI, F. 2016. A note on estimating canopy cover from digital cover and hemispherical photography. *Silva Fennica*. 50(1):1-10. <https://doi.org/10.14214/sf.1518>
10. CHIANUCCI, F.; LUCIBELLI, A.; DELL'ABATE, M.T. 2018. Estimation of ground canopy cover in agricultural crops using downward-looking photography. *Biosystems Engineering*. 169:209-216. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.012>
11. DE LA CASA, A.; OVANDO, G.; BRESSANINI, L.; MARTÍNEZ, J.; DÍAZ, G.; MIRANDA, C. 2018. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 146:531-547. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>
12. DRERUP, P.; BRUECK, H.; SCHERER, H.W. 2017. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe. *Agricultural Water Management*. 192:180-188. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.010>
13. ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; DUCHEMIN, B. 2010. Combining satellite remote sensing data with the FAO-56 dual approach for water use mapping in irrigated wheat fields of a semi-arid region. *Remote Sensing*. 2(1):375-387. <https://doi.org/10.3390/rs2010375>
14. FENNER, W.; DALLACORT, R.; DE FREITAS, P.S.L.; FARIA JÚNIOR, C.A.; DE CARVALHO, M.A.C.; BARVIERA, G. 2016. Dual crop coefficient of common bean in Tangará da Serra, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 20(5):455-460. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p455-460>
15. GARRIDO-RUBIO, J.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, L.; CALERA, A. 2020. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agricultural Water Management*. 238:106236. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236>
16. JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A.A.; SHAHSAVAR, A.R.; NIYOGI, D. 2020. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semiarid climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 227:105838. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>

17. JOHNSON, L.F.; TROUT, T.J. 2012. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*. 4(2):439-455. <https://doi.org/10.3390/rs4020439>
18. KO, J.; PICCINNI, G.; MAREK, T.; HOWELL, T. 2009. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of cotton and wheat. *Agricultural Water Management*. 96(12):1691-1697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.023>
19. LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; MONTORO, A.; LÓPEZ-FUSTER, P. 2009a. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*. 96(6):1031-1036. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.004>
20. LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍNEZ-MOLINA, L.; DE LA CRUZ, F.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; ODI-LARA, M.; SÁNCHEZ, J.M. 2016. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated biomass sorghum for energy production. *Irrigation Science*. 34(4):287-296. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0503-y>
21. LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. 2009b. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*. 96(9):1305-1310. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.015>
22. LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; MAÑAS, F.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature "Tempranillo" wine grapes. *Agricultural Water Management*. 112:13-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.009>
23. ODI-LARA, M.; CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; ORTEGA-FARÍAS, S.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; BALBONTÍN, C.; CALERA, A. 2016. Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*. 8(3):253. <https://doi.org/10.3390/rs8030253>
24. ODI-LARA, M.; PAZ-PELLAT, F.; LÓPEZ-URREA, R.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. 2013. Definición de la etapa de desarrollo de los cultivos para estimar evapotranspiración usando la metodología FAO-56 y sensores remotos. *Tecnología y Ciencias Del Agua*. 4(3):87-102.
25. OLIVERA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; ESCORIHUELA, M.J. 2018. Estimating the water budget components of irrigated crops: Combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data. *Agricultural Water Management*. 208:120-131. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.014>
26. ORTIZ, E.; TORRES, E.A. 2018. Assessing water demand with remote sensing for two coriander varieties. *Agronomía Colombiana*. 36(3):274-283. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n3.71809>
27. PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*. 147:4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
28. PÔÇAS, I.; CALERA, A.; CAMPOS, I.; CUNHA, M. 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management*. 233:106081. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>
29. PÔÇAS, I.; PAÇO, T.A.; PAREDES, P.; CUNHA, M.; PEREIRA, L.S. 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*. 7(3):2373-2400. <https://doi.org/10.3390/rs70302373>
30. REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. 2018. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. *Advances in Meteorology* 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>
31. SONG, W.; MU, X.; YAN, G.; HUANG, S. 2015. Extracting the green fractional vegetation cover from digital images using a shadow-resistant algorithm (SHAR-LABFVC). *Remote Sensing*. 7(8):10425-10443. <https://doi.org/10.3390/rs70810425>
32. TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; SHAHIDIAN, S.; SOUSA, A. 2017. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Management*. 184:211-220. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>
33. TROUT, T.J.; DEJONGE, K.C. 2018. Crop water use and crop coefficients of maize in the great plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144(6):1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001309)



# Spatial analysis methodology of resistance to penetration and infiltration in a soil cultivated with a bushy fruit (*Acca sellowiana*)

## Metodología de análisis espacial de resistencia a penetración e infiltración en un suelo cultivado con un frutal arbustivo (*Acca sellowiana*)

Helber Milton Orjuela-Matta<sup>1\*</sup> ; Oscar Iván Monsalve-Camacho<sup>1</sup> ; Danny Wilson Sanjuanelo-Corredor<sup>1</sup> ; Juan Alejandro Velandia-Mora<sup>1</sup> ; Mario Alejandro Cano-Torres<sup>1</sup> ; Omar Camilo Quintero<sup>2</sup> ; Diana Lorena Marentes-Barrantes<sup>1</sup> ; Héctor William Duarte-Gómez<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Agronómica. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: horjuela@udca.edu.co; omonsalve@udca.edu.co; dsanjuanelo@udca.edu.co; juanvelandia@udca.edu.co; mcano@udca.edu.co; dmarentes@udca.edu.co; wduarte@udca.edu.co

<sup>2</sup>Company Disfruta Las Feijoas. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: overfeijoas@gmail.com

\*corresponding author: horjuela@udca.edu.co

**How to cite:** Orjuela-Matta, H.M.; Monsalve-Camacho, O.I.; Sanjuanelo-Corredor, D.W.; Velandia-Mora, J.A.; Cano-Torres, M.A.; Quintero, O.C.; Marentes-Barrantes, D.L.; Duarte-Gómez, H.W. 2022. Spatial analysis methodology of resistance to penetration and infiltration in a soil cultivated with a bushy fruit (*Acca sellowiana*). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2331. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2331>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** February 2, 2022

**Accepted:** November 16, 2022

**Edited by:** Helber Adrian Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

The sustainable management of water and soil resources for agricultural purposes is related to the ability to store and mobilize available water for crops, particularly under a spatial analysis. The objective of the study was to design and evaluate a methodology for spatial analysis of resistance to soil penetration and infiltration on loamy-clay textures. The basic methodological principles included sampling grid planning, data capture at defined points, data fitting to empirical models, data processing, and spatial representation. A defining moment was evaluated for an established feijoa crop with permanent production. With a georeferenced rectangular sampling grid of 40m x 40m, an area of 1.36 ha was covered. Penetration resistance was measured with a penetrometer, covering 4 depths per node (sampled point). Infiltration was evaluated with ring infiltrometers. The results allowed validation of the methodology

implemented through a single processing environment through RStudio. Resistance to penetration sensitively affected the variation in infiltration rates, adjusting planning activities for irrigation activities. The methodological proposal was designed to reduce processing times and graphic responses, tabulated, and integrated with a single script in the R tool, compared to traditional geostatistical techniques, which articulate the implementation of multiple tools for the generation of results.

**Keywords:** Basic infiltration; Cone index; Kriging; Modeling; Soil properties; Variogram.

### RESUMEN

La gestión sostenible de los recursos agua y suelo, con fines agrícolas, tiene relación con la capacidad para almacenar y

movilizar agua disponible para los cultivos, particularmente, bajo un análisis espacial. El objetivo del estudio fue diseñar y evaluar una metodología de análisis espacial de la resistencia a la penetración e infiltración del suelo sobre texturas franco-arcillosas. Los principios básicos metodológicos incluyeron planificación de grilla de muestreo, captura de datos en puntos definidos, ajuste de datos a modelos empíricos, procesamiento y representación espacial de datos. Se evaluó un momento definido para un cultivo de feijoa establecido con producción permanente. Con una grilla de muestreo rectangular georreferenciada de 40m x 40m, se abarcó una superficie de 1,36 ha. La resistencia a penetración, se midió con un penetrómetro, cubriendo 4 profundidades por nodo (punto muestreado). La infiltración fue evaluada con anillos infiltrómetros. Los resultados permitieron validar la metodología implementada, mediante un entorno de procesamiento único, a través de RStudio. La resistencia a la penetración afectó sensiblemente la variación en las tasas de infiltración, ajustando actividades de planeación de actividades de riego. La propuesta metodológica fue diseñada para disminuir tiempos de procesamiento y respuestas gráficas, tabuladas e integradas en un único script en la herramienta R, comparado con técnicas tradicionales geoestadísticas, que articulan la implementación de múltiples herramientas para la generación de resultados.

Palabras clave: Infiltración básica; Índice de cono; Kriging; Modelación; Propiedades del suelo; Semivariograma.

## INTRODUCTION

Geostatistical analyzes have been developed in the last decade as a tool to demonstrate the spatial dependence of different parameters, as input for site-specific management of water and soil resources and to encourage the development of strategic plans in geolocated areas. In general, it is necessary to use different software tools for the phased processing of the database. Some authors propose the use of the Gamma Design Plus (GS+) tool to obtain variograms, selecting models based on the best coefficient of determination " $r^2$ " and the smallest sum of the residual of squares when theoretical variance models such as spherical, exponential, and Gaussian (Cortez *et al.* 2018), but with the need to use a new additional tool for generating Kriging interpolations with graphical output.

Other authors as Schossler *et al.* (2019) propose the implementation of combined tools, generating the construction of variograms in the GS+ software and the generation of contour maps with the Surfer v. 8.0, that is, without the possibility of integration in a single environment and requiring a greater processing time per variable. The third group of researchers suggests developing geostatistical analyzes with the robust Cressie variance estimator, which allows an omnidirectional analysis of 2D variograms (Alesso *et al.* 2020).

About the variables used to test the reliability of the proposed methodology, penetration resistance (RP, for its initials in Spanish) is defined as a variable that represents the physical-mechanical quality of the soil (Guimarães *et al.* 2013), evaluated to identify the degree of compaction in surface layers (estimated in MPa), and indirectly measure the energy that a crop root must develop

to deform the soil structure (Cortés-D. *et al.* 2016), and establish the anchoring conditions according to the ground conditions. It particularly defines the level of restriction for the development of the effective roots of crops (Hummel *et al.* 2004), which simultaneously affects the movement of water through the pores of the natural substrate (Machiwal *et al.* 2006), highlighting that this last process is fundamental for the capture and distribution of water and nutrients, especially for situations where it is sought to establish the effect of potential soil restrictions on physiological and productive developments (Medina *et al.* 2012) and with greater incidence if, in addition, the apparent spatial variations of soil properties are not considered (Da Silva Martins *et al.* 2010).

The movement of water in the soil is generally analyzed through infiltration (i) (Fasinmirin *et al.* 2018), a hydrodynamic parameter that describes a unidirectional movement (vertical downwards) that, by supplying a constant head of pressure, aims to simulate the application of a sheet of irrigation with the constant flow; results that are used as the basis for the design and operation of sprinkler and/or micro-sprinkler irrigation systems (Orjuela-Matta *et al.* 2011).

Multiple studies around the spatial variation of physical, hydrodynamic, and physical-mechanical parameters of the soil (Camacho-Tamayo *et al.* 2013), established univariate and bivariate geostatistical analyzes (Cortés-D. *et al.* 2018) and in some cases defining analyzes of temporal variability of these properties, have been developed to generate strategies for localized management of activities inherent to agronomic management (Gebler *et al.* 2015).

Traditional methodologies require the use of multiple computer tools for processing geospatial data. One of the purposes is to facilitate the process through a single work environment with a graphical output option, with alternatives with a free use license (R Studio). Additionally, the methodological proposal is based on processing the raw data without adjusting known probability distributions and subsequently, for graphical representation, adjusting to known variance models available in the same processing tool. The proposed methodology allows for reducing response times in the processing and representation of spatial information captured in the field and facilitates decision-making based on the graphic results achieved.

Geostatistics is the predominant tool to describe and analyze spatial changes in the soil (Rodríguez-Vásquez *et al.* 2008), which allows the generation of Site-Specific Management Methodologies, where a series of sampling in georeferenced nodes and through the use of an interpolation technique known as Kriging, contour maps are generated for each of the variables of interest, according to the previous adjustment of theoretical variograms from experimental data represented graphically and according to the degree of spatial dependency detected (Cortés-D *et al.* 2016).

Projects developing similar analysis methodologies have been developed for other cultivars and different soil and climate conditions, allowing this methodology to be validated according to the variation of soil properties depending on the particular production conditions, such as the results highlighted in the

project “Metodología de Manejo por Sitio Específico de un suelo con vocación agrícola, a partir de análisis de variabilidad espacial de parámetros físicos - mecánicos e hidrodinámicos”, as a basis for testing Site-Specific Management methodologies, developed by the authors of this article.

The objective of this study was to build and validate a spatial analysis methodology for penetration resistance and soil infiltration. As a case study, the spatial variation of these properties was evaluated for an instant or moment within a productive cycle of the Feijoa (*Acca sellowiana*) crop, for a period defined for the investigation.

## MATERIALS AND METHODS

It is intended to discriminate the stages that were designed and implemented to establish the spatial correlation between the RP and the infiltration of water in the soil.

**Design and construction of the methodology.** The stages developed and that make up the advanced methodological structure are described below.

Preliminary stage. Definition of parameters to be evaluated: Infiltration and Resistance to Penetration, then the definition of a sampling mesh (40 x 40 m). After that, enlistment of equipment required for the measurement of parameters:

- a) Double infiltrometer rings height 0.4 m, internal diameter 0.2 m, external diameter 0.4 m.
- b) Spectrum technologies, Inc. brand penetrometer, number 6120 (4 depths).

Parameter measurement stage. Establishment of sampling mesh in the field, then georeferencing of sampling nodes, according to the variable to evaluate, including:

1. Soil sampling at two depths (0.07 m and 0.15 m) using the ring method with known volume: 0.07 m high x 0.05 m diameter.
2. Penetration resistance measurement for four defined depths. RP1: 0.08 m; RP2: 0.15 m; RP3: 0.23 m; RP4: 0.30 m. The maximum root depth of the crop was estimated in 0.50 m.
3. Development of infiltration tests with double ring infiltrometers, with a duration of 60 minutes per test.

Data organization and processing stage. Generation of captured data tables with the physical variables of the soil and resistance to penetration, then processing of infiltration data with adjustment to empirical models: Kostiakov, Kostiakov – Lewis and Philip, and generation of associated parameters. After that obtain input parameters per node including consolidated and georeferenced data (according to the number of variables to be evaluated per sampling point), then input consolidated data (*.csv file*) for processing in QGIS v. 2.18.28 with data matrix organized with geographic

coordinates (*.csv file*). After that generation of individual output files “shape” (*.shp*) with the information of nodes and polygon of the lot. It needs transformation to planar coordinates and generation of the independent output file for nodes and polygon of the lot area. Then load shapefiles (*.shp*) into Rstudio, starting with the information for each node. Finally, a script for processing in Rstudio by variable, with tabulated and graphical results.

- a) Descriptive statistics by variable.
- b) Empirical variograms by variable.
- c) Adjustment to theoretical variograms by variable. Visual method to adjust experimental data based on saddle data, nugget effect, and range, as well as the degree of spatial dependence (GDE).
- d) Generation of contour maps by variable (Cortes-D. *et al.* 2018). i) Selection of the best fit theoretical variogram model based on the saddle data, nugget effect, and range, as well as the degree of spatial dependence (GDE). ii) Generation of temporary graphical output of the contour map. iii) Generation of graphical output of the interpolation variance map, articulated with the Kriging Interpolation Incidence (KI) (Table 1; Table 2). iv) Visual verification of the homogeneity of the interpolation variance, on an individual variance map. v) Process iteration if the selected variogram generates a high interpolation variance. vi) Generation of source code for printing definitive maps.

**Analysis of results.** Start with the generation of tables with the best fit theoretical variance models, then a presentation of contour maps with variables that showed spatial dependence. After that the analysis of variables that showed a degree of spatial dependence (DSD), as well as those that showed a nugget effect. Finally, a presentation of variance maps of the Kriging interpolations was selected and identified as the “best fit”.

**Experimental zone.** The research was developed in the El Cortijo farm where previous studies have been carried out as the work of García *et al.* (2008), the farm is located in the rural area of the municipality of La Vega, Cundinamarca, Colombia (4°55'16.89" N, 74°17'29.98" W). The property is located at an altitude of 2,352 m and is part of the Sabaneta River Sub-basin with clay loam texture without the apparent effect of compaction, an area destined for the production of feijoa, which is a species of perennial fruit of the Myrtaceae family (Parra-Coronado *et al.* 2018). According to data from the Sabaneta Ordinary Climatological Station (code 2306510), the average annual temperature does not suffer great variability, ranging between 12.4 and 14.8 °C, an average annual rainfall of 1442.8 mm, an average annual relative humidity of 83%, and 1,377 hours of annual sunshine (CAR, 2014). According to Holdridge's classification system, the “life zone” is called “Lower Montane Very Humid Forest (Bmh – MB).

Table 1. Selection of theoretical variance models for the hydrodynamic and physical parameters of the soil.

Variable	Model	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Range (m)	C/(C0+C)	KII
ib	Gau	61.7900	412.0000	37.0	0.850	*
	Ste	61.7900	412.0000	37.0	0.850	+
	Sph	61.7900	195.0000	40.0	0.683	+
	Mat	61.7900	195.0000	40.0	0.683	+
b	Gau	0.0130	0.0220	37.0	0.409	*
	Ste	0.0130	0.0220	37.0	0.409	+
	Bes	0.0130	0.0220	37.0	0.409	+
	Mat	0.0130	0.0220	37.0	0.409	+
n	Gau	4.0900	39.0700	40.0	0.895	*
	Sph	4.0900	16.8200	37.0	0.757	+
	Ste	4.0900	14.2000	43.0	0.712	+
	Bes	4.0900	16.8200	37.0	0.757	+
Da	Gau	0.0005	0.0074	40.0	0.932	*
	Mat	0.0005	0.0026	37.0	0.808	+
	Exp	0.0005	0.0026	37.0	0.808	+
	Ste	0.0005	0.0019	43.0	0.737	+

\* Homogeneity in the variance of the Kriging interpolation; + Heterogeneity in the variance of the Kriging Interpolation; C/(0+C): Degree of spatial dependence; Ste: Mater Stein parameterization; Nug: Pure nugget effect; Exp: Exponential; Bes: Bessel; Hol: Hole; Gau: Gaussian; Wav: wave; Exc: Exponential class; Sph: Spherical; Rug: Matron; KII: Kriging Incidence Interpolation; ib: basic infiltration; Ks: Saturated hydraulic conductivity; S: Sortivity; a, b: Kostiaikov model empirical parameter; Da: bulk density; n: total porosity.

Table 2. Selection of theoretical variance models for the physical-mechanical parameters of the soil.

Variable	Model	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Range (m)	C/(C0+C)	KII
RP1	Gau	0.0098	0.390	43.0	0.975	*
	Sph	0.0098	0.380	37.0	0.974	+
	Bes	0.0098	0.330	40.0	0.970	+
	Ste	0.0098	0.330	40.0	0.970	+
RP2	Gau	0.2380	0.620	43.0	0.616	*
	Sph	0.2380	0.490	40.0	0.514	+
	Mat	0.2380	0.490	40.0	0.514	+
	Ste	0.2380	0.490	40.0	0.514	+
RP3	Gau	0.0010	0.270	40.0	0.996	*
	Sph	0.0010	0.190	36.0	0.995	+
	Ste	0.0010	0.140	43.0	0.993	+
	Exp	0.0010	0.140	43.0	0.993	+
RP4	Gau	0.0610	2.300	37.0	0.973	*
	Sph	0.0610	1.130	43.0	0.946	+
	Bes	0.0610	1.130	43.0	0.946	+
	Ste	0.0610	0.340	40.0	0.821	+

\* Homogeneity in the variance of the Kriging interpolation; + Heterogeneity in the variance of the Kriging interpolation; C/(C0+C): Degree of spatial dependence; Ste: Mater Stein parameterization; Nug: Pure nugget effect; Exp: Exponential; Bes: Bessel; Hol: Hole; Gau: Gaussian; Sph: Spherical; Mat: Matron; KII: Kriging Incidence Interpolation; RP1: Penetration Resistance at depth 0.08 m; RP2: Penetration Resistance at depth 0.15 m; RP3: Penetration Resistance at depth 0.23 m, RP4: Penetration Resistance at depth 0.30 m.

**Measurement of variables and sampling.** For data collection, sampling nodes were defined forming a rectangular grid of 40 m x 40 m, to cover an area of 1.36 ha, with repetition in data capture. Penetration resistance was determined with a Spectrum technology, Inc. brand penetrometer (Duffera *et al.* 2007), number 6120, for four defined depths (RP1, RP2, RP3, RP4): 0.0762 m (7.62 cm), 0.1524 m (15.24 cm), 0.2286 m (22.86 cm), 0.3048 m (30.48 cm), associated with different effective root depths of a feijoa crop. Infiltration was determined through the use of double-ring infiltrometers (Orjuela-Matta *et al.* 2010; Kroulík *et al.* 2007) of 0.2 m and 0.40 m in internal and external diameter, and a height of 0.4 m, for 60 min, maintaining a constant pressure head, guaranteeing application rates in the state stable.

**Analysis of data.** Before spatial analysis, the captured infiltration data were fitted to the Kostiakov, Kostiakov – Lewis and Philip empirical models (Haghighi Fashi *et al.* 2014). The main hydrodynamic variables analyzed with univariate Geostatistics were the saturated hydraulic conductivity (Ks) of the Philip model (Shiraki *et al.* 2019), parameters “a” and “b” of the Kostiakov model, basic infiltration (ib) of the Kostiakov - Lewis model (Orjuela-Matta *et al.* 2012), and the “sorptivity” (S) of the Philip model (Sihag *et al.* 2018).

For all the data, experimental variograms were generated, based on the definitions established in the theory of regionalized variables, using the general expression (Da Silva Martins *et al.* 2010):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

The experimental data, the adjustment to theoretical variograms, the Ordinary Kriging Interpolation, and the generation of the contour and variance maps per parameter, were developed integrally with the Rstudio v. 1.1.456 (RStudio Team, 2018), which operates as an interface to the R v. 3.6.1 (R Core Team, 2018). The fit to the variance models was based on the analysis of the coefficients the Nugget Effect (C0), the Sill (C0+C), and the Range (a). In addition, the degree of spatial dependence (DSD) will be extended for each variable from the relationship between the sill and the nugget effect (C/(C0+C)), classifying it as strong, when DSD>75 %, moderate for DSD between 25 % and 75 %, and weak, if DSD<25 % (Cortés-D *et al.* 2016), with special attention when pure nugget effect occurs.

With the selection of the best fit theoretical variogram, the Ordinary Kriging technique was implemented to advance predictions in the non-sampled regions of the lot, generating a graphic environment of the contour maps by variable, together with variance maps, allowing to analyze the reliability and degree of interpolation adjustment.

## RESULTS AND DISCUSSION

The maximum Euclidean distance of the sample, considered for the construction of the variograms, was 45 m, and a range between 35

m and 45 m was estimated for each of the variables evaluated, which represents the univariate spatial dependence of this lot. The foregoing represents that the sampling distance from the implemented methodology and analysis is within the initially selected range, failing a variation of georeferenced demonstration points between 35 m and 45 m, with utility for future tests, and in that same range existence spatial dependence for each parameter evaluated.

The parameters for the variable's basic infiltration (ib), porosity (n), and bulk density (Da), which were used to generate the strong spatial dependence models, are recorded in table 1. These other variables were used for checking the relations between penetration resistance and infiltration.

The RP1 variable suggests a moderate compaction trend (Figure 1) in the areas with less slope (Figure 2) of the terrain, which suggests a region with a sufficient root growth condition, while RP2 does not show an apparent densification process, indicating for this depth good conditions for root development. Variables RP3 and RP4 (Figure 1; Table 2), suggest the incidence of compaction in the peripheral area and the middle north third of the lot, independent of the variations in the slope of the land. The results for these variables point to a condition of sufficient root growth (RP3) and a condition of poor root development (RP4), according to the description in the user manual of the penetrometer used (ranges). This behavior was considered comparable for plots with similar slopes in the same site. Analog studies with the relation between compaction and slope have been reported previously to assess problems associated with soil compaction and root growth (Rodríguez-Vásquez *et al.* 2008).

When comparing these latest results with the basic infiltration rates, it is estimated that *ib* decreases between 76 % and 82 %, in these areas, which coincides with what was published by (Chyba *et al.* 2014), although it is noteworthy that the authors evaluated the incidence of machinery traffic on the infiltration of water into the soil, using the cone index parameter. Low infiltration rates suggest a water deficit, which could promote negative effects on processes such as photosynthesis, respiration, growth, and metabolic reactions of feijoa (Peña Baracaldo & Cabezas Gutiérrez, 2014). In this case, the densification processes at these depths (RP3 and RP4) are argued because the crop has an establishment age of 15 years, which implies that the soil has not suffered mechanical alterations since sowing with machinery but if it has had anthropic effects of usual soil management for the maintenance of the crop. In addition, cultural practices are developed manually because the lot has an average slope of 25 %, in a scheme of the high density of trees with a separation between plants of 2.5 m and separation between rows of 4.0 m (García *et al.* 2008), making mechanized work difficult.

The results of RP1, RP2, RP3, and RP4 (Table 2) indicate that the spatial dependence of the cone index or penetration resistance increases as the sample is deepened (Chyba *et al.* 2017), in this case suggesting a densification proportional to the analyzed depth because of the cultural practices developed for the establishment and management of the crop.

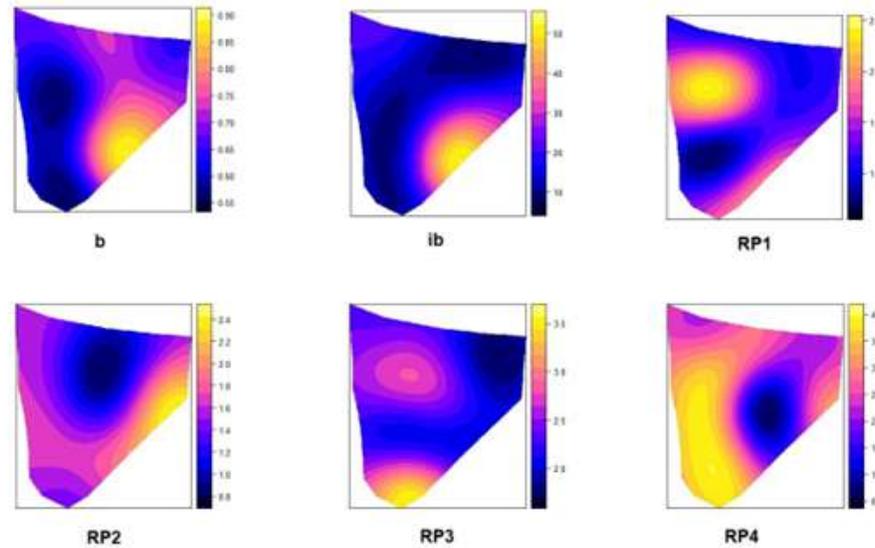


Figure 1. Contour maps generated from the Ordinary Kriging interpolation for the variables resulting from infiltration and resistance to penetration. Kostiakov parameter (b), basic infiltration (ib) in  $\text{cm h}^{-1}$ , penetration resistance for four depths (RP1, RP2, RP3, RP4) in MPa.

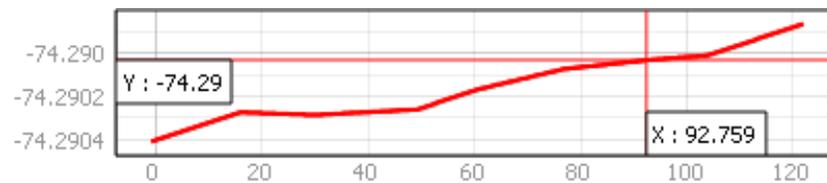


Figure 2. The topographic profile of the lot is evaluated on the orientation of the greatest slope (width of the lot, West-East direction).

Similar results for the compaction analysis in oxisol soils without the use of agricultural machinery report an increase in soil densification as a function of depth, suggesting a relation with the cultural practices (Camacho-Tamayo *et al.* 2013), particularly if the soils do not have evidence of the use of tillage activities (Cortez *et al.* 2018).

The proposed methodology offers the alternative of integrated processing in a single script, reducing the time to generate results, necessary to project a site-specific management implementation on land with variable slope, by identifying the dynamics between infiltration and penetration resistance, demonstrating the reliability to establish the relationships of spatial dependence between the physical and mechanical characteristics of the terrain.

Researchers such as Rodríguez-Vásquez *et al.* (2008), related the variation of infiltration in soil with spatial variations of bulk density. In fact, bulk density is a variable with a high correlation with RP (Table 1; Table 2). This variable was analyzed in the present study but as the dependent variable of infiltration and penetration

resistance and verified to DSD “moderate to strong” which results in a definition for new separations sampling used to represent the contour maps, it means new sampling to 45m.

It was shown that in long-lived perennial crops such as feijoa, the spatial distribution of soil attributes such as penetration resistance and infiltration are particularly due to natural densification processes. Alterations in the infiltration rate point to the presence of compact zones for different depths, confirmed by the changes detected in penetration resistance according to variations in-depth, a condition that could influence the heterogeneity of physiological and productive development, validated with verification of bulk density, as a variable in space (Table 1).

The proposed methodology has the option of replicating itself parallel to other agronomic planning activities associated with the crop, although for these soil characteristics (physical, chemical, and microbiological), it is suggested to reduce the sampling separations to increase the probability of establishing a degree of spatial dependence on a greater number of parameters. Larger sampling

separations while maintaining spatial dependency allow a reduction of processing and analysis times for future studies, although this depends on the soil characteristics.

The processing methodology is an alternative to represent the spatial variation through contour maps of the different parameters of soil as a base for planning agronomic activities. It is necessary to find the range of separation sampling combining the variables analyzed to understand different times or moments related to the crop cycle because each parameter could change the spatial dependence according to the dynamic of water in soils. This study had this limitation because it was analyzed in one moment.

### Acknowledgments

The project was developed with funding from Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U. D. C. A, between 2020 and 2021. Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

## REFERENCES

1. ALESSO, C.A.; CIPRIOTTI, P.A.; MASOLA, M.J.; CARRIZO, M.E.; IMHOFF, S.C.; ROCHA-MENESES, L.; ANTILLE, D.L. 2020. Spatial distribution of soil mechanical strength in an controlled traffic farming system as determined by cone index and geostatistical techniques. *Agronomy Research*. 18(2):1115-1126. <https://doi.org/10.15159/AR.20.133>
2. CAMACHO-TAMAYO, J.H.; RUBIANO SANABRIA, Y.; SANTANA, L.M. 2013. Management units based on the physical properties of an Oxisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4):767-785. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000061>
3. CHYBA, J.; KROULÍK, M.; KRIŠTOF, K.; MISIEWICZ, P.A. 2017. The influence of agricultural traffic on soil infiltration rates. *Agronomy Research*. 15(3):664-673.
4. CHYBA, J.; KROULÍK, M.; KRIŠTOF, K.; MISIEWICZ, P.A.; CHANEY, K. 2014. Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland. *Agronomy Research*. 12(1):59-64.
5. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR. 2014. Distrito de Manejo Integrado DMI Cuchilla el Chuscal. CAR (Bogotá, D.C.). Available from Internet in: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac7a3db83e23.pdf> (con acceso 07/2020)
6. CORTÉS-D., D.L.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; GIRALDO, R. 2016. Spatial prediction of soil penetration resistance using functional geostatistics. *Scientia Agricola*. 73(5):455-461. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0113>
7. CORTES-D., D.L.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; GIRALDO, R. 2018. Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*. 53(2):149-155. <https://doi.org/10.14712/23361980.2018.15>
8. CORTEZ, J.W.; DA S. MATOS, W.P.; ARCOVERDE, S.N.S.; CAVASSINI, V.H.; VALENTE, I.Q.M. 2018. Spatial variability of soil resistance to penetration in no tillage system. *Engenharia Agricola*. 38(5):697-704. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n5p697-704/2018>
9. DA SILVA MARTINS, A.L.; GOMES DE MOURA, E.; CAMACHO TAMAYO, J.H. 2010. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. *Ingeniería e Investigación*. 30(2):116-123. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v30n2.15742>
10. DUFFERA, M.; WHITE, J.G.; WEISZ, R. 2007. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. *Geoderma*. 137(3-4):327-339. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.018>
11. FASINMIRIN, J.T.; OLORUFEMI, I.E.; OGUNTUNDE, P.G.; REICHERT, J.M. 2018. Hydraulic Conductivity and Penetration Resistance of a Tropical Rainforest Alfisol under Different Land Uses in Akure, Southwestern Nigeria. *Journal of Experimental Agriculture International*. 27(6):1-12. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/12690>
12. GARCÍA, O.J.; DUEÑEZ, E.Y.; FISCHER, G.; CHAVES, B.; QUINTERO, O.C. 2008. Efecto del nitrato de potasio, fosfato de potasio y ethephon en la inducción floral de la Feijoa o Goiabeira Serrana (*Acca sellowiana* [O. Berg] Burret). *Revista Brasileira de Fruticultura*. 30(3):577-584. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000300003>
13. GEBLER, L.; GRECO, C.R.; VIEIRA, A.L.; DA R. KUSE, L. 2015. Spatial influence of physical and chemical parameters on management zone definition in apple orchards. *Engenharia Agricola*. 35(6):1160-1171. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1160-1171/2015>
14. GUIMARÃES, R.M.L.; BALL, B.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; DA SILVA, A.P. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil and Tillage Research*. 127:92-99. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>
15. HAGHIGHI FASHI, F.; SHARIFI, F.; KAMALI, K. 2014. Modeling infiltration and geostatistical analysis of spatial variability of sorptivity and transmissivity in a flood spreading

- area. Spanish Journal of Agricultural Research. 12(1):277-288. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014121-4659>
16. HUMMEL, J.W.; AHMAD, I.S.; NEWMAN, S.C.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T. 2004. Simultaneous soil moisture and cone index measurement. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 47(3):607-618.
  17. KROULÍK, M.; HŮLA, J.; ŠINDELÁŘ, R.; ILLEK, F. 2007. Water infiltration into soil related to the soil tillage intensity. Soil and Water Research. 2(1):15-24. <https://doi.org/10.17221/2098-SWR>
  18. MACHIWAL, D.; JHA, M.K.; MAL, B.C. 2006. Modeling Infiltration and quantifying spatial variability in a wasteland of Kharagpur, India. Biosystems Engineering. 95(4):569-582. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007>
  19. MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; CORTÉS, C.A. 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. Engenharia Agrícola. 32(1):91-101. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100010>
  20. ORJUELA-MATTA, H.; RUBIANO-SANABRIA, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2010. Comportamiento de la infiltración en un Oxisol. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 13(2):31-39. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.726>
  21. ORJUELA-MATTA, H.M.; RUBIANO-SANABRIA, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2011. Spatial variability of hydrodynamic parameters in the native savanna of the Colombian Eastern plains. Agronomía Colombiana. 29(1):83-90.
  22. ORJUELA-MATTA, H.M.; RUBIANO SANABRIA, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2012. Spatial analysis of infiltration in an oxisol of the eastern plains of Colombia. Chilean Journal of Agricultural Research. 72(3):404-410. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000300015>
  23. PARRA-CORONADO, A.; FISCHER, G.; CAMACHO-TAMAYO, J. 2018. Post-harvest quality of pineapple guava [*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret] fruits produced in two locations at different altitudes in Cundinamarca, Colombia. Agronomía Colombiana. 36(1):68-78. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n1.68577>
  24. PEÑA BARACALDO, F.J.; CABEZAS GUTIÉRREZ, M. 2014. Aspectos ecofisiológicos de la Feijoa (*Acca sellowiana* Berg) bajo condiciones de riego y déficit hídrico. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 17(2):381-390. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.241>
  25. R CORE TEAM. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available from Internet in: <https://www.R-project.org/>
  26. RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, A.F.; ARISTIZÁBAL-CASTILLO, A.M.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2008. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de philip y kostiakov en un suelo ándico. Engenharia Agrícola. 28(1):64-75.
  27. RSTUDIO TEAM. 2018. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc. (Boston, MA). Available from Internet in: <http://www.rstudio.com/>
  28. SCHOSSLER, T.R.; CAMPOS MANTOVANELLI, B.; GOMES DE ALMEIDA, B.; FREIRE, F.J.; MESQUITA DA SILVA, M.; CABRAL DE ALMEIDA, C.D.G.; DOS SANTOS FREIRE, M.B.G. 2019. Geospatial variation of physical attributes and sugarcane productivity in cohesive soils. Precision Agriculture. 20:1274-1291. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09652-y>
  29. SHIRAKI, S.; KYAW THU, A.; MATSUNO, Y.; SHINOGLI, Y. 2019. Evaluation of infiltration models and field saturated hydraulic conductivity in situ infiltration tests during the dry season. Paddy and Water Environment. 17:619-632. <https://doi.org/10.1007/s10333-018-00688-w>
  30. SIHAG, P.; TIWARI, N.K.; RANJAN, S. 2018. Performance evaluation of infiltration models. Journal of Indian Water Resources Society. 38(1):11-24.



# Doble cuarto arco aórtico persistente en un perro (*Canis familiaris*): reporte de caso

## Persistent double aortic arch in a dog (*Canis familiaris*): A case report

Jordi Eisenhower Hernández-Pinilla<sup>1\*</sup> ; Edwin Fernando Buriticá-Gaviria<sup>2</sup> ; Diego Fernando Echeverry-Bonilla<sup>2</sup> ;  
John Yeiber Rengifo-Herrera<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad del Tolima, Ibagué - Tolima, Colombia; e-mail: jehernandez@ut.edu.co; jyrengifoh@ut.edu.co

<sup>2</sup>Universidad del Tolima, Grupo de Investigación en Medicina y Cirugía de Pequeños Animales. Ibagué - Tolima, Colombia; e-mail: efburiticag@ut.edu.co; decheverry@ut.edu.co

**Cómo citar:** Hernández-Pinilla, J.E.; Buriticá-Gaviria, E.F.; Echeverry-Bonilla, D.F.; Rengifo-Herrera, J.Y. 2022. Doble cuarto arco aórtico persistente en un perro (*Canis familiaris*): reporte de caso. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2310. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2310>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** febrero 4 de 2022

**Aceptado:** julio 22 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El doble arco aórtico persistente es una patología caracterizada por anomalías embrionarias en la vascularización, que pueden afectar de manera indirecta a otros sistemas, como el digestivo y el respiratorio. El objetivo de este documento es reportar un caso de doble arco aórtico, persistente en un cachorro Bull terrier, de seis meses de edad. El paciente ingresó a consulta por motivo de regurgitaciones frecuentes y pérdida ponderal. En el estudio radiográfico, se evidenció dilatación esofágica craneal a la base del corazón y en la toracotomía, se confirmó un doble arco aórtico persistente. Se realizó manejo nutricional y posteriormente, corrección quirúrgica de la anomalía vascular. Este es el primer caso de una anomalía de este tipo en Colombia. Se concluye, que un manejo quirúrgico enfocado a liberar el anillo estenosante y a recuperar la función esofágica, son la base terapéutica de este tipo de alteraciones.

Palabras clave: Anomalía vascular; Enfermedades de los perros; Defecto congénito; Megaesófago; Toracotomía.

### ABSTRACT

Persistent double aortic arch is a pathology characterized by embryonic vascularization anomalies, which can indirectly affect

other systems such as the digestive and respiratory systems. The objective of this document is to report a case of persistent double aortic arch in a six-month-old Bull Terrier puppy. The patient was admitted for consultation due to frequent regurgitation and weight loss. The radiographic study revealed cranial esophageal dilation at the base of the heart, and a thoracotomy confirmed a persistent double aortic arch. Nutritional management was performed and subsequently, surgical correction of the vascular anomaly. This is the first case of an anomaly of this type in Colombia. It is concluded that surgical management focused on releasing the stenosing ring and recovering esophageal function are the therapeutic basis for this type of alteration.

Keywords: Congenital defect; Megaesophagus; Dog diseases; Thoracotomy; Vascular anomaly.

### INTRODUCCIÓN

El doble arco aórtico persistente es considerado una patología congénita, caracterizada por una anomalía en el desarrollo de la vascularización aórtica (Morgan & Bray, 2019). Se presenta por anomalías en el desarrollo embriológico del III, IV o VI arco aórtico, de los cuales, resultan uno o dos vasos sanguíneos que rodean el esófago y la tráquea (Ricardo *et al.* 2001), causando un

atrapamiento de estas estructuras, lo que se puede ver reflejado, clínicamente, en regurgitación postprandial en cachorros, poco tiempo después del destete (Buchanan, 2004; Kim *et al.* 2006). Otros de los signos clínicos reportados son neumonía por aspiración en cachorros en el periodo postdestete y baja condición corporal (Bottorff & Sisson, 2012).

Algunas de las herramientas para la aproximación diagnóstica de esta enfermedad son la radiografía, donde se puede observar dilatación esofágica craneal a la base del corazón; sin embargo, la angiografía selectiva, fluoroscopia, radiología con contraste, (House *et al.* 2005) y la tomografía axial computarizada, son también utilizadas para el diagnóstico de esta enfermedad (Bottorff & Sisson, 2012). La corrección de esta anomalía es de tipo quirúrgico mediante toracotomía, siendo su objetivo principal la descompresión esofágica, por lo que se considera una herramienta paliativa mas no curativa, en la mayoría de los casos (Ricardo *et al.* 2001).

Esta patología es poco frecuente en el perro y se considera que representa menos del 1 % de las anomalías del anillo vascular (Du Plessis *et al.* 2006), siendo la persistencia del arco aórtico derecho la más diagnosticada, ocupando el 95 % de la casuística, en este tipo de alteraciones (Ricardo *et al.* 2001; Buchanan, 2004). Entre las razas más afectadas por el doble arco aórtico, se encuentra el pastor alemán y el setter irlandés (Du Plessis *et al.* 2006). Debido a

su baja prevalencia, existen pocos casos descritos de esta patología, por consiguiente, el objetivo del presente artículo es reportar un caso de un doble arco aórtico persistente, en un cachorro de la raza Bull terrier.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Un cachorro de seis meses de edad, de la raza Bull terrier fue ingresado al área de consulta de la clínica de pequeños animales de la Universidad del Tolima, con un cuadro clínico de regurgitación progresiva, justo después de la alimentación, con evolución de tres meses, pérdida ponderal sin inapetencia reportada y retardo en el crecimiento.

Al examen físico, no se evidenciaron alteraciones clínicas evidentes. El hemograma, así como también el perfil hepatorenal, tuvieron todos los parámetros en el rango normal para la especie. Al estudio radiográfico contrastado, se encontró dilatación esofágica craneal a la bifurcación de la tráquea, sobre la base del corazón y con pérdida abrupta del paso del contraste al esófago distal (Figura 1). Estos hallazgos fueron compatibles con una anomalía del anillo vascular, por lo que se decidió realizar un abordaje quirúrgico correctivo, mediante toracotomía izquierda, a la altura del cuarto espacio intercostal.

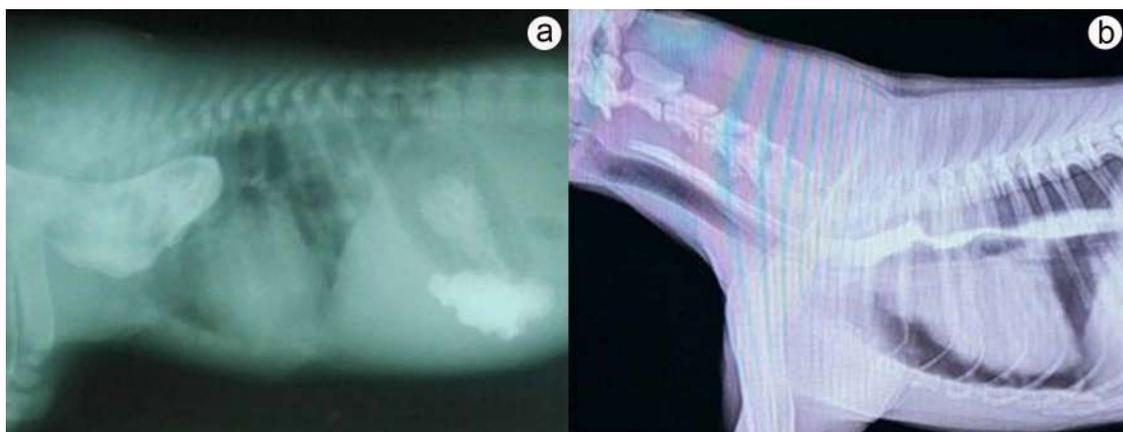


Figura 1. Radiografía torácica latero lateral prequirúrgica y postquirúrgica. Esofagograma con contraste de papilla de bario, realizada antes del procedimiento quirúrgico; notar la obstrucción y dilatación esofágica craneales a la altura de la bifurcación de la tráquea a) control radiográfico dos semanas posteriores a la corrección quirúrgica; b) observar el paso del contraste, luego de liberada la obstrucción.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las enfermedades congénitas de los grandes vasos ocupan un variado número de condiciones, tanto en animales como en seres humanos. Algunas de ellas suponen un riesgo vital para el paciente que las padece.

Para comprender las dismorfias relacionadas con anillo vascular es necesario entender la angiogénesis del arco aórtico. En el feto, se forman seis pares de arcos aórticos, los cuales, rodean la faringe embrionaria; durante la maduración, algunos van involucionando, como es el caso del primero, segundo y quinto; por otra parte, los

terceros forman las arterias carótidas internas; el cuarto arco aórtico derecho forma la parte craneal de la arteria subclavia derecha, mientras que el izquierdo forma el arco aórtico del animal adulto y, por último, el sexto arco aórtico forma las arterias pulmonares (Bottorff & Sisson, 2012).

Con base en lo anterior, las anomalías del anillo vascular, se dan cuando hay un desarrollo defectuoso en el tercero, cuarto o sexto arco aórtico (Helphrey, 1979). Se han descrito cuatro patrones principales (Joly *et al.* 2008) de dichas anomalías en el perro, que se clasifican, como tipo 1, el cual, es un arco aórtico derecho y ligamento arterioso izquierdo persistentes; tipo 2, formado por un

arco aórtico derecho persistente y una arteria subclavia izquierda aberrante; tipo 3, caracterizado por un arco aórtico derecho persistente, junto con ligamento arterioso izquierdo y arteria subclavia izquierda aberrantes, lo que puede generar dos sitios de compresión y tipo 4, en relación a un arco aórtico doble, en donde ambos arcos aórticos persisten y rodean al esófago y la tráquea y se anastomosan para formar la aorta descendente.

Como se describió anteriormente, el doble arco aórtico genera compresión de la tráquea y esófago y causa el principal signo clínico, que es la regurgitación (VanGundy, 1989; House *et al.* 2005), que presentaba el paciente, junto con pérdida de peso, además de los hallazgos radiológicos, como dilatación y obstrucción esofágica craneal a la base del corazón, características que coinciden con esta patología (Kim *et al.* 2006).

La regurgitación es el signo principal de esta enfermedad, debido a que ambos vasos sanguíneos rodean el esófago (VanGundy, 1989; House *et al.* 2005), lo que conlleva a alteraciones en el transporte del alimento y a la posible presentación de un megaesófago, situación que presentó el paciente. Dicha patología presenta disfunciones alimentarias, impidiendo que el animal alcance su requerimiento nutricional, lo que genera la pérdida progresiva de peso (McBrearty *et al.* 2011). De igual manera, puede conducir a cuadros respiratorios, producto de eventos repetitivos de broncoaspiración (Kim *et al.* 2006), razones, por lo cual, el pronóstico es desfavorable, con un tiempo de supervivencia de uno a tres meses, después de ser diagnosticados (McBrearty *et al.* 2011; Nakagawa *et al.* 2019).

La radiografía es una herramienta de aproximación diagnóstica para esta patología, como se describió y es común encontrar una dilatación esofágica craneal a la base del corazón, en anomalías del anillo vascular (House *et al.* 2005; Kim *et al.* 2006). En el caso de la persistencia del arco aórtico derecho, se describe un signo radiográfico patognomónico, caracterizado por un desplazamiento de la parte torácica de la tráquea hacia la izquierda (VanGundy, 1989; House *et al.* 2005); sin embargo, esto no se evidenció en el estudio radiográfico del paciente, lo que podía contribuir como base para considerar otra patología del anillo vascular. El diagnóstico definitivo, se realiza por medio de angiografía o exploración quirúrgica (VanGundy, 1989; House *et al.* 2005; Bottorff & Sisson, 2012).

Otras herramientas diagnósticas son utilizadas, como la endoscopia, que aporta el grado de dilatación y constricción esofágica (House *et al.* 2005). Por otra parte, la fluoroscopia puede identificar zonas con daño esofágico usando bario vía oral junto con el esofagograma, que además ayuda a evaluar la motilidad esofágica (House *et al.* 2005). Dichas consideraciones deben ser tenidas en cuenta, ya que fracasos post quirúrgicos se deben, principalmente, a la persistencia de la dilatación esofágica, lo que genera la permanente regurgitación. Recientemente, se describieron los angiogramas por tomografía axial computarizada, como una herramienta de bastante utilidad para el diagnóstico de anomalías del anillo vascular (Saunders *et al.* 2013; Dundie *et al.* 2017; Yoon *et al.* 2018), permitiendo, incluso, imprimir modelos 3D, que contribuyen a la planeación quirúrgica de dichas anomalías (Dundie *et al.* 2017).

El tratamiento definitivo para los animales con un anillo vascular anómalo es la ligadura quirúrgica y división de una parte del anillo vascular (House *et al.* 2005); sin embargo, antes de realizar el procedimiento de corrección quirúrgica es necesario estabilizar al paciente, dado que, en la mayoría de los casos, los animales mueren o se realiza eutanasia, debido a las complicaciones durante el proceso (Ricardo *et al.* 2001). Esto se debe, en gran parte, a la baja condición corporal que se observa en estas patologías (House *et al.* 2005; Bottorff & Sisson, 2012) y al mal estado nutricional. En nuestro caso, a pesar que el animal presentaba una pérdida de peso progresiva, se logró una adecuada recuperación del estado corporal, mediante el suministro de dieta blanda a tiempos regulares, en lugares altos, en donde el perro no agache su cabeza para alimentarse, ya que reduce, considerablemente, los episodios de regurgitación, permitiendo, así, ganar condición corporal y aumentando las posibilidades de supervivencia posquirúrgica.

El abordaje quirúrgico más comúnmente usado es toracotomía exploratoria, por la cual, se incide a través del tercer o cuarto espacio intercostal (Morgan & Bray, 2019). En el caso del doble arco aórtico, se recomienda incidir ipsilateralmente al vaso más pequeño y menos permeable, con el fin de tener una mejor visibilidad para la ligadura y la resección (Du Plessis *et al.* 2006). En este caso, y una vez alcanzado el plano anestésico III, fue preparada asépticamente la piel del hemitórax izquierdo; paso seguido, se realizó bloqueo intercostal, mediante uso de una aguja espinal 22G de 31/2 pulgadas (Spinocan, B/Braun, Melsungen, Alemania), acoplada a una extensión anestésica y a una jeringa previamente cargada con 3 ml de bupivacaína (Bupirov® 0,5 %, Lab. Ropsohn Therapeutics Ltda, Bogotá, Colombia). La aguja, se introdujo a través de la piel, para luego ser dirigida hacia el aspecto caudal de la tercera, cuarta y quinta costilla.

A continuación, fue realizada toracotomía, a nivel del cuarto espacio intercostal izquierdo, para visualizar los componentes anatómicos involucrados. Durante el procedimiento quirúrgico fue observada una conformación vascular anómala que rodeaba el esófago, de la siguiente manera: hacia dorsal y laterales, se encontraba la aorta y hacia ventral, el esófago; la tráquea, por su parte, no estaba contenida en el anillo ocluidor (Figura 2). Estos hallazgos fueron compatibles con la presencia de un doble arco aórtico persistente. Durante el acto quirúrgico, se visualizó el componente aórtico minoritario (derecho) y se ocluyó mediante sutura quirúrgica monofilamento de polipropileno por ambos extremos, para luego ser seccionado.

Las bandas fibrosas ocluidoras periesofágicas fueron distendidas, mediante empleo de sonda Foley calibre 22 Fr, introducida vía esofágica hasta el sitio del defecto y su balón infundido, de manera repetitiva, con solución salina estéril, hasta liberar el paso del balón sin problema.

Posterior al abordaje quirúrgico y pasadas dos semanas, se realizó una radiografía control al paciente, donde se observó la resolución de la dilatación esofágica, con mejoría clínica evidente.

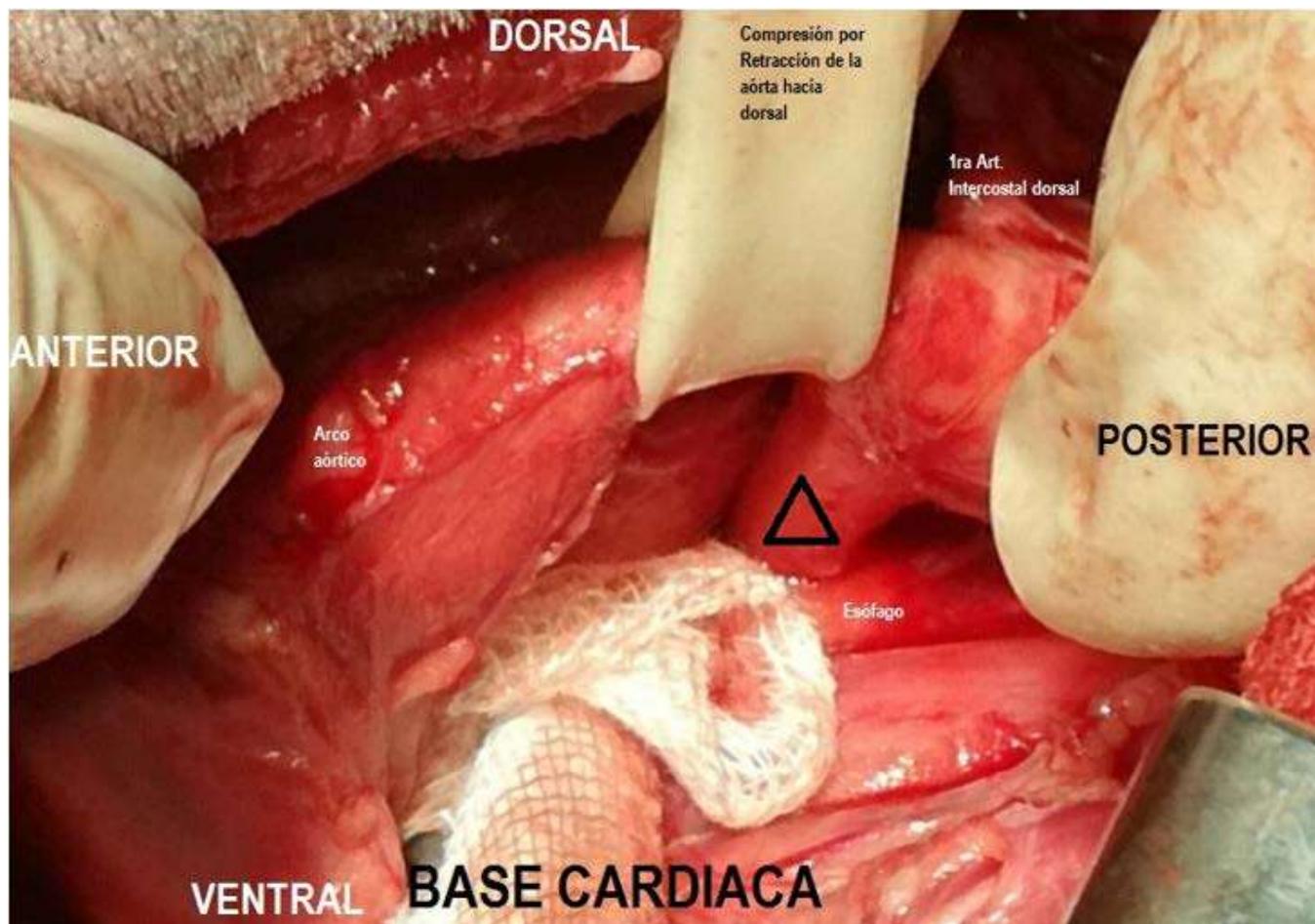


Figura 2. Imagen quirúrgica del doble arco aórtico persistente. Notar el vaso aórtico hacia lateral izquierdo y derecho del esófago. La figura triangular señala el vaso sanguíneo que fue seccionado.

La técnica quirúrgica es similar a la realizada para la corrección de cuarto arco aórtico derecho en perros, pero por tratarse de un vaso sanguíneo permeable, supone un riesgo hemodinámico mayor. El cierre de la herida intercostal fue realizado mediante confrontación de costillas cuarta y quinta; con cierre muscular y cutáneo, mediante patrón de sutura interrumpido.

La alimentación, se debe realizar en pequeñas comidas regulares después de la corrección, por un periodo de, al menos, seis semanas (House *et al.* 2005).

En conclusión, la persistencia de doble arco aórtico es una dismorfia poco descrita en la literatura, la cual, debe ser más profundamente estudiada por médicos veterinarios, con el fin de facilitar el diagnóstico en la clínica y aumentar el éxito quirúrgico, al corregir la obstrucción y constricción esofágica. De igual manera, es importante la estabilización del paciente antes de la intervención para la corrección de esta patología, con el propósito de disminuir las posibilidades de muerte o complicaciones durante el procedimiento y después de este, acompañado de la postura recomendada durante la alimentación, la cual, disminuye las regurgitaciones y contribuye a la mejora del estado nutricional del paciente, ya que permite un mejor paso del alimento por el tracto digestivo.

## REFERENCIAS

1. BOTTORFF, B.; SISSON, D. 2012. Hypoplastic aberrant left subclavian artery in a dog with a persistent right aortic arch. *Journal of Veterinary Cardiology* (Países Bajos). 14(2):381-385. <https://doi.org/10.1016/j.jvc.2012.01.013>
2. BUCHANAN, J.W. 2004. Tracheal signs and associated vascular anomalies in dogs with persistent right aortic arch. *Journal of veterinary internal medicine* (Estados Unidos). 18(4):510-514. <https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2004.tb02576.x>
3. DU PLESSIS, C.J.; KELLER, N.; JOUBERT, K.E. 2006. Symmetrical double aortic arch in a beagle puppy. *Journal of Small Animal Practice* (Estados Unidos). 47(1):31-34. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2006.00009.x>
4. DUNDIE, A.; HAYES, G.; SCRIVANI, P.; CAMPOY, L.; FLETCHER, D.; ASH, K.; OXFORD, E.; MOÏSE, N.S. 2017. Use of 3D printer technology to facilitate surgical correction of a complex vascular anomaly with esophageal

- entrapment in a dog. *Journal of Veterinary cardiology (Países Bajos)*. 19(2):196-204.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvc.2016.10.003>
5. HELPHREY, M.L. 1979. Vascular ring anomalies in the dog. *The Veterinary clinics of North America. Small animal practice (Reino Unido)*. 9(2):207-218.  
[https://doi.org/10.1016/s0195-5616\(79\)50030-8](https://doi.org/10.1016/s0195-5616(79)50030-8)
6. HOUSE, A.K.; SUMMERFIELD, N.J.; GERMAN, A.J.; NOBLE, P.J.M.; IBARROLA, P; BROCKMAN, D.J. 2005. Unusual vascular ring anomaly associated with a persistent right aortic arch in two dogs. *Journal of Small Animal Prac-tice (Estados unidos)*. 46(12):585-590.  
<https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2005.tb00291.x>
7. JOLY, H.; D'ANJOU, M.A.; HUNEAULT, L. 2008. Imaging diagnosis-CT angiography of a rare vascular ring anomaly in a dog. *Veterinary Radiology & Ultrasound (Reino Unido)*. 49(1):42-46.  
<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2007.00315.x>
8. KIM, N.S.; ALAM, M.R.; CHOI, I.H. 2006. Persistent right aortic arch and aberrant left subclavian artery in a dog: a case report. *Veterinarni Medicina (República Checa)*. 51(4):156-160.
9. MCBREARTY, A.R.; RAMSEY, I.K.; COURCIER, E.A.; MELLOR, D.J.; BELL, R. 2011. Clinical factors associated with death before discharge and overall survival time in dogs with generalized megaesophagus. *Journal of the American Veterinary Medical Association (Estados Unidos)*. 238(12):1622-1628.  
<https://doi.org/10.2460/javma.238.12.1622>
10. MORGAN, K.R.S.; BRAY, J.P. 2019. Current diagnostic tests, surgical treatments, and prognostic indicators for vascular ring anomalies in dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association (Estados Unidos)*. 254(6):728-733.  
<https://doi.org/10.2460/javma.254.6.728>
11. NAKAGAWA, T.; DOI, A.; OHNO, K.; YOKOYAMA, N.; TSUJIMOTO, H. 2019. Clinical features and prognosis of canine megaesophagus in Japan. *Journal of Veterinary Medical Science (Japón)*. 81(3):348-352.  
<https://doi.org/10.1292/jvms.18-0493>
12. RICARDO, C.; AUGUSTO, A.; CANAVESE, S.; MARCOS, A.; TICONA, E.; FERNANDES, M.; RITA, M.; SINGARETI, F. 2001. Double aortic arch in a dog (*Canis familiaris*): a case report. *Anatomia Histologia Embryologia (Reino unido)*. 30(6):379-381.  
<https://doi.org/10.1046/j.1439-0264.2001.00344.x>
13. SAUNDERS, A.B.; WINTER, R.L.; GRIFFIN, J.F.; THIE-MAN MANKIN, K.M.; MILLER, M.W. 2013. Surgical management of an aberrant left subclavian artery originat-ing from a left patent ductus arteriosus in a dog with a right aortic arch and abnormal branching. *Journal of veterinary cardiology (Países bajos)*. 15(2):153-159.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvc.2013.02.004>
14. VANGUNDY, T. 1989. Vascular ring anomalies. *Compendium on Continuing Education for the Practising Veterinarian*. 11(1):36-48.
15. YOON, H.; KIM, J.; KWON, G.B.; LIM, J.H.; EOM, K. 2018. Imaging diagnosis-computed tomographic angiography characteristics of multiple vascular anomalies in a senior dog with late-onset regurgitation. *Veterinary Radiology & Ultrasound (Reino Unido)*. 59(5):44-49.  
<https://doi.org/10.1111/vru.12483>



# Seroprevalencia de leptospirosis y brucelosis en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en Tierralta Córdoba, Colombia

## Seroprevalence of leptospirosis and brucellosis in water buffaloes (*Bubalus bubalis*) in Tierralta Cordoba, Colombia

Mariam Raquel-Montes<sup>1</sup> ; Merly Elena Zambrano<sup>1</sup> ; Alfonso Calderón-Rangel<sup>2\*</sup> ; Virginia Rodríguez-Rodríguez<sup>3</sup> ; Camilo Guzmán-Terán<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Córdoba, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: ventasvicar@vicar.com.co; mezave8611@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidad de Córdoba, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico (IIBT). Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: acalderonr@correo.unicordoba.edu.co

<sup>3</sup>Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias de la Salud, Programa de Bacteriología, Grupo de Investigaciones Microbiológicas y Biomédicas de Córdoba (GIMBIC). Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: vrodriguez@correo.unicordoba.edu.co

<sup>4</sup>Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias de la Salud, Programa Regencia en Farmacia, Investigación de Fármacos y Afines (IDEFARMA). Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: cantonioguzman@correo.unicordoba.edu.co

\*autor de correspondencia: acalderonr@correo.unicordoba.edu.co

**Cómo citar:** Raquel-Montes, M.; Zambrano, M.E.; Calderón-Rangel, A.; Rodríguez-Rodríguez, V.; Guzmán-Terán, C. 2022. Seroprevalencia de leptospirosis y brucelosis en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en Tierralta (Córdoba, Colombia). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1904. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1904>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** abril 2 de 2021

**Aceptado:** agosto 4 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

En la producción zootécnica, la brucelosis y la leptospirosis ocasionan problemas reproductivos y son una limitante en salud y en producción animal. El objetivo fue determinar la presencia de anticuerpos contra *Leptospira* spp. y *Brucella abortus*, en una población bufalera, en el municipio de Tierralta, Córdoba. Se realizó un estudio descriptivo de corte transversal, que incluyó un total de 144 búfalos de la raza Murrah, destinados al doble propósito. Para el diagnóstico de *Leptospira* spp., se implementó la prueba de aglutinación microscópica, con 13 serogrupos, 19 serovares pertenecientes a 5 especies de *Leptospira* patógenas y para brucelosis Rosa de Bengala y C-Elisa. La seroprevalencia para *Leptospira* spp. fue del 87,5 %, el serogrupo Mini fue el de mayor frecuencia, pero *Grippityphosa* presentó el mayor título. El 16,67 % de los búfalos

evaluados presentaron títulos iguales o superiores a 1:800, asociados con infección actual o reciente. La alta seroprevalencia, se puede deber a las características ambientales de la zona, que brinda las condiciones favorables para el crecimiento y el mantenimiento de este patógeno que, sumado al comportamiento de los búfalos de revolcarse, los hace propensos a las infecciones con bacterias del género *Leptospira* sp., porque a menudo, las fuentes de agua están contaminadas por este patógeno. La seroprevalencia contra *B. abortus* por Rosa de Bengala y Elisa-C fue del 2,08 %. Todos los títulos determinados corresponden a procesos infecciosos. No hubo signos clínicos de enfermedad y la carencia de registros productivos no permitió determinar el efecto sobre los parámetros reproductivos.

Palabras clave: Anticuerpos; *Brucella abortus*; *Leptospira* spp.; Spirochaetales; Zoonosis.

## ABSTRACT

In animal production, brucellosis and leptospirosis cause reproductive problems and limit animal health and production. The objective was to determine the presence of antibodies against *Leptospira* spp. and *Brucella abortus* in a buffalo population in the municipality of Tierralta, Córdoba. A descriptive, transversal study was carried out including a population of 144 Murrah's breed buffalos destined for beef and milk production. For the *Leptospira* spp. diagnostic, was used a rapid slide agglutination test with 13 serogroups and 19 serovars belonging to 5 pathogenic *Leptospira* species was implemented and for *Brucella abortus* Rose Bengal and C-Elisa was used. Seroprevalence of *Leptospira* spp. was 87,5 %, serogrup Mini was the most frequent, but Grippityphosa showed the higher titer. The 16,67 % of the buffaloes evaluated presented titles equal to or above than 1:800 associated with current or recent infection. High seroprevalence may be due to environmental characteristics of the zone, which gives favorable conditions for the growth and maintenance of this pathogen, these factors in conjunction with the habit of wallowing makes them prone to suffering infections caused by bacteria of the genera *Leptospira* sp. since water sources are often contaminated. Seroprevalence against *B. abortus* by Rose-Bengal and C-Elisa was 2,08 %, the determined titers correspond to infectious processes. There were no clinical manifestations of disease and the effects on reproductive parameters were not determined because of the lack of productive registries.

Keywords: Antibodies; *Brucella abortus*; *Leptospira* spp.; Spirochaetales; Zoonoses.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, el interés en la producción de Búfalos (*Bubalus bubalis*) tiene auge por la calidad de sus productos y su adaptabilidad a las condiciones ambientales (Martínez-Reina *et al.* 2020). De acuerdo con el censo Pecuario Nacional del 2020, del Instituto Colombiano Agropecuario, ICA, se registró una población de 338.567 búfalos en 3.851 predios, de los cuales, el 91,6 % están concentrados en 10 departamentos, donde Córdoba, se ubicó con la mayor población de búfalos (ICA, 2020a). De acuerdo con Martínez-Reina *et al.* (2020), la mayoría de las explotaciones de búfalos en el Colombia están dedicadas al doble propósito, con predominio de la raza Murrah y las principales problemáticas en salud corresponden a abortos, asociación de abortos con días abiertos, repetición de celos y retención de placenta.

Los problemas reproductivos en búfalos están asociados a enfermedades infecciosas, como brucelosis y leptospirosis (Ospina-Pinto *et al.* 2019); sin embargo, la vigilancia y control de estas enfermedades en Colombia, es limitada.

La brucelosis es causada por bacterias de la especie *Brucella*, una zoonosis de distribución mundial y una problemática de salud pública, por la aparición de casos en humanos (Costa *et al.* 2015; Álvarez-Hernández *et al.* 2015); recientemente, en algunos países, se reportan altas tasas de incidencia (Wang & Jiang, 2020). El ICA,

en 2016, reportó para Colombia, una seroreactividad del 36,8 %, en predios bufalinos y del 9,4 %, en búfalos, específicamente, para Córdoba, una seroreactividad del 54 %, en los predios evaluados y la seropositividad en bufalinos fue del 11 %.

De igual forma la leptospirosis es una zoonosis de distribución mundial reemergente, donde el número de casos se incrementa con el aumento de lluvias (Faine *et al.* 1999; Haake & Levett, 2015) y, además, es considerada una enfermedad de exposición ocupacional (Phillips, 2019).

El diagnóstico de laboratorio de la leptospirosis se realiza mediante varios métodos: prueba de aglutinación microscópica (MAT), detección de ADN del patógeno por reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y aislamiento del microorganismo mediante cultivo (Musso & La Scola, 2013). La principal prueba serológica es la microaglutinación (MAT), que permite la detección de anticuerpos específicos, que reconocen antígenos de cepas conocidas de *Leptospira*. Este reconocimiento da como resultado una aglutinación, que es observable por microscopio de campo oscuro. La prueba MAT indica, presuntivamente, el serogrupo circulante, pero no es suficientemente precisa para identificar serovares, debido a la reactividad cruzada que ocurre con frecuencia entre serovares de un mismo serogrupo. Además, esta técnica no discrimina entre anticuerpos derivados de la infección o la vacunación; puede ser negativa, cuando no se incluyen las serovariedades circulantes y en animales con leptospirosis crónica relacionada con insuficiencia reproductiva, se presenta la disminución de los títulos de anticuerpos o la ausencia de títulos de anticuerpos detectables (Marquez *et al.* 2017).

Como se indicó, en Córdoba no hay estudios recientes de brucelosis y de leptospirosis en búfalos, por lo tanto, el presente trabajo tuvo como propósito determinar la presencia de anticuerpos contra *Brucella abortus* y *Leptospira* spp., en una población bufalera, en el municipio de Tierralta (Córdoba).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Tipo de estudio y localización de las empresas ganaderas.** Se implementó un estudio descriptivo de corte transversal, que involucró tres empresas bufaleras, donde se calculó un tamaño de muestra de 144 búfalos, ubicados en Tierralta, municipio del departamento de Córdoba, de la región Caribe colombiano, que pertenece a la microrregión del Alto Sinú, a N 8°10'1", W 76°4'1", con una extensión de 472.800 km<sup>2</sup>, altitud media de 51 m s.n.m. (Figura 1), con una precipitación de 1.922 mm, temperatura media anual que oscila entre los 28 y 31 °C y con una humedad relativa media anual del 82 %. El área comprendida presenta las siguientes zonas de vida: bosque muy húmedo tropical; bosque muy húmedo pre-montano en transición a bosque muy húmedo tropical y bosque húmedo tropical (Cogollo Lara, 2012).

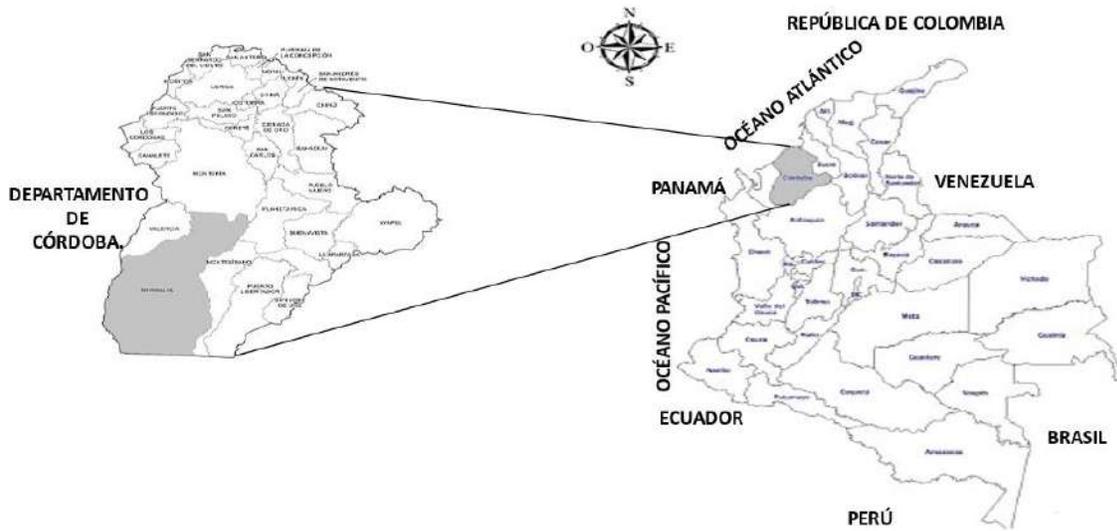


Figura 1. Demarcación de la zona de estudio en la subregión del Alto Sinú, en el departamento de Córdoba, Colombia.

**Cálculo y tamaño de la muestra.** Se utilizó la fórmula del tamaño de la muestra para la estimación de una proporción en una población finita, en tres empresas bufaleras, utilizando un margen de error del 0,05, con una confiabilidad del 95 % y para tener la máxima probabilidad de presentar la variable estudiada, se usó una prevalencia esperada del 50 % (Aguilar-Barojas, 2005).

**Toma de muestras de sangre.** Se tomaron 144 muestras de sangre de la raza Murrah (15 machos y 129 hembras), mayores de un año, en tres empresas bufaleras, dedicadas a la producción de carne y leche. Para la extracción de las muestras de sangre, se procedió a

desinfectar con una solución antiséptica (alcohol etílico al 70 %), la región ventral del inicio de la cola, donde la punción se hizo en la vena coccígea. Las muestras obtenidas en tubos al vacío sin anticoagulante y previamente identificadas, se conservaron en neveras de icopor, a temperatura entre 4 y 7 °C. Después fueron llevadas al Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico (IIBT), adscrito a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, de la Universidad de Córdoba, donde se procedió a extraer el suero, por centrifugación a 3.000 rpm, durante 5 minutos, donde el suero se almacenó en dos viales de fondo cónico a -70 °C, para su conservación y posterior procesamiento.

Tabla 1 Serogrupos y serovares usados en el MAT, para el diagnóstico de *Leptospira* spp., en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en Tierralta, Córdoba, Colombia.

No	Especie	Serogrupo	Serovares
1	<i>Leptospira interrogans</i>	Australis	Australis, Bratislava
2	<i>Leptospira interrogans</i>	Autumnalis	Autumnalis
3	<i>Leptospira borgpetersenii</i>	Ballum	Ballum
4	<i>Leptospira santarosai</i>	Batavie	Batavie
5	<i>Leptospira interrogans</i>	Canicola	Canicola
6	<i>Leptospira weilli</i>	Celledoni	Celledoni,
7	<i>Leptospira interrogans</i>	Grippotyphosa	Grippotyphosa
8	<i>Leptospira interrogans</i>	Icterohaemorrhagiae	Copenhageni, Icterohaemorrhagiae
9	<i>Leptospira borgpetersenii</i>	Mini	Mini
10	<i>Leptospira interrogans</i>	Pomona	Pomona
11	<i>Leptospira kirschneri</i>	Pomona	Mozdok
12	<i>Leptospira interrogans</i>	Pyrogenes	Zanoni
13	<i>Leptospira borgpetersenii</i>	Sejroe	Balcanica, Hardjo, Sejroe
14	<i>Leptospira interrogans</i>	Sejroe	Saxkoebing
15	<i>Leptospira borgpetersenii</i>	Tarassovi	Tarassovi

**Pruebas serológicas.** El diagnóstico para leptospirosis se implementó mediante la prueba de aglutinación microscópica (MAT), utilizando 13 serogrupos y 19 serovares, pertenecientes a cinco especies (Tabla 1). El MAT, se realizó de acuerdo con las normas de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003) y su implementación se hizo en el IIBT. Los antígenos utilizados tuvieron entre 7 y 10 días de crecimiento; de forma individual, se verificó su viabilidad y densidad celular; en caso de ser necesario fueron diluidos con solución fisiológica tamponada, para obtener una densidad de  $1-2 \times 10^8$  Leptospiras/ml. Cada suero que presentó una aglutinación en el 50 % o más de las leptospiras (comparadas con el antígeno control) fue considerado positivo (WHO, 2003). También, a este grupo de los búfalos, se les hizo una inspección clínica, donde se tomaron constantes fisiológicas, coloración de mucosas y se revisaron las tarjetas individuales, para determinar variables de producción zootécnica y evidenciar el reporte de signos clínicos o reportes de enfermedades reproductivas.

Para el diagnóstico de anticuerpos contra *B. abortus*, se implementó la prueba tamiz Rosa de Bengala, siguiendo los procedimientos del fabricante y para confirmar los resultados, se envió una alícuota al ICA en Cereté, donde se implementó Elisa competitiva (Elisa-C).

**Análisis de resultados.** Se hizo estadística descriptiva y las variables dicotómicas se asociaron con la seropositividad; los datos fueron analizados utilizando el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System); la seroprevalencia fue calculada por serogrupo. Para la interpretación de los títulos serológicos bajos, sospechosos, moderados y altos (Herrera, 2007), los búfalos fueron clasificados en estas categorías, donde el título serológico fue el más alto, de acuerdo a lo mostrado en la tabla 2.

**Aspectos éticos.** La toma de muestras, su manejo y conservación fueron llevadas a cabo por un médico veterinario, siguiendo las normas éticas, técnicas, científicas y administrativas para la

Tabla 2. Interpretación de títulos de *Leptospira* spp., en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*), en Tierralta, Córdoba, Colombia, de acuerdo con lo propuesto por Herrera (2007).

Categoría	Rango	n	%
Sin títulos	-	18	12,5
Títulos bajos	1:100-1:200	40	27,70
Títulos sospechosos	1:400	62	43,05
Títulos moderados	1:800	13	9,03
Títulos Altos	>1:800	11	7,64
<b>Total</b>		<b>144</b>	<b>99,92</b>

investigación en animales, según la ley 84 (Congreso Nacional de Colombia, 1989). El proyecto fue aprobado por el Comité de Ética del IIBT, según acta No 002-2018, del 12 de febrero de 2018.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La seroprevalencia para *Leptospira* spp. fue del 87,5 %, donde el 77,77 % (n=112) de las hembras y el 9,73 % (n=14) de los machos resultaron positivos a *Leptospira* spp. Para la variable sexo no hubo diferencias significativas, porque el mayor número de animales evaluados correspondieron a la categoría de hembras. Igualmente, para la categoría productiva no hubo diferencias significativas.

La seroprevalencia de esta población fue superior a la reportada por Viana *et al.* (2009), en Brasil y por Motta Giraldo *et al.* (2014), en Caquetá, empleando la prueba MAT, con 6 serovares.

Otro factor al que se puede atribuir la alta seroprevalencia observada corresponde a las características ambientales de la zona, ya que el territorio de Tierralta, comprende las zonas de vida de Bosque muy húmedo tropical; Bosque muy húmedo pre-montano en transición a bosque muy húmedo tropical y Bosque húmedo tropical, las cuales, se caracterizan por una alta precipitación y una humedad relativa media y, además, a que la región presenta una baja pendiente del terreno, que facilita la presencia de lugares

inundables (Cogollo Lara, 2012), favorables para el crecimiento y mantenimiento de *Leptospira*.

Los búfalos, se revuelcan en lugares inundables o en fuentes de agua, con el fin de controlar la temperatura corporal y la presencia de ectoparásitos (Simón & Galloso, 2011; Napolitano *et al.* 2013); sin embargo, este hábito los hace propensos a adquirir infecciones con bacterias del género *Leptospira*, debido a que este patógeno se puede presentar en las fuentes de agua (Cruvinel *et al.* 2019; Zaki *et al.* 2020), ya que han sido transportadas en las excretadas de roedores y animales silvestres (Cilia *et al.* 2020) o animales de interés zootécnico, portadores de este patógeno (Ensuncho-Hoyos *et al.* 2017). Además, es importante indicar la relación que existe entre las fuertes lluvias o inundaciones y la proximidad a los cuerpos de agua, con un mayor número de casos de leptospirosis humana (Schneider *et al.* 2015).

La seroprevalencia, se puede incrementar al utilizar un mayor número de serogrupos y serovares en el MAT (Adesiyun *et al.* 2009), como se muestra en estudios realizados en Brasil y en Venezuela, donde con 27 y 21 serovares, se encuentran seroprevalencias del 80 y 80,51 %, respectivamente (Viana *et al.* 2009; González Gontofalla & Rivera Pirela, 2015). Otros estudios muestran que el número de serogrupos y serovares no está afectando la seroprevalencia en Brasil; con 16 serovares, se encontró una seroprevalencia del 35,4

% (Rocha *et al.* 2019) y con 17 serovares, del 28,5 % (Oliveira *et al.* 2018). En Caquetá (Colombia), con 6 serovares, del 37,3 % (Motta Giraldo *et al.* 2014). El panel de antígenos utilizados en el MAT debe incluir serovariedades representativas de todos los serogrupos y serovariedades comunes, a nivel local; la utilización de una amplia gama de antígenos es útil para detectar infecciones poco comunes con serovares no detectados previamente (Haake & Levett, 2015).

La frecuencia para cada uno de los serogrupos y serovares se muestran en la tabla 3, donde el serogrupo con mayor frecuencia fue Mini (serogrupo Mini, serovar Mini). Estudios previos encontraron seroreactividad para este serogrupo (Anderson & Rowe, 1998; Viana *et al.* 2009), en porcinos (Pulido-Villamarín *et al.* 2019) y en ciervos (Mathias *et al.* 1999). En la mayoría de los estudios consultados, a la fecha, no se ha determinado este serogrupo, porque no ha sido incluido en el MAT (Langoni *et al.* 1999; Favero *et al.* 2002; Hajikolaei *et al.* 2006; Jacobo *et al.* 2009; Adesiyun *et al.* 2009).

En Colombia, el serogrupo Mini ha sido excluido del MAT en la mayoría de los estudios realizados; sin embargo, en granjas porcícolas del Medio Sinú, se demostró seropositividad en cerdos, en caninos y en humanos (Calderón *et al.* 2014). Este es el primer estudio que detecta este serogrupo en búfalos.

Dentro del serogrupo Sejroe, el serovar Saxkoebing fue la segunda frecuencia en este estudio (Tabla 3); no obstante, poco se conoce su seropositividad en búfalos. Otros serogrupos que presentaron altas seroprevalencias fueron Bratislava, Grippytyphosa, serogrupos que han sido reportados entre los de mayor prevalencia en estudios en Brasil (Langoni *et al.* 1999). En Colombia, estos serogrupos presentaron altas prevalencias en porcinos (Pulido-Villamarín *et al.* 2019) y en humanos (Calderón *et al.* 2014).

Se reportan infecciones de *Leptospira* spp. en bovinos y bufalinos en Colombia, por los serogrupos Grippytyphosa, Pomona, Icterohaemorrhagiae, y Hardjo subtipos Hardjoprajitno y Hardjobovis (Ochoa *et al.* 2000; Betancur Hurtado *et al.* 2013; Motta Giraldo *et al.* 2014); además de estos serogrupos, se

Tabla 3. Seroprevalencia por serovar a *Leptospira* spp., en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*), en el municipio de Tierralta, Córdoba, Colombia.

No	Serovar	Positivos	%	Negativos	%
1	Mini	79	54,86	65	45,14
2	Saxkoebing	71	49,31	73	50,69
3	Bratislava	64	44,44	80	55,56
4	Grippytyphosa	54	37,50	90	62,50
5	Hardjo	51	35,42	93	64,58
6	Zanoni	38	26,39	106	73,61
7	Pomona	27	18,75	117	81,25
8	Batavie	25	17,36	119	82,64
9	Australis	23	15,97	121	84,03
10	Autumnalis	18	12,50	126	87,50
11	Mozdok	18	12,50	126	87,50
12	Copenhageni	14	9,72	130	90,28
13	Celledoni	13	9,03	131	90,97
14	Tarassovi	6	4,17	138	95,83
15	Icterohaemorrhagiae	6	4,17	138	95,83
16	Serjoe	5	3,47	139	96,53
17	Ballum	3	2,08	141	97,92
18	Canicola	1	0,69	143	99,31
19	Balcanica	0	0,0	144	100

determinaron: Australis, Autumnalis, Ballum, Batavia, Canicola, Celledoni, Mini, Pyrogenes, Sejroe, Tarassovi; solo el serogrupo Balcanica no mostró ninguna reacción seroaglutinante. La seropositividad de este serogrupo en búfalos es desconocida, ya

que, en todos los estudios consultados, a la fecha, lo han excluido del MAT. Incorporar más serogrupos y serovares o incluir serovares circulantes de una región dentro del MAT, aumenta la sensibilidad y disminuye el promedio de las reacciones cruzadas, cuando se

utilizaron las cepas locales (Gómez *et al.* 2018). Pérez-García *et al.* (2019), en una caracterización en Colombia, al incluir una cepa nativa en el panel de la prueba del MAT, observaron un aumento en el porcentaje de positividad, en un 15 %.

La distribución de las diferentes diluciones por serovares se muestran en la tabla 4, donde el serogrupo que presentó el mayor título (1:12800) fue Grippytyphosa. Grippytyphosa junto a Mini, Pomona y Australis serovar Australis presentaron títulos de 1:6400. El mayor número de búfalos(as) infectados fue con el serogrupo Mini, a una dilución de 1:100. El mayor porcentaje de la seropositividad (86,80 %), se presenta como coaglutinaciones frente a dos o más serovares, teniendo la mayor frecuencia respuesta de anticuerpos frente a seis o más serovares (Tabla 5).

En la población bufalera evaluada, no se estableció ningún plan de vacunación contra la *Leptospira*. Todos los títulos que se detectaron se deben a procesos infecciosos (Tabla 2), títulos bajos (1:100-1:200) y corresponden a infecciones pasadas; títulos sospechosos (1:400) requieren una segunda muestra para su diagnóstico; títulos moderados (1:800) pueden corresponder al inicio de una infección o postinfección o respuesta postvacunal y para establecer su estatus, se requiere un segundo suero; títulos altos (> 800), que corresponden a una infección activa (Herrera, 2007). En los búfalos evaluados, los títulos altos se pueden asociar con infección actual o reciente; en éstos, no se observó ningún signo clínico de enfermedad al momento de la toma de las muestras e, igualmente, por la carencia de registros productivos, no se pudo determinar pérdidas económicas.

Tabla 4. Distribución de las diferentes diluciones por serovares de *Leptospira* spp., en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*), en Tierralta, Córdoba, Colombia.

Escala/Serovar	1:100	1:200	1:400	1:800	1:1600	1:3200	1:6400	1:12800
Mini	9	17	19	11	10	6	2	0
Saxkoebing	12	14	19	10	6	1	0	0
Bratislava	16	15	16	6	1	1	0	0
Grippytyphosa	8	14	11	9	6	4	1	1
Hardjo	7	10	18	8	6	2	0	0
Zanoni	11	8	8	5	1	0	0	0
Pomona	6	6	5	7	1	1	1	0
Batavie	8	11	3	1	1	1	0	0
Australis	7	5	1	5	1	0	1	0
Autumnalis	10	6	1	1	0	0	0	0
Mozdok	2	8	6	2	0	0	0	0
Copenhageni	6	4	2	0	0	2	0	0
Celledoni	10	2	0	0	0	0	0	0
Tarassovi	3	0	3	0	0	0	0	0
Icterohaemorrhagiae	3	3	0	0	0	0	0	0
Sejroe	3	1	1	0	0	0	0	0
Ballum	3	0	0	0	0	0	0	0
Canicola	1	0	0	0	0	0	0	0
Balcanica	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Totales</b>	<b>126</b>	<b>124</b>	<b>113</b>	<b>65</b>	<b>33</b>	<b>18</b>	<b>5</b>	<b>1</b>

Tabla 5. Seropositividad por número de serovares a *Leptospira* spp., en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*), en Tierralta, Córdoba, Colombia.

No. de serovares	1		2		3		4		5		6 o más	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
126 búfalos	19	13,20	15	10,42	24	16,66	16	11,12	20	13,88	32	22,22

La seroprevalencia contra *B. abortus* en los predios del presente estudio fue del 2,08 % (3/144), por Rosa de Bengala, seroprevalencia que se mantuvo, cuando se confirmó por Elisa-C. Estas empresas bufaleras no tiene un historial de vacunación contra la brucelosis. Al momento de la toma de las muestras, no se detectó ningún signo clínico de enfermedad y los administradores informaron que no se han presentado signos clínicos de enfermedades reproductivas, como abortos o nacimiento de crías débiles. Igualmente, por la precaria información de los registros de producción zootécnica, no se logró comprobar pérdidas económicas para brucelosis.

En Colombia, la brucelosis es una enfermedad de control oficial y conlleva que cualquier seroreactor sea eliminado por ser un alto riesgo de transmisión (ICA, 2020b). Estos tres búfalos seropositivos fueron eliminados, con el fin de ingresar al programa de saneamiento del predio. En búfalos del Magdalena Medio, por Rosa de Bengala, Fijación de Complemento y Elisa-C, detectaron que la seroprevalencia aumentaba cuando se incrementó la especificidad y sensibilidad de una prueba (Mariño *et al.* 2004). Búfalos vacunados con RB51, en el bajo Sinú (Lorica, Córdoba), se determinó una seroprevalencia del 12,03 % y cuando se confirmó por Elisa-C, esta seroprevalencia fue del 3,0 % (Calderón *et al.* 2010). En el Caquetá (Colombia), la seroprevalencia en predios donde hay bovinos y búfalos varió entre el 4,0 y el 16,3 % (Motta Giraldo *et al.* 2014), a diferencia en el actual estudio, donde las empresas están dedicados a la producción zootécnica de búfalos.

La seroprevalencia de especies de *Leptospira* patógenas en búfalos de Tierralta fue alta, puesto que se presentan las condiciones agroecológicas para este patógeno. Los títulos determinados corresponden a procesos infecciosos y no se pudo determinar el efecto de la leptospirosis y brucelosis sobre los parámetros reproductivos y las pérdidas económicas. Se hace necesario realizar estudios en empresas que cuenten con información zootécnica, para demostrar pérdidas productivas y económicas.

**Conflicto de intereses:** Este manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este artículo fue financiado por el proyecto de investigación “Caracterización epidemiológica de la leptospirosis humana en el departamento de Córdoba: Fortalecimiento del diagnóstico, vigilancia y control”, correspondiente al contrato 695 del año 2017 celebrado entre MinCiencias y la Universidad de Córdoba.

## REFERENCIAS

1. ADESIYUN, A.A.; HULL-JACKSON, C.; CLARKE, N.; WHITTINGTON, C.; SEEPERSADSINGH, N. 2009. Leptospirosis in water buffalo (*Bubalus bubalis*) in Trinidad. Veterinarski Arhiv. 79(1):77-86.
2. AGUILAR-BAROJAS, S. 2005. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco. 11(1-2):333-338.
3. ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, N.E.; DÍAZ-FLORES, M.; ORTIZ-REYNOSO, M. 2015. Brucelosis, una zoonosis frecuente. Medicina e Investigación. 3(2):129-133. <https://doi.org/10.1016/j.mei.2015.07.002>
4. ANDERSON, E.C.; ROWE, L.W. 1998. The prevalence of antibody to the viruses of bovine virus diarrhoea, bovine herpes virus 1, rift valley fever, ephemeral fever and bluetongue and to *Leptospira* sp in free-ranging wildlife in Zimbabwe. Epidemiology & Infection. 121(2):441-449. <https://doi.org/10.1017/s0950268898001289>
5. BETANCUR HURTADO, C.; ORREGO URIBE, A.; GONZÁLEZ TOUS, M. 2013. Seroepidemiología de la leptospirosis en bovinos con trastornos reproductivos en el municipio de Montería, Colombia. Revista de Medicina Veterinaria. 26:47-55. <https://doi.org/10.19052/mv.2633>
6. CALDERÓN, A.; RODRIGUEZ, V.; MÁTTAR, S.; ARRIETA, G. 2014. Leptospirosis in pigs, dogs, rodents, humans, and water in an area of the Colombian tropics. Tropical Animal Health and Production. 46:427-432. <https://doi.org/10.1007/s11250-013-0508-y>
7. CALDERÓN, A.; TIQUE, V.; ENSUNCHO, C.; RODRIGUEZ, V. 2010. Seroprevalencia de *Brucella abortus* en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en el municipio de Lorica, Córdoba. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 13(2):125-132. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.740>
8. CILIA, G.; BERTELLONI, F.; FRATINI, F. 2020. Leptospira Infections in domestic and wild animals. Pathogens. 9(7):573. <https://doi.org/10.3390/pathogens9070573>

9. COGOLLO LARA, C.A. 2012. Por el Tierralta que queremos un gobierno del presente para construir el futuro que necesitamos. Plan de desarrollo de Tierralta "Por ustedes" 2012-2015. Secretaria de Planeación Municipal, municipio de Tierralta, departamento de Córdoba. 361p. Disponible desde Internet en:  
<https://repositorioocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/23843/28318-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. CONGRESO NACIONAL DE COLOMBIA. 1989. Ley 84 de 1989. Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Protección de los Animales y se crean unas contravenciones y se regula lo referente a su procedimiento y competencia. Estatuto Nacional de Protección de Animales. (Colombia). 15p.
11. COSTA, F.; HAGAN, J.E.; CALCAGNO, J.; KANE, M.; TORGERSON, P.; MARTINEZ-SILVEIRA, M.S.; STEIN, C.; ABELA-RIDDER, B.; KO, A.I. 2015. Global morbidity and mortality of leptospirosis: A systematic review. PLoS Neglected Tropical Diseases. 17(9):e0003898. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003898>
12. CRUVINEL, V.R.N.; ZOLNIKOV, T.R.; BASHASH, M.; MARQUES, C.P.; SCOTT, J.A. 2019. Waterborne diseases in waste pickers of estrutural, Brazil, the second largest openair dumpsite in world. Waste Management. 99:71-78. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.035>
13. ENSUNCHO-HOYOS, C.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, V.; PÉREZ-DORIA, A.; VERGARA, O.; CALDERÓN-RANGEL, A. 2017. Epidemiology behavior of leptospirosis in Ciénaga de Oro, Córdoba (Colombia). Tropical Animal Health and Production. 49:1345-1351. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1332-6>
14. FAINE, S.; ADLER, B.; BOLIN, C.; PEROLAT, P. 1999. *Leptospira* and leptospirosis. 2ª edition. Medisci Press (Melbourne). 295p.
15. FAVERO, A.C.M.; PINHEIRO, S.R.; VASCONCELLOS, S.A.; MORAIS, Z.M.; FERREIRA, F.; FERREIRA NETO, J.S. 2002. Sorovares de leptospirosis predominantes em exames serológicos de bubalinos, ovinos, caprinos, equinos, suínos e cães de diversos estados brasileiros. Ciencia Rural. 32(4):613-619. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000400011>
16. GÓMEZ, L.B.; SALTAREN, C.A.; DÍAZ, A.M.T.; ROBALINO, V.M.P.; LUCERO, P.S.A. 2018. Cepario autóctono de leptospirosis en la prueba de microaglutinación. Correo Científico Médico. 22(1):50-65.
17. GONZÁLEZ GONTOFALLA, F.; RIVERA PIRELA, S. 2015. Caracterización de la leptospirosis bovina en Venezuela. Revisión breve sobre la enfermedad. REDVET. 16(2):1-22.
18. HAAKE, D.A.; LEVETT, P.N. 2015. Leptospirosis in Humans. In: Adler, B. (ed.). *Leptospira* and Leptospirosis. Current Topics in Microbiology and Immunology. Springer (Berlin, Heidelberg). 387:65-97. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45059-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45059-8_5)
19. HAJIKOLAEI, M.R.H.; GHORBANPOUR, M.; ABDOL-LAPOU, G. 2006. Seroprevalence of leptospiral infection in buffalo (*Bubalus bubalis*). Bulletin- Veterinary Institute in Pulawy. 50(3):341-344.
20. HERRERA, B. 2007. Leptospirosis, interpretación de resultados serológicos en animales. Disponible desde Internet en: [http://www.produccion-animal.com.ar/sanidad\\_intoxicaciones\\_metabolicos/enfermedades\\_reproduccion/55-interpretacion\\_leptospira.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/sanidad_intoxicaciones_metabolicos/enfermedades_reproduccion/55-interpretacion_leptospira.pdf) (con acceso 04/02/2021).
21. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 2020a. Censo Pecuario. Disponible desde Internet en: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018.aspx> (con acceso 04/02/2021).
22. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 2020b. Resolución No 75495. Medidas sanitarias para la prevención y el control de la brucelosis bovina causada por *Brucella abortus* en las especies bovina, bufalina, ovina, caprina, porcina y equina en Colombia. Disponible desde Internet en: <https://www.ica.gov.co/getattachment/b782a028-4270-49ae-a2ae-6ae9994ab20d/2020R75495.aspx> (con acceso 04/02/2021).
23. JACOBO, R.A.; CIPOLINI, M.F.; MARTÍNEZ, D.E.; DELLAMEA, M.; DRAGHI, M.G. 2009. Identificación de serovares de *Leptospira* spp. en búfalos de Corrientes, Argentina. Revista Veterinaria. 20(2):126-127. <http://dx.doi.org/10.30972/vet.2021862>
24. LANGONI, H.; DEL FAVA, C.; DE GOUVÊA CABRAL, K.; VIEIRA DA SILVA, A.; PACHECO CHAGAS, S.A. 1999. Aglutininas antileptospíricas em búfalos do Vale do Ribeira, Estado de São Paulo. Ciencia Rural. 29(2):305-307. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781999000200019>
25. MARIÑO, O.; RUEDA, E.; OSORIO, C.; CALDERÓN, C. 2004. Evaluación de metodologías diagnósticas para brucelosis en población de búfalos del Magdalena Medio, Colombia. Revista FEDEGAN. 84:214-218.
26. MARQUEZ, A.; DJELOUADJI, Z.; LATTARD, V.; KODJO, A. 2017. Overview of laboratory methods to diagnose Leptospirosis and to identify and to type leptospires. International Microbiology. 20(4):184-193. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.302>

27. MARTÍNEZ-REINA, A.M.; DORIA-RAMOS, M.; GARCÍA-JIMÉNEZ, J.; SALCEDO-CARRASCAL, E.; HERRERA-PÉREZ, N.; CARRASCAL-TRIANA, E.L. 2020. Caracterización técnica y económica del sistema de producción de búfalos *Bubalus bubalis* en el departamento de Córdoba de Colombia. *Archivos de Zootecnia*. 69(268):444-452.  
<https://doi.org/10.21071/az.v69i268.5392>
28. MATHIAS, L.A.; GIRIO, R.J.S.; DUARTE, J.M.B. 1999. Serosurvey for Antibodies against *Brucella abortus* and *Leptospira interrogans* in pampas deer from Brazil. *Journal Wildlife Diseases*. 35(1):112-114.  
<https://doi.org/10.7589/0090-3558-35.1.112>
29. MOTTA GIRALDO, J.L.; CLAVIJO HOYOS, J.A.; WALTERO GARCÍA, I.; ABELEDO, M.A. 2014. Prevalencia de anticuerpos a *Brucella abortus*, *Leptospira* sp. y *Neospora caninum* en hatos bovinos y bubalinos en el Departamento de Caquetá, Colombia. *Revista de Salud Animal*. 36(2):80-89.
30. MUSSO, D.; LA SCOLA, B. 2013. Laboratory diagnosis of leptospirosis: a challenge. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*. 46(4):245-252.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmii.2013.03.001>
31. NAPOLITANO, F.; PACELLI, C.; GRASSO, F.; BRAGHIERI, A.; DE ROSA, G. 2013. The behavior and welfare of buffaloes (*Bubalus bubalis*) in modern dairy enterprises. *Animal*. 7(10):1704-1713.  
<https://doi.org/10.1017/S1751731113001109>
32. OCHOA, J.E.; SÁNCHEZ, A.; RUIZ, I. 2000. Epidemiología de la leptospirosis en una zona andina de producción pecuaria. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 7(5):325-331.
33. OLIVEIRA, P.R.F.; SOARES, L.B.F.; BORGES, J.M.; BARROSA, N. DE C.; LANGONI, H.; BRANDESPIM, D.F.; JUNIOR, J.W.P.; MOTA, R.A. 2018. Occurrence of serological reactions for serogroup Sejroe (CTG and Prajтино) in female buffalo in the state of Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*. 49(4):795-800.  
<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.02.007>
34. OSPINA-PINTO, M.C.; RINCÓN-PARDO, M.; SOLER-TOVAR, D.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, P. 2019. Alteration of the reproductive indicators by the presence of *Leptospira* spp. in Sows of Swine Farms. *Acta Scientiae Veterinariae*. 47:1628.  
<https://doi.org/10.22456/1679-9216.89894>
35. PÉREZ-GARCÍA, J.; AGUDELO-FLÓREZ, P.; PARRAHENAO, G.J.; OCHOA, J.E.; ARBOLEDA, M. 2019. Incidencia y subregistro de casos de leptospirosis diagnosticados con tres métodos diferentes en Urabá, Colombia. *Biomédica*. 39(Supl.1):150-162.  
<https://doi.org/10.7705/biomedica.v39i0.4577>
36. PHILLIPS, J.A. 2019. Leptospirosis. *Workplace Health & Safety*. 67(3):148.  
<https://doi.org/10.1177/2165079918818582>
37. PULIDO-VILLAMARÍN, A.; CASTAÑEDA-SALAZAR, R.; MENDOZA-GÓMEZ, M.F.; VIVAS-DÍAZ, L. 2019. Presencia de anticuerpos frente a algunos patógenos de interés zoonótico en cuatro granjas porcícolas de Cundinamarca, Colombia. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*. 30(1):446-454.  
<http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v30i1.15702>
38. ROCHA, K. DE S.; DE SOUZA LIMA, M.; SOUZA DA PAZ, G.; LANGONI, H.; GUIMARÃES DE MORAES, C. C. 2019. Detecção de anticorpo anti-*Brucella* sp. e anti-*Leptospira* spp. em búfalos (*Bubalus bubalis*) abatidos em matadouro na cidade de Belém, Pará. *Revista de Ciências Agrárias*. 62.  
<http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.3046>
39. SCHNEIDER, M.C.; NAJERA, P.; PEREIRA, M.M.; MACHADO, G.; DOS ANJOS, C.B.; RODRIGUES, R. O.; CAVAGNI, G.M.; MUÑOZ-ZANZI, C.; CORBELLINI, L.G.; LEONE, M.; BUSS, D.F.; ALDIGHIERI, S.; ESPINAL, M.A. 2015. Leptospirosis in Rio Grande do Sul, Brazil: An ecosystem approach in the animal-human interface. *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 9(11):e0004095.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004095>
40. SIMÓN, L.; GALLOSO, M. 2011. Presencia y perspectivas de los búfalos en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 34(1):3-20.
41. VIANA, R.B.; DEL FAVA, C.; MOURA, A.C.B.; CARDOSO, E.C.; DE ARAÚJO, C.V.; MONTEIRO, B.M.; PITUCO, E.M.; VASCONCELLOS, S.A. 2009. Ocorrência de anticorpos anti-*neospora caninum*, *Brucella* sp. E *Leptospira* spp. em búfalos (*Bubalus bubalis*) criados na amazônia. *Arquivos do Instituto Biológico*. 76(3):453-457.  
<https://doi.org/10.1590/1808-1657v76p4532009>
42. WANG, X.; JIANG, H. 2020. Epidemiological characteristics of global human brucellosis. *Chinese Journal of Epidemiology*. 41(10):1717-1722.  
<https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112338-20191022-00751>
43. WORLD HEALTH ORGANIZATION, WHO. 2003. Human leptospirosis: guidance for diagnosis, surveillance and control. World Health Organization (Malta). 109p.
44. ZAKI, A.M.; HOD, R.; SHAMSUSAH, N.A.; ISA, Z.M.; BEJO, S.K.; AGUSTAR, H.K. 2020. Detection of *Leptospira kmetyi* at recreational areas in Peninsular Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192(11):703.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08639-x>



# Productividad y curvas de crecimiento usando modelos no lineales en un cruce de ovino de pelo colombiano x pelibuey

## Productivity and growth curves using non-linear models in a cross between ovino de pelo colombiano x pelibuey

Claudia Patricia Lenis-Valencia<sup>1\*</sup> ; Enrique José Molina<sup>2</sup> ; Luz Angela Álvarez-Franco<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: cplenisv@unal.edu.co, laalvarezf@unal.edu.co

<sup>2</sup>Reserva Natural El Hatico. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: ejmolina@fun.cipav.org.co

\*autor de correspondencia: cplenisv@unal.edu.co

**Cómo citar:** Lenis-Valencia, C.P.; Molina, E.J.; Álvarez Franco, L.A. 2022. Productividad y curvas de crecimiento usando modelos no lineales en un cruce de ovino de pelo colombiano x pelibuey. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1853. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1853>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** junio 21 de 2020

**Aceptado:** julio 25 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Los ovinos criollos de pelo (OCP) desarrollaron ventajas adaptativas al climática tropical, que le permiten tener resistencia a enfermedades, alta fertilidad y prolificidad; sin embargo, se reportan pocas investigaciones sobre la productividad de los OCP en sistemas asociados al cultivo de la caña, lo que hace necesario realizar investigaciones, que permitan fomentar sus atributos. El objetivo del presente trabajo fue analizar la productividad y el desarrollo corporal de un cruce de OCP, mediante parámetros productivos y curvas de crecimiento. Se utilizaron 180 animales de partos simples y múltiples; se registró el peso al nacimiento (PN), al destete (PD), a los 210 días (PAJ210) y las ganancias diarias predestete (GDPRE) y posdestete (GDPOS). Los datos, se analizaron mediante estadística descriptiva, con un GLM, con los efectos sexo (S), tipo de nacimiento (TN), número de partos (NP) y época de nacimiento (EPONAC). Se emplearon los modelos no lineales Gompertz, Logístico, Brody, Richards y Von Bertalanffy, en 1.455 registros de pesos, a diferentes edades, para realizar las curvas de crecimiento. Los análisis, se efectuaron con el paquete estadístico SAS. Se consideraron los coeficientes  $R^2$ , AIC y BIC, obtenidos por el método de Gauss-Newton, para seleccionar el modelo de mejor ajuste. Los machos presentaron mayores promedios en las variables

PN, PD, PAJ210 y GDPOS. El TN afectó todas las variables; el PN y las GDPOS fueron afectadas por el NP y, la EPONAC, afectó PN, las GDPRE, el PAJ210 y las GDPOS. El modelo de mejor ajuste para las curvas de crecimiento fue la de Richards.

Palabras clave: Crecimiento y desarrollo; Dimorfismo sexual; Ganancias pre y post-destete; Modelos no lineales; Productividad en ovinos.

### ABSTRACT

The creole hair sheep (CHS) developed adaptive advantages to the tropical climate, which allow them to have resistance to diseases, high fertility and prolificacy. Currently, there is little research on the productivity of CHS in systems associated with the cultivation of sugarcane, which makes it necessary to carry out research to promote its attributes. The purpose of this research was to analyze the productivity and body development of a crossing of CHS, using production parameters and growth curves. 180 animals of single and multiple births were used; the follow weight was recorded: at birth (WB), at weaning (WW); at 210 days (W210), and furthermore, daily gains of pre-weaning (WDPRE) and post-weaning (WPPOS) were recorded. The data were analyzed using

descriptive statistics with a GLM with the effects sex (S), type of birth (TB), number of births (NB) and period of birth (PB). The non-linear models Gompertz, Logistic, Brody, Richards and Von Bertalanffy were used in 1455 records of weights at different ages to perform growth curves. All analyzes were performed with the SAS statistical package. The  $R^2$ , AIC and BIC coefficients obtained by the Gauss-Newton method were considered to select the best fit model. The males presented higher averages in the variables WB, WW, W210) and WPOS. The TB affected all the variables; The WB and the WPOS were affected by the NB and the PB affected the WB, the WDPRE, the W210 and the WPOS. The best fit model for the growth curves was of Richards.

Keywords: Growth and development; Nonlinear models; Pre and post-weaning earnings; Productivity in sheep; Sexual dimorphism.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento corporal es uno de los procesos biológicos que se desarrolla en el animal durante la primera etapa de su vida y para observarlo, se tienen indicadores implicados en los animales que son medibles, como el aumento de peso e incremento del tamaño en longitud y altura. Dentro de los factores que influyen en el crecimiento animal, se encuentran los ambientales, los genéticos y los fisiológicos, que intervienen en el desarrollo productivo; es por esto, que es de gran importancia tenerlos en cuenta, dentro del sistema de producción (Álvarez Díaz *et al.* 2009; Patiño & Van Cleef, 2010). El crecimiento pre-destete está determinado, principalmente, por el peso al nacimiento y durante este periodo, la habilidad materna de la oveja juega un papel importante y en el crecimiento post-destete, su influencia es dada por factores genéticos y medio ambientales (Montalvo *et al.* 2009).

La implementación de las curvas de crecimiento permite relacionar el aumento de masa corporal en un tiempo determinado, el cual, se expresa en forma de curvas exponenciales, que permiten comprender la velocidad de crecimiento, la madurez (Lupi *et al.* 2015a), el peso a la edad adulta y la edad ideal al sacrificio (Agudelo-Gómez *et al.* 2008), que obtienen los animales en una explotación, teniendo en cuenta los factores ambientales, para la toma de decisiones de orden productivo (Lupi *et al.* 2015c).

Los ovinos criollos de pelo están adaptados a una amplia gama de condiciones agroecológicas, especialmente, aquellas zonas del trópico alto y bajo, donde se sitúa la mayor población en sistemas de producción tradicionales, en ausencia de control y de tecnología reproductiva. Su amplia adaptación hace que, fácilmente, se encuentre desde las zonas áridas de la Guajira hasta los páramos húmedos de la zona Andina (Vivas A. *et al.* 2020). Estos ovinos muestran una alta capacidad de producción y son un componente complementario para las actividades agrícolas y la seguridad alimentaria (Revelo *et al.* 2020). Adicional, por sus características positivas de rusticidad, mansedumbre, adaptación a medios marginales en climas difíciles, longevidad, prolificidad y resistencia a enfermedades (Vivas A. *et al.* 2020; Lenis-Valencia *et al.* 2021), son un recurso zoogenético de gran importancia, ya que poseen un

rol en la economía rural y están en la capacidad de albergar una diversidad genética que proporciona adaptación, la cual, será de utilidad ante el cambio climático (Revelo *et al.* 2020).

La Reserva Natural El Hatico (RNEH), desde hace 34 años, viene implementando sistemas silvopastoriles intensivos y manejo agroecológico de la caña de azúcar. En el sistema de producción de la RNEH, se integra el ovino de pelo colombiano, donde se aprovecha su alta capacidad de selectividad para el control integrado de arvenses, tanto en el área de callejones como dentro del cultivo de la caña de azúcar (Molina C. *et al.* 2012). El objetivo de este trabajo fue analizar la productividad y el desarrollo corporal de un cruce de ovinos criollos de pelo, bajo un sistema silvopastoril de caña de azúcar, en la Reserva Natural El Hatico (RNEH).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Zona de estudio.** La investigación, se realizó en la RNEH, ubicada a N 3°27' y W 76°32', en el departamento del Valle del Cauca, municipio de El Cerrito, a 1.000 m s.n.m., con precipitación promedio de 750 mm, humedad relativa del 75 % y temperatura promedio de 24 °C, correspondiendo a la clasificación de Bosque Seco Tropical.

**Constitución del ható.** Se evaluaron 180 ovinos criollos de pelo con un cruce de 3/8 ovino criollo de pelo colombiano x 5/8 pelibuey, nacidos durante el 2015 y 2016, provenientes de partos simples y múltiples; se pesaron cada 2 meses hasta los 7 meses y fueron alimentados en un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala* y *Cynodon plectostachyus* y un sistema de control integrado de arvenses *Cynodon plectostachyus* y *Panicum maximum*, en el área de los callejones y dentro del cultivo de la caña de azúcar. Brevemente, las hembras, durante su último trimestre de gestación, ingresan al sistema silvopastoril, con suplementación de salvado de arroz; pastorean con sus crías hasta el destete. El cordero, con un peso de 20 kg, es destetado y se integra al sistema de control de arvenses en el cultivo de la caña.

**Variables evaluadas.** Para evaluar la productividad, se utilizaron los datos: peso al nacimiento (PN); tipo de nacimiento (TN), único y mellizo; sexo (S), hembra y macho; época de nacimiento (EPONAC) (2 épocas secas y 2 de lluvia); el número de partos de la hembra (NP), como primeriza y múltipara; edad al destete (ED); peso al destete a los 120 días (PD); ganancia diaria pre-destete (GDPRE); peso a los 7 meses (PAJ210) y ganancia diaria pos-destete (GDPOS).

**Análisis de datos.** Se analizaron las variables de respuesta PN, PD, GDPRE, PAJ210 y GDPOS. La GDPRE, se estimó como (PD-PN)/edad al destete; la edad al destete (ED), se calculó como los días transcurridos entre las fechas de nacimiento y destete; para la GDPOS, se estimó como (P210-PD)/edad a los siete meses. Para el análisis descriptivo, se utilizó el procedimiento modelo lineal generalizado (GLM) del paquete estadístico SAS (2013), empleando el mismo modelo para todas las variables.

El modelo estadístico que describió las variables de respuesta, se presenta en la ecuación 1.

$$y = \mu + S_i + TN_j + EP_k + NP_l + \epsilon_{ijkl} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

Y = variables de respuesta (PN, PD, PAJ210, GDPRE y GDPOS).

M = media general.

S = efecto fijo del i-ésimo nivel del factor sexo del cordero (n=2) (macho y hembra).

TN = efecto fijo del j-ésimo nivel del factor tipo de nacimiento (n=2) (Simple y múltiple).

EP = efecto fijo del k-ésimo nivel del factor época de nacimiento (n=3) (2 épocas de sequía y 2 de lluvia).

NP = efecto fijo del l-ésimo nivel del factor número de parto (n=2) (primípara y múltipara).

$\epsilon$  = Error experimental.

Se evaluaron los modelos no lineales Gompertz (Gompertz, 1825), Logístico (Nelder, 1961), Richards (Richards, 1959), Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1938) y Brody (Brody & Lardy, 1945) (Tabla 1), para describir la curva de crecimiento de los animales, utilizando 1.455 registros de peso, a diferentes edades y considerando el efecto del sexo sobre éstos. Los parámetros de los modelos fueron hallados de acuerdo con el procedimiento NLIN de SAS (2013); se utilizó el método de Gauss-Newton, como método de iteración (Hossein-Zadeh & Golshani, 2016) y para seleccionar el modelo de mejor ajuste, se tuvieron en cuenta los criterios de selección: coeficiente de determinación ( $R^2$ ), criterio de información Aikaike (AIC), criterio de información bayesiano (BIC) y el porcentaje de curvas convergentes (PCC), valores obtenidos por medio del paquete estadístico SAS.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medias de mínimos cuadrados para las variables dependientes, de acuerdo con los efectos fijos, se muestran en la tabla 2. Los

promedios generales y el error estándar de PN, PD, GDPRE, PAJ210 y GDPOS fueron 3,1±0,7 kg, 18,5±3,5 kg, 128,3±28 g/día, 25±4,2 kg y 72,1±29,5 g/día, respectivamente.

Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2012) y Ríos-Utrera *et al.* (2014) presentaron promedios de PN, para la raza pelibuey, inferiores a los encontrados en este estudio, mientras que Martínez & Malagón (2005) reportaron valores superiores para la raza criolla y la mora colombiana en pastoreo. Estos valores pueden ser atribuidos al sistema silvopastoril de caña de azúcar y a la alimentación ingerida en el último tercio de la gestación de la oveja, con salvado de arroz, ya que afecta el peso del cordero (Ríos-Utrera *et al.* 2014); aunque el cruce empleado, también puede estar influenciando la mejora en la variable. El promedio del PD, en este estudio, es similar al reportado por Martínez & Malagón (2005), para las razas ovino de pelo colombiano y mora colombiana.

En cuanto a las GDPRE, Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009; 2012) hallaron valores superiores en ovinos pelibuey a los obtenidos en este estudio, a los 120 días.

El sexo afectó significativamente ( $p < 0,05$ ) a todas las variables dependientes, siendo los machos más pesados que las hembras. Al nacimiento, los machos pesaron 300 g más que las hembras; al destete, 1,9 kg y, a los siete meses, 2,2 kg; de igual manera, en las GDPRE ganaron 7,9 g/día y en las GDPOS, 12,1 g/día, respecto a las hembras. Esta superioridad, también fue reportada por diferentes autores, como Macedo & Arredondo (2008), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009; 2012) y Quiroz *et al.* (2012), quienes afirman que esta diferencia es fuertemente influenciada por el efecto de la testosterona, la cual, actúa como promotor de crecimiento (Macedo & Arredondo, 2008; Hinojosa-Cuéllar *et al.* 2012).

El tipo de nacimiento del cordero tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en PN, PD, GDPRE, PAJ210 y GDPOS. Los corderos de parto simple pesaron 0,4 kg más al nacimiento; 2,8 kg más al destete y ganaron 19,6 g/día más de peso hasta el destete, que los corderos de parto múltiple; sin embargo, a los siete meses, los corderos de parto múltiple ganaron 15,2 g más por día, que los de parto simple. Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009; 2012), Macedo & Arredondo (2008), Quiroz *et al.* (2012) e Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2013), también reportan valores superiores para la raza pelibuey, cuando corresponde a parto simple, en comparación con los múltiples en las mismas variables, exceptuando la GDPOS. La

Tabla 1. Expresión matemática de los modelos no lineales de crecimiento animal.

Modelo	Expresión matemática	Referencia
Gompertz	$Y = A * \exp(-B * \exp(-K * t))$	Gompertz, 1825
Logístico	$Y = A * (1 + \exp(-K * t))^{(-M)}$	Nelder, 1961
Von Bertalanffy	$Y = A * (1 - B * \exp(-K * t))^{**3}$	Von Bertalanffy, 1938
Brody	$Y = A * (1 - B * \exp(-K * t))$	Brody & Lardy, 1945
Richards	$Y = A * (1 - B * e^{-Kt})^{**M}$	Richards, 1959

Y = peso del animal a la edad t; A = peso asintótico en una edad t o edad adulta; B = constante de integración; K = índice de madurez referente al peso adulto; M = punto de inflexión en los modelos Logístico y Richards.

Tabla 2. Medias de Mínimos cuadrados ( $\pm$  errores estándar), para características productivas, de un cruce de ovino criollo de pelo colombiano x pelibuey, de acuerdo con el sexo del cordero, el tipo y época de nacimiento y el número de parto de la oveja.

VARIABLES	N	PN (kg)	PD (kg)	GDPRE (g/día)	PAJ210 (kg)	GDPOS (g/día)
<b>Sexo</b>						
Macho	79	3,3 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	19,1 $\pm$ 3,3 <sup>a</sup>	131,8 $\pm$ 28 <sup>a</sup>	26,1 $\pm$ 4,2 <sup>a</sup>	77,5 $\pm$ 23 <sup>a</sup>
Hembra	65	3,0 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	17,2 $\pm$ 3,5 <sup>b</sup>	123,9 $\pm$ 28 <sup>a</sup>	23,9 $\pm$ 3,9 <sup>b</sup>	65,4 $\pm$ 27 <sup>b</sup>
<b>Tipo de nacimiento (TN)</b>						
Simple	39	3,4 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	20,5 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup>	142,5 $\pm$ 26 <sup>a</sup>	26,0 $\pm$ 4,0 <sup>a</sup>	61,0 $\pm$ 23 <sup>b</sup>
Múltiple	105	3,0 $\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	17,7 $\pm$ 3,3 <sup>b</sup>	122,9 $\pm$ 27 <sup>b</sup>	24,6 $\pm$ 4,2 <sup>b</sup>	76,2 $\pm$ 25 <sup>a</sup>
<b>Época de nacimiento (EPONAC)</b>						
Seca (Dic-Feb)	33	3,5 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	17,7 $\pm$ 2,4 <sup>a</sup>	118,5 $\pm$ 21 <sup>b</sup>	22,6 $\pm$ 2,4 <sup>c</sup>	55,2 $\pm$ 17 <sup>c</sup>
Lluvia (Mar-May)	34	3,2 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	18,5 $\pm$ 4,3 <sup>a</sup>	127,2 $\pm$ 34 <sup>b</sup>	24,4 $\pm$ 4,7 <sup>b</sup>	65,5 $\pm$ 20 <sup>b</sup>
Seca (Jun-Sept)	77	2,9 $\pm$ 0,6 <sup>c</sup>	18,8 $\pm$ 3,4 <sup>a</sup>	133,1 $\pm$ 27 <sup>a</sup>	26,2 $\pm$ 4,2 <sup>a</sup>	82,2 $\pm$ 26 <sup>a</sup>
<b>Número de partos (NP)</b>						
Primeriza	53	2,8 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	18,3 $\pm$ 3,5 <sup>a</sup>	129,3 $\pm$ 27 <sup>a</sup>	25,5 $\pm$ 4,1 <sup>a</sup>	79,4 $\pm$ 27 <sup>a</sup>
Múltipara	91	3,3 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	18,6 $\pm$ 3,5 <sup>a</sup>	127,6 $\pm$ 28 <sup>a</sup>	24,7 $\pm$ 4,3 <sup>a</sup>	67,8 $\pm$ 24 <sup>b</sup>

N: número de observaciones; PN: peso al nacimiento; PD: peso al destete; GDPRE: ganancia diaria pre-destete; PAJ210: peso ajustado a los 210 días; GDPOS: ganancia diaria pos-destete. Valores con diferente superíndice en la misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

explicación de esta respuesta está relacionada con la disponibilidad de leche materna, habilidad materna y el consumo de forraje, a temprana edad del cordero (Hinojosa-Cuéllar *et al.* 2012).

Se registró un PN de  $3,4 \pm 0,6$  kg, el cual, es superior a lo observado por Herrera *et al.* (2008), Hinojosa-cuéllar *et al.* (2009), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2012) y Quiroz *et al.* (2012), en ovinos pelibuey y por Montes *et al.* (2018), en ovinos criollos de pelo. Del mismo modo, los pesos reportados en los partos múltiples por Herrera *et al.* (2008), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2012), Quiroz *et al.* (2012) y Montes *et al.* (2018) fueron inferiores a lo observado en el cruce empleado en este estudio. El tipo de nacimiento en los corderos se ve afectado por la competencia en los partos múltiples desde el útero de la oveja, donde el cordero compete, principalmente, por nutrientes (Macedo & Arredondo, 2008; Hinojosa-Cuéllar *et al.* 2012).

Los valores encontrados en parto simple y múltiple de PD y GDPRE (Tabla 2) fueron superiores a lo informado por Herrera *et al.* (2008), en pelibuey. La mayoría de los reportes señalan que esta superioridad se mantiene después del destete; sin embargo, en el presente estudio, la GDPOS tuvo los mejores valores en los corderos nacidos de parto múltiple, atributo que puede ser producto de un crecimiento compensatorio de los corderos, provenientes de parto múltiple que, en ocasiones, alcanzan el peso de los corderos de nacimiento simple, fenómeno que se presenta cuando las condiciones nutricionales mejoran después del destete (Macedo & Arredondo, 2008).

Los corderos nacidos de ovejas con más de dos partos presentaron mayores valores en el PN ( $p < 0,05$ ), que las primerizas; algunas razones que explican este resultado pueden ser el peso de la hembra al servicio, la competencia entre finalizar el crecimiento y el mantenimiento de la gestación e, incluso, el efecto del macho. Por el contrario, los corderos provenientes de ovejas primerizas fueron  $11,6$  g/días superiores en GDPOS ( $p < 0,05$ ). De acuerdo con lo anterior, se puede inferir, que los ovinos nacidos de ovejas primerizas, en este sistema productivo, finalizan su periodo de crecimiento con mejores rendimientos de producción, que los corderos nacidos de hembras con más de dos partos. El resto de las variables dependientes, como el PD, las GDPRE y el PAJ210, no fueron afectadas por el NP.

Los ovinos provenientes de ovejas primíparas tuvieron mejores valores en PAJ210, GDPRE y GDPOS, siendo esta última significativa. Ríos-Utrera *et al.* (2014) reportaron resultados similares, mientras que Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2009) encontraron lo contrario, en ovinos de las razas pelibuey, dorper, katahdin y sus cruces, en el sureste de México, al no evidenciar diferencias en esta variable. Autores, como Herrera *et al.* (2008) y Montes *et al.* (2018), reportan PN en ovejas de primer parto de pelibuey y en ovinos criollos de pelo de primer y segundo parto en adelante, inferiores a lo encontrado en la población analizada en el presente estudio.

Las variables dependientes que se vieron afectadas significativamente ( $p < 0,05$ ) por la EPNAC fueron PN, GDPRE, PAJ210 y GDPOS. En la EPNAC, los mejores promedios en el PN fueron para la

primera época seca, mientras que para las variables GDPRE, PAJ210 y GDPOS, se presentaron en la segunda época seca (Tabla 2). Estos resultados pueden estar relacionados al manejo y sistema de producción de la finca, que tienen temporadas de servicio y aporta alimentación durante todo el año a los ovinos, al tratarse de un sistema silvopastoril.

Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2012), Hinojosa-Cuéllar *et al.* (2013) y Ríos-Utrera *et al.* (2014) reportan el efecto de la EPONAC sobre el PN en corderos pelibuey, donde los valores más altos fueron observados en la época de lluvias; este efecto también se evidenció en el presente estudio. Para el PD, no hay concordancia entre los autores respecto a la influencia de la EPONAC, ya que Hinojosa-

Cuéllar *et al.* (2009; 2012) encontraron diferencias significativas en el PD en la época de lluvia, mientras que Ríos-Utrera *et al.* (2014), no reportaron diferencias, similar a lo encontrado en el presente estudio.

Tratar de entender el crecimiento de las diferentes razas de ovinos en los últimos años con modelos matemáticos es más común, gracias a los avances tecnológicos y computacionales. Para los ovinos de este estudio, las estimaciones de los modelos no lineales Gompertz, Logístico, Richards, Von Bertalanffy y Brody, en función del sexo, para los parámetros A, B, K y M y los criterios de ajuste, se encuentran relacionados en la tabla 3.

Tabla 3. Estimados de los parámetros A, B, K y M y criterios de ajuste para los diferentes modelos estudiados, para un cruce de ovino de pelo colombiano x pelibuey.

Modelo	Sexo	Estimación de parámetros				Criterios de ajuste			
		A	B	K	M	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub> (%)	BIC	AIC	RMSE
Gompertz	H	28,38	1,92	0,011		0,846	3498,0	3494,0	3,30
	M	32,35	1,96	0,010		0,866	4174,0	4169,0	3,39
Logistic	H	27,76	0,013	-	2,647	0,844	3511,4	3506,9	3,33
	M	31,55	0,013	-	2,691	0,864	4189,7	4185,1	3,42
Richards	H	35,13	0,954	0,004	0,815	0,852	3471,1	3466,6	3,24
	M	39,54	0,935	0,004	0,914	0,871	4145,6	4140,9	3,33
Von Bertalanffy	H	29,18	0,490	0,009		0,850	3487,8	3483,0	3,27
	M	33,41	0,500	0,008		0,868	4161,0	4156,8	3,36
Brody	H	32,59	0,906	0,005		0,852	3472,4	3467,9	3,24
	M	38,19	0,912	0,005		0,871	4145,9	4141,2	3,33

H: Hembra; M: Macho; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>: coeficiente de determinación ajustado; BIC: criterio de información Bayesiano; AIC: Criterio de información de Akaike; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error.

El R<sup>2</sup><sub>aj</sub> osciló entre 0,84 y 0,87, mientras que el PCC, que en todos los modelos fue de 100 % de convergencia, no fueron los mejores criterios de selección; al analizar el AIC y BIC, se observó que los modelos Richards y Brody tuvieron unas mínimas diferencias entre los dos criterios; sin embargo, se escogió el modelo Richards, como el de mejor ajuste satisfactorio a los datos de pesos, por su menor valor en el AIC y BIC, en ambos sexos (Tabla 3); por el contrario, Vergara-Garay *et al.* (2016), para describir la curva de crecimiento, el porcentaje y la edad de madurez de ovinos mestizos en un sistema de pastoreo intensivo, utilizó el modelo Brody, encontrando que se necesita mejorar el desarrollo corporal de los ovinos disminuyendo el tiempo que les toma llegar hasta la madurez; sin embargo, hay que tener en cuenta que los ovinos de pelo colombiano han tenido poco manejo genético comparado con el pelibuey.

Hossein-Zadeh & Golshani (2016), en ovejas guilan, analizaron el crecimiento desde el nacimiento hasta los 240 días, encontrando que, para las hembras, el modelo Richards fue el que mejor explicó los datos de crecimiento, mientras que, en los machos, fue el modelo Brody; no obstante, Simanca *et al.* (2016), al implementar

los mismos modelos, concluyeron que el mejor modelo de ajuste a los datos en ovinos santa inés x criollo fue Von Bertalanffy. Por el contrario, Rocha Sarmiento *et al.* (2006), en ovinos santa inés, describieron el crecimiento de los animales con el modelo Gompertz, mientras que Teixeira *et al.* (2012), evaluaron tres sistemas de producción en esta raza y encontraron que los modelos Richards y Brody se ajustaron bien en dos de los tres sistemas, lo que demuestra, que la variación de la raza, el tipo de alimentación, las condiciones ambientales y el sistema de producción influyen en la identificación del mejor modelo estadístico, que describe el crecimiento de los animales (Lupi *et al.* 2015c; Rocha Sarmiento *et al.* 2006).

En las figuras 1a y b, se observa que los pesos de las hembras y los machos estimados con los diferentes modelos tuvieron una predisposición de aumento, de acuerdo con la edad. Los modelos matemáticos evaluados formaron curvas muy similares en ambos sexos, con diferencia mínima después de los 300 días de edad, favoreciendo los modelos Brody y Richards. En la figura 2, se observa la curva de crecimiento correspondiente al efecto sexo,

con los valores estimados por el modelo Richards en la población, en la cual, se evidencia el dimorfismo sexual, gracias a la marcada superioridad percibida en los machos, desde el nacimiento hasta los 300 días de edad.

Los valores encontrados para los parámetros A y K (Tabla 3) indican una tasa de crecimiento lenta para alcanzar el peso asintótico y que las hembras serán más pesadas a la madurez. Estos valores fueron mayores a los encontrados por Rocha Sarmiento *et al.* (2006), en ovinos santa inés, al nacimiento hasta los 196 días, con el modelo

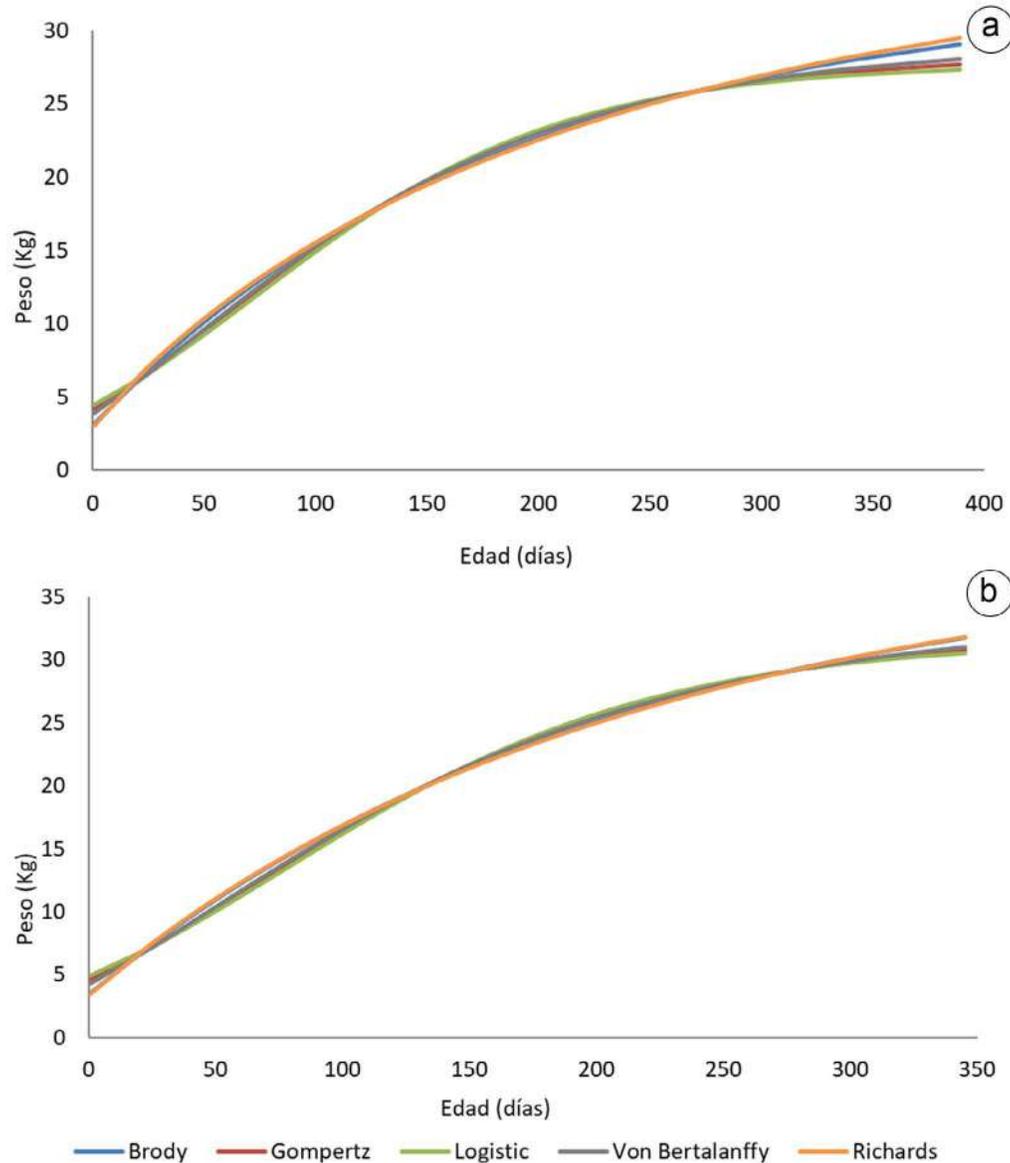


Figura 1. Curvas de crecimiento de los pesos estimados y ajustados de un cruce de ovino criollo de pelo colombiano x pelibuey, para los diferentes modelos. a) hembras y b) machos.

Gompertz y similares a los de Hossein-Zadeh & Golshani (2016), en ovejas guilan, con el mismo modelo de Richards, mientras que Simanca *et al.* (2016), en ovinos santa inés x criollo, no encontraron variación entre los valores de “K”, entre machos y hembras, con el modelo Von Bertalanffy, indicando igual velocidad de crecimiento, de acuerdo con el sexo, pero obtuvieron mayor peso a la madurez sexual en machos.

Algunos autores, como Simanca *et al.* (2016), Vergara-Garay *et al.* (2016) y Vergara-Garay *et al.* (2017) concuerdan que la velocidad

de crecimiento en animales mestizos es lenta, para llegar al peso adulto, de acuerdo con los valores en el parámetro “K”, que varían entre 0,003 a 0,005. Lo anterior explica que los animales de este estudio alcanzaron la madurez con un alto peso, pero con una tasa de crecimiento lenta, siendo la relación más importante para el productor, porque ayuda a tomar decisiones sobre el peso y la edad ideal al sacrificio de los animales.

La correlación entre los parámetros A y K es importante, porque indican la relación entre la tasa de crecimiento y el peso del animal,

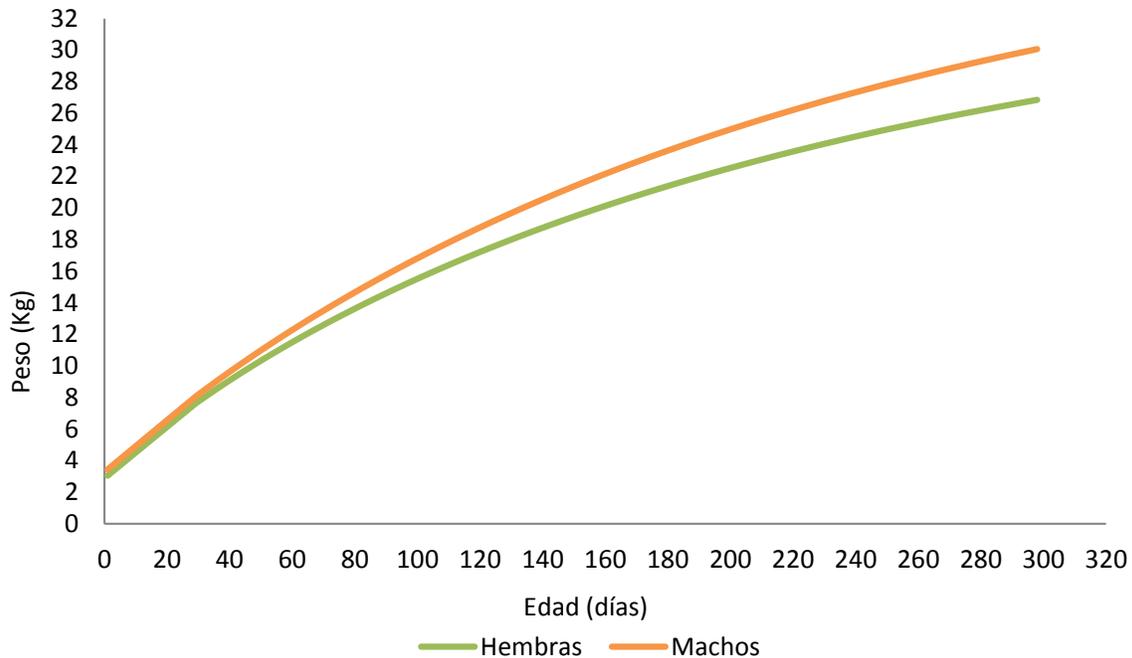


Figura 2. Curva de crecimiento de un cruce de ovino criollo de pelo colombiano x pelibuey, de acuerdo con el sexo, según el modelo de Richards.

que concuerda con los resultados obtenidos, con valor negativo, alto e iguales en ambos sexos (-0,98), encontrando una alta tasa de crecimiento y, por ende, bajos pesos a la madurez. Resultados similares son reportado por Hossein-Zadeh & Golshani (2016), Rocha Sarmiento *et al.* (2006) y De Fátima Sieklicki *et al.* (2016), en ovinos santa inés, texel y en ovejas guilan; sin embargo, Lupi *et al.* (2015b), Simanca *et al.* (2016), Teixeira *et al.* (2012) y Vergara-Garay *et al.* (2016), no tienen en cuenta este parámetro en sus estudios.

De la presente investigación, se puede concluir que el crecimiento en el cruce de ovino de pelo colombiano x pelibuey, empleado en la presente investigación, es influenciado por las variables S, TN, EPONA y NP. El sexo del cordero no afectó el PD, aunque el TN afectó todo el desarrollo del cordero, mientras que el NP afectó el PN y la GDPOS. Los datos muestran que el mejor crecimiento se obtuvo en épocas secas; asimismo, de los cinco modelos matemáticos utilizados para caracterizar el crecimiento de los ovinos, el que mejor se ajustó a los pesos a diferentes edades, de acuerdo con el sexo, fue el modelo Richards, marcando el dimorfismo sexual existente entre machos y hembras.

**Agradecimientos.** Los autores expresan su agradecimiento al grupo de investigación de Recursos Zoogenéticos, los laboratorios de genética y biología molecular de la Universidad Nacional de Colombia - sede Palmira; también a Colciencias, por la financiación de este estudio. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. AGUDELO-GÓMEZ, D.A.; CERÓN-MUÑOZ, M.; RESTREPO, L. 2008. Modelación de las funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 20(2):157-173.
2. ÁLVAREZ DÍAZ, A.; PÉREZ ESTEBAN, H.; MARTÍN HERNÁNDEZ, T. DE LA C.; QUINCOSA TORRES, J.; SÁNCHEZ PUZO, A. 2009. Fisiología del crecimiento. En: Álvarez Díaz, A.; Pérez Esteban, H.; Martín Hernández, T. De La C.; Quincosa Torres, J.; Sánchez Puzo, A. (eds.). *Fisiología animal aplicada*. Ed. Universidad de Antioquia. Colombia. p.256-281.
3. BRODY, S.; LARDY, H. 1945. Bioenergetics and growth. *The Journal of Physical Chemistry (New York)*. 50(2):168-169. <https://doi.org/10.1021/j150446a008>
4. DE FÁTIMA SIEKLIICKI, M.; BRENO PEDROSA, V.B.; GOMES ROCHA, C.G.; MOREIRA, R.P; FALCAO, P.R.; CORDEIRO DOS SANTOS, I.C.; EVANDRO, M.F; DE SOUZA MARTINS, A. 2016. Growth curves of Texel male lambs. *Acta Scientiae Veterinariae*. 44(1396):1-6. <https://doi.org/10.22456/1679-9216.81165>
5. GOMPERTZ, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 115:513-583.

6. HERRERA, J.; PULGARÓN, P.; NODA, A.C. 2008. Comportamiento productivo de ovinos Pelibuey en un sistema con bajos insumos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 42(1):45-49.
7. HINOJOSA-CUÉLLAR, J.A.; OLIVA-HERNÁNDEZ, J.; TORRES-HERNÁNDEZ, G.; SEGURA-CORREA, J.C. 2013. Comportamiento productivo de corderos F1 Pelibuey x Blackbelly y cruces con Dorper y Katahdin en un sistema de producción del trópico húmedo de Tabasco, México. *Archivos de Medicina Veterinaria*. 45:135-143. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2013000200004>
8. HINOJOSA-CUÉLLAR, J.A.; OLIVA-HERNÁNDEZ, J.; TORRES-HERNÁNDEZ, G.; SEGURA-CORREA, J.C.; ARANDA-IBÁÑEZ, E.M.; GONZÁLEZ-CAMACHO, J.M. 2012. Factores que afectan el crecimiento predestete de corderos Pelibuey en el trópico húmedo de México. *Universidad y Ciencia. Trópico Húmedo*. 28(2):163-171.
9. HINOJOSA-CUÉLLAR, J.A.; REGALADO-ARRAZOLA, F.; OLIVIA-HERNÁNDEZ, J. 2009. Crecimiento prenatal y predestete en corderos Pelibuey, Dorper, Katahdin y sus cruces en el sureste de México. *Revista Científica de La Facultad de Ciencias Veterinarias de La Universidad Del Zulia*. 19(5):522-532.
10. HOSSEIN-ZADEH, N.G.; GOLSHANI, M. 2016. Comparison of non-linear models to describe growth of Iranian Guilan sheep. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 29(3):199-209. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v29n3a05>
11. LENIS-VALENCIA, C.; HERNÁNDEZ-HERRERA, D.; ÁLVAREZ-FRANCO, L. 2021. Polimorfismos de los loci CAPN, CAST, LEP, GH, GHR, IGF-1 y MSTN de los cruces de pelo criollo colombiano x oveja Pelibuey. *Veterinarska stanica*. 52(1):35-44. <https://doi.org/10.46419/vs.52.1.6>
12. LUPI, T.M.; NOGALES, S.; LEÓN, J.M.; BARBA, C.; DELGADO, J.V. 2015a. Characterization of commercial and biological growth curves in the Segureña sheep breed. *Animal*. 9(8):1341-1348. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000567>
13. LUPI, T.M.; NOGALES, S.; LEÓN, J.M.; DELGADO, J.V. 2015b. Estudio de factores no genéticos sobre los parámetros de la función logística en la curva de crecimiento comercial del cordero Segureño. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*. 6:308-316.
14. LUPI, T.M.; NOGALES, S.; LEÓN, J.M.; DELGADO, J.V. 2015c. Modelación de curvas de crecimiento comercial en ovino Segureño. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*. 6:132-143.
15. MACEDO, R.; ARREDONDO, V. 2008. Efecto del sexo, tipo de nacimiento y lactancia sobre el crecimiento de ovinos Pelibuey en manejo intensivo. *Archivos de Zootecnia*. 57(218):219-228.
16. MARTÍNEZ, R.; MALAGÓN, S. 2005. Caracterización fenotípica y genética del ovino criollo colombiano. *Archivos de Zootecnia*. 54(206-207):342-348.
17. MOLINA C., C.H.; MOLINA D., C.H.; MOLINA D., E.J.; MOLINA E., J.J. 2012. Manejo agroecológico de caña de azúcar y sistemas silvopastoriles intensivos. *Tecnicaña*. 29:28-35.
18. MONTALVO, M.P.; ROMUALDO, M.G.; SIERRA, V.A.; ORTIZ, O.J.; HERNÁNDEZ, Z.J.; MEDRANO, H.A. 2009. Capítulo XVII: El ovino pelibuey en el trópico mexicano. En: Delgado Bermejo, J.V.; Nogales Baena, S. (eds). *Biodiversidad ovina Iberoamericana. Caracterización y uso sustentable*. p.363-376.
19. MONTES, D.E.; HERNÁNDEZ, D.Y.; PACHECO, A.; PRIETO, E.; OTERO, R. 2018. Factores genéticos-ambientales que afectan peso al nacer y peso al destete ajustado en ovinos de pelo criollo colombiano. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 19(5):1-8.
20. NELDER, J. 1961. The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics*. 17(1):89-110. <https://doi.org/10.2307/2527498>
21. PATIÑO, P.R.; VAN CLEEF, E. 2010. Aspectos chave do crescimento em ovinos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 2:399-421.
22. QUIROZ, J.; GUERRERO, G.; OLIVA, J.; GRANADOS, L.; BARRÓN, M. 2012. Evaluación genética de características de crecimiento del ovino Pelibuey en Tabasco, México. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*. 2:355-360.
23. REVELO, H.A.; LÓPEZ-ALVAREZ, D.; LANDI, V.; RIZZO, L.; ALVAREZ, L.A. 2020. Mitochondrial DNA variations in Colombian creole sheep confirm an Iberian Origin and shed light on the dynamics of introduction events of African genotypes. *Animals (Suiza)*. 10(9):1594. <https://doi.org/10.3390/ani10091594>
24. RICHARDS, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*. 10(29):290-300. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
25. RÍOS-UTRERA, Á.; CALDERÓN-ROBLES, R.; LAGUNES-LAGUNES, J.; OLIVA-HERNÁNDEZ, J. 2014. Ganancia de peso predestete en corderos Pelibuey y sus cruces con Blackbelly, Dorper y Katahdin. *Nova Scientia*. 6(12):272-286.

26. ROCHA SARMENTO, J.L.; REGAZZI, A.J.; DE SOUSA, W.H.; DE ALMEIDA TORRES, R.; BREDA, F.C.; DE OLIVEIRA MENEZES, G.R. 2006. Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 35(2):435-442.  
<https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000200014>
27. SAS INSTITUTE INC. SAS. 2013. Chapter 41. The GLM procedure. In: *SAS/STAT® 9.3 User's Guide*. SAS Institute Inc (Cary, NC). p.3132-3317.
28. SIMANCA, J.C.; VERGARA, O.D.; BUSTAMANTE, M.J. 2016. Descripción del crecimiento de ovinos Santa Ines x Criollo manejados en pastoreo extensivo en dos poblaciones de Córdoba, Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Veterinarias*. 57(1):61-67.
29. TEIXEIRA, M.C.; VILLARROEL, A.B.; PEREIRA, E.S.; DE OLIVEIRA, S.M.P.; ALBUQUERQUE, Í.A.; MIZUBUTI, I.Y. 2012. Curva de crescimento de cordeiros oriundos de três sistemas de produção na Região Nordeste do Brasil. *Semina: Ciências Agrárias*. 33(5):2011-2018.  
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n5p2011>
30. VERGARA-GARAY, O.; LLORENTE-M., E.; RAMOS-C., L.; BUSTAMANTE-YÁNEZ, M.; SIMANCA-SOTELO, J.C. 2016. Descripción del crecimiento en ovinos criollos utilizando el modelo Brody. *Orinoquia*. 20(2):34-39.
31. VERGARA GARAY, O.; MEDINA RÍOS, H.; ROBLES SIERRA, C.; SIMANCA SOTELO, J.; BUSTAMANTE YANEZ, M. 2017. Determinación de la curva de crecimiento en ovinos criollos de pelo, mediante la utilización del modelo Gompertz, en el trópico bajo colombiano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20(2):385-391.  
<https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.396>
32. VIVAS A., N.; LANDI, V.; MUÑOZ F., J.; BUSTAMANTE, M.; ÁLVAREZ, L. 2020. Diversidad genética de ovinos criollos colombianos. *Revista MVZ Córdoba*. 25(3):e2185.  
<https://doi.org/10.21897/rmvz.2185>
33. VON BERTALANFFY, L. 1938. A quantitative theory of organic growth (Inquiries on growth laws. II). *Human Biology*. 10(2):181-213.



# Zoometric and ethnological characterization of the colombian creole donkey in Sucre, Colombia

## Caracterización zoométrica y etnológica del asno criollo colombiano en Sucre, Colombia

Darwin Yovanny Hernández-Herrera<sup>1\*</sup> ; Diego Fernando Carrillo-Gonzalez<sup>2</sup> ; Donicer Eduardo Montes-Vergara<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ciencia Animal. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: dyhernandezh@unal.edu.co

<sup>2</sup>Universidad de Sucre, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Zootecnia. Sincelejo - Sucre, Colombia; e-mail: diego.carrillo@unisucra.edu.co; donicer.montes@unisucra.edu.co

\*corresponding author: milenagomez@uniquindio.edu.co

**How to cite:** Hernández-Herrera, D.Y.; Carrillo-Gonzalez, D.F.; Montes-Vergara, D.E. 2022. Zoometric and ethnological characterization of the colombian creole donkey in Sucre, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1948. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1948>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** May 7, 2021

**Accepted:** August 25, 2022

**Edited by:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

In Colombia, works performed with the colombian creole donkey (CCD) have shown a possible danger of extinction. The above, associate with an alarming decrease in its inventory and a reduction in genetic diversity. Thus, morphological characterization could be the first step for future conservation plans to conduct a repopulation. Therefore, this work aimed to characterize the zoometric and ethnological traits of CCD in five natural subregions of the department of Sucre. 20 males from each of the natural subregions from Sucre (Golfo de Morrosquillo: GM, Montes de María: MM, Mojana: MO, San Jorge: SJ, Sabanas: SA) with an age average of  $4.7 \pm 1.0$  years old and weight estimated between  $126.0 \pm 19.4$  kg were recorded and were submitted to 28 morphometric measurements. Descriptive statistics, analysis of variance between subregions, and hierarchical grouping for statistical analysis were performed. Also, five ethnological indices and five productive indices were estimated. The results showed that most of the zoometric variables varied significantly between subregions. The values assessed were similar to other creole donkey breeds. The hierarchical grouping analysis allowed the creation of two groups with geographic proximity. The structural homogeneity and morphostructural harmony found within the subregions were

medium-low. However, when analyzing all the CCD measurements together, medium to high morphostructural uniformity and harmony were evidenced. The ethnological indices allow us to classify the CCD as a longlinear, hypermetric, dolichocephalic, and concavilinear animal. In addition, the productive indices indicated that the CCD is a proportionate donkey, with good poise and aptitude for work.

**Keywords:** Animal morphology; Donkey; Ethnozootecnics; Genetic resource; *Equus asinus*.

### RESUMEN

Es posible que el asno criollo colombiano (ACC) se encuentre en peligro de extinción. La alarmante disminución de su inventario está reduciendo la diversidad genética. Así, la caracterización morfológica es un primer paso en futuros planes de conservación, con el objetivo de repoblación; por tanto, el objetivo de esta investigación fue caracterizar zoométricamente y etnológicamente el ACC, de las cinco subregiones naturales del departamento de Sucre. En 20 machos de cada una de las subregiones naturales del departamento de Sucre (Golfo de Morrosquillo: GM, Montes de María: MM, Mojana: MO, San Jorge: SJ, Sabanas: SA), con

edad promedio de  $4,7 \pm 1,0$  años y peso promedio estimado de  $126,0 \pm 19,4$ kg, se registraron 28 medidas morfométricas. En el análisis de datos, se consideró la estadística descriptiva, el análisis de varianza entre subregiones, análisis de agrupación jerárquica. También, se estimaron cinco índices etnológicos y cinco índices productivos. La mayoría de las variables zoométricas variaron significativamente entre subregiones, con valores similares a otras razas criollas. El análisis de agrupación jerárquica formó dos grupos con cercanía geográfica. La homogeneidad estructural y la armonía morfoestructural encontrada al interior de las subregiones fue media-baja; sin embargo, al analizar todo el ACC, la homogeneidad y la armonía morfoestructural fue media-alta. Los índices etnológicos clasifican al ACC como longilíneo, hiperométrico, dolicocefalo y concavilíneo, mientras que los índices productivos indican de un asno proporcionado, de buenos aplomos y de aptitud al trabajo.

Palabras clave: Burro; *Equus asinus*; Etnozootecnia; Morfología animal; Recurso genético.

## INTRODUCTION

The colombian creole donkey (CCD) is the result of the unstructured crossing from the donkey breeds brought to the American continent, during the colonization time (Jordana *et al.* 2016). Since then, CCD has contributed to the agricultural and social development in all of Colombia's regions. The CCD can be found throughout the national geography. However, historically, the Caribbean region has stood out for making great use of this genetic resource, both in its productive and cultural activities. In general, Creole donkeys are considered rustic, easily adapted to climatic conditions, with low nutritional requirements, and are resistant to diseases and ectoparasites, therefore they do not require special handling practices, have low maintenance costs, and have great strength and docility (Silva-Gómez *et al.* 2017).

Currently, the donkey inventory of the country is unknown, but it is presumed that its population decreased by 80 % between 1995 and 2013 (Medina-Montes *et al.* 2020). Therefore, it is possible to indicate that the CCD is at risk of extinction, like other colombian creole breeds, such as chickens (Montes *et al.* 2019), sheep (Hernández H. *et al.* 2019; Medina-Montes *et al.* 2021), cattle (Delgado *et al.* 2012) and pigs (Revidatti *et al.* 2014). A possible explanation for this phenomenon is the introduction of new breeds brought from other countries and the carrying out of indiscriminate absorbent type crosses, reducing the number of the inventory and the genetic diversity. Additionally, in the Caribbean region, the increase in the use of alternative means of transport and work such as motorcycles, together with the illegal trade to slaughter donkeys to obtain their skin and meat (Silva-Gómez *et al.* 2017; Medina-Montes *et al.* 2020), are two additional reasons that could explain this alarming decrease in the CCD inventory.

On the other hand, the decrease in the number of animals leads to the loss of the diversity of animal genetic resources (Salamanca Carreño *et al.* 2015), considered an important component of global biodiversity, which is a key element and raw material for genetic

improvement and adaptation to environmental conditions global (Boettcher *et al.* 2010). In Colombia, creole breeds have long been considered a natural and irreplaceable reservoir of genetic variability (Correa A. *et al.* 2015), due to their genetic origin, population structure, evolution and adaptation to tropical conditions due to more than 500 years and that possibly have keep gene variants already absent in foreign animal breeds and that in future events could be necessary for an introgression. Therefore, knowledge of morphometric variables is an important step for planning long-term sustainable conservation strategies (Rosenberg & Kang, 2015).

However, the CCD has remained forgotten by the scientific community; an example of this is evidenced in the scant information available on this genetic resource, not only in aspects such as its functional development, physiology, and pathology but also in zootechnical, morphological, and ethnological aspects. Based on the above, Medina-Montes *et al.* (2020) reported the first findings on genetic diversity using dominant molecular markers, but data related to its morphology and ethnology are non-existent. Therefore, basic studies, where morphological characterization methodologies are carried out, can be the starting point for future conservation plans for the breed. Therefore, this work aimed to characterize the zoometric and ethnological traits of CCD in five natural subregions of the department of Sucre.

## MATERIALS AND METHODS

**Populations and morphological measurements.** Overall, 100 animals (20 no-emasculate males) from each of the natural subregions in the department of Sucre, Colombia: Golfo de Morrosquillo: GM (tropical dry forest (t-df), the average temperature was  $28.7$  °C, 2 meters above sea level (m MSL) and precipitation was 2.123 mm per year); Montes de María: MM (t-df zone, the average temperature was  $27.7$  °C, 1.000 m MSL and precipitation to 1.275 mm per year); Mojana: MO (t-df zone, the average temperature was  $31$  °C, 25 m MSL and precipitation 125 mm per year); San Jorge: SJ (t-df zone, the average temperature of  $31$  °C, 25 m MSL and precipitation was 125 mm per year) and Sabanas: SA (t-df zone, the average temperature of  $26.1$  °C, 213 m MSL and precipitation 2274 mm per year). The average age was  $4.7 \pm 1.0$  years old. The body weight of the animals was estimated using an equinometric weighing tape measure (inalmet ®) following the manufacturer's instructions, due to the impossibility of quantifying the weight using a scale. A set of 28 morphometric measurements (cm) were recorded, taken with a zoometric stick, tape measure, and thickness compass (Jumbo Benítez *et al.* 2015; Fonseca Jiménez *et al.* 2016a; Sargentini *et al.* 2018).

Values assessed were facial length (FaL), length of the front (FoL), front length (FrL), head length (HL), full head length (FHL), and head width (HW). The measurements at the trunk level were: thoracic circumference (ThC), height at the withers (HeW), dorsal-sternal height (DSH), height at the sternum (HeS), height at the back (HeB), height at the back (HetB), height at the croup (HeCro), height to the pelvis (HeP), height to the ischium (HeI). The anterior height of the back (aHeB). The measured width was:

bicostal width (BiW), posterior chest width (pChW), anterior rump width (aRuWu), interiliac distance (InD) and posterior rump width (pRuW). The measured lengths were: body length (BoL), back length (BaL), scapula length (ScL), ilio-ischial length (ILisL), and occipital-coccygeal length (OcCoL). In the extremities, the perimeter of the anterior cane (PeraC) and the hock lift (HoL) were determined (Jumbo Benítez *et al.* 2015; Fonseca Jiménez *et al.* 2016a; Sargentini *et al.* 2018).

**Index estimation.** From the biometric measurements, the ethnological indices were estimated: corporal index ( $CI = BoL/ThC * 100$ ), thoracic index ( $ThI = BiW/DSD * 100$ ), ilio-ischial index ( $ILIsI = InD/ILisL * 100$ ), compactness index ( $ComI = Weight/HeW * 100$ ), pelvic index ( $PeI = ARuW/ILisL * 100$ ) and cephalic index ( $CepI = HW/Fal * 100$ ). The productive indices were also estimated: proportionality index ( $ProI = HeW/OcCoL * 100$ ), relative depth index ( $ReDeI = DSD/HeW * 100$ ), posterior foot index ( $PoFI = HoL/HeP * 100$ ), firewood load index ( $FrLI = PeraC/Weight * 100$ ) and dactyl-thoracic index ( $DaThI = PeraC/ThC * 100$ ) (Jumbo Benítez *et al.* 2015; Fonseca Jiménez *et al.* 2016b; Sargentini *et al.* 2018).

**Analysis of data.** Normality and homogeneity of variances tests were performed in each of the morphometric variables to confirm the validity of the data to factor analysis using the Kolmogórov-Smirnov test, Shapiro-Wilks test, and Bartlett sphericity test, where none of the variables showed statistical differences in the assumptions (at 5 % significance).

The mean, standard deviation (SD), and coefficient of variation (CV) were estimated for each of the grouped morphometric measures for each of the department's subregions. The CV values under 10 % were considered with little variability. Likewise, an analysis of variance and a Tukey-Kramer test ( $p \leq 0.05$ ) were performed to determine morphometric differences according to the subregion. Subsequently, a hierarchical cluster analysis was performed using the furthest neighbor clustering method and the squared Euclidean distance as an interval measure (Sargentini *et al.* 2018). The determination of the morphostructural homogeneity of the CCD within each of the evaluated subregions was carried out using the coefficient of variation for each measure analyzed. Also, the morphostructural harmony was evaluated by quantifying the percentage of positive and significant correlations of the Pearson correlation coefficients between the variables evaluated for each of the analyzed subregions (Flórez *et al.* 2018). The ethnological and productive indices were analyzed using descriptive statistics and analysis of variance between the study subregions. All statistical procedures were performed through InfoStat® version 2016I (Di Rienzo *et al.* 2016).

The whole procedure such as sample collection, handling, and conservation was approved by the Institutional Committee of Bioethics of the Universidad de Sucre, and those were conducted with the ethical, technical, scientific, and administrative standards for research on animals contained in "Ley 84 de 1989 del Congreso Nacional de Colombia".

## RESULTS AND DISCUSSION

This is the first report on the zoometric and ethnological characterization of the colombian creole donkey in the country. The estimated weight of the donkeys was  $126 \pm 19.4$  kg. Whereas, the age varied between 3 and 7 years, with an average of  $4.7 \pm 1.0$ ; both measurements varied between subregions ( $p < 0.05$ ). The average age found represents about 10 % of its useful life, so it is considered a young herd, taking into account that the longevity of the species can reach up to 50 years (Fonseca Jiménez *et al.* 2016a; 2016b). An ideal situation was found since it allows planning to work with the species on issues related to reproductive management, genetic improvement, and conservation plans.

With the zoometric measurements taken in the head (Table 1), only the full head length (FHL) did not have a significant variability ( $p > 0.05$ ) between regions. While, for the other head measurements (Fal, Fol, HW, Fil, and HL), the CCDs of the GM subregion had the highest values ( $p < 0.05$ ). The measurements of the cephalic region showed low variation and presented a longer head than it was wide. These values were higher than those reported in Cuban donkeys (Fonseca Jiménez *et al.* 2016a; 2016b) and Serbian donkeys (Ljubodrag *et al.* 2015), but slightly lower than those reported in donkey breeds: amiata from Italy (Cecchi *et al.* 2007), catalan (Jordana & Folch, 1998) and andalusian (Miró-Arias *et al.* 2011) from Spain. Cephalic variables appear to receive little influence from the environment, but they can provide important evidence of animal genetic diversity (Fonseca Jiménez *et al.* 2016a).

In the two measurements taken in the extremities (PeraC and HoL), the donkeys from the MM subregion presented the lowest measurements ( $p < 0.05$ ). The measure evaluated PeraC was higher in the donkeys of the GM and the HoL of the donkeys of the SA region (Table 1). The PeraC and HoL measurements were superior to those presented in different breeds around the world (Jordana & Folch, 1998; Cecchi *et al.* 2007; Miró-Arias *et al.* 2011; Pimentel *et al.* 2014; Fonseca Jiménez *et al.* 2016a).

Differences between the subregions of the department for the eight elevations evaluated at the trunk level were found ( $p < 0.05$ ). The five measures of width or diameters (BiW, pChW, aRuW, InD, and pRuW), were significantly higher ( $p < 0.05$ ) in the donkeys of the GM, while the lowest values were presented by the donkeys of the regions MM and MO. The lengths, body length (BoL), back length (BaL), scapula length (ScL), ilio-ischial length (ILisL), and occipito-coccygeal length (OcCoL), varied significantly between the subregions of the study. The thoracic circumference averaged  $114.4 \pm 7.0$  cm, with the highest value in the GM subregion and the lowest in the MM subregion (Table 1). In the measurements of the trunk region, a greater height at the rump was found, and a lower height at the withers, bicostal width, and thoracic perimeter than other donkeys in the world (Jordana & Folch, 1998; Cecchi *et al.* 2007; Pimentel *et al.* 2014; Fonseca Jiménez *et al.* 2016a). Back length (BaL) and body length (BoL) were similar to the results reported in donkeys from Italy (Sargentini *et al.* 2018). These results allow showing the conformation of a donkey suitable

Table 1. Descriptive statistics and comparison of averages, for 28 morphometric measures, age and estimated weight, in colombian creole donkeys (CCD), from the five natural subregions from department of Sucre.

Body Measure	GM					MM					MO				
	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
Age	5.1 <sup>bc</sup>	1.1	3.0	7.0	21.8	4.3 <sup>ab</sup>	1.1	3.0	6.0	25.1	4.1 <sup>a</sup>	0.9	3.0	6.0	22.5
Weight	136.8 <sup>b</sup>	20.1	103.0	174.0	14.7	117.7 <sup>ab</sup>	26.4	70.0	160.0	22.4	129.8 <sup>ab</sup>	14.6	106.0	174.0	11.3
HeW	109.8 <sup>ab</sup>	5.4	103.0	120.0	4.9	105.7 <sup>a</sup>	6.6	92.0	114.0	6.2	107.8 <sup>a</sup>	5.9	92.0	117.0	5.4
DSH	51.4 <sup>c</sup>	2.8	45.0	56.0	5.4	48.1 <sup>ab</sup>	5.2	32.0	56.0	10.7	50.3 <sup>bc</sup>	2.9	45.0	56.0	5.7
HeS	64.0 <sup>c</sup>	3.4	58.0	70.0	5.4	62.0 <sup>bc</sup>	4.8	55.0	70.0	7.7	62.5 <sup>c</sup>	3.4	55.0	70.0	5.4
HeB	62.6 <sup>b</sup>	3.5	57.0	70.0	5.6	58.6 <sup>a</sup>	3.8	54.0	65.0	6.4	60.9 <sup>a</sup>	3.3	55.0	68.0	5.4
HetB	110.5 <sup>bc</sup>	5.0	102.0	119.0	4.6	106.1 <sup>a</sup>	5.6	94.0	118.0	5.3	107.8 <sup>ab</sup>	5.1	94.0	119.0	4.7
HeCro	113.0 <sup>bc</sup>	5.8	103.0	121.0	5.1	107.7 <sup>a</sup>	6.0	97.0	116.0	5.5	115.1 <sup>c</sup>	3.5	110.0	121.0	3.1
HeP	98.2 <sup>a</sup>	10.4	61.0	110.0	10.6	94.9 <sup>a</sup>	6.8	83.0	105.0	7.2	97.5 <sup>a</sup>	10.5	61.0	113.0	10.8
HeI	12.8 <sup>a</sup>	0.9	11.0	15.0	7.3	12.9 <sup>a</sup>	0.9	11.0	14.0	6.6	12.9 <sup>a</sup>	0.8	11.0	14.0	5.9
AHeB	109.0 <sup>bc</sup>	5.3	103.0	118.0	4.9	104.5 <sup>a</sup>	5.0	95.0	113.0	4.8	106.9 <sup>ab</sup>	4.6	95.0	116.0	4.3
BiW	24.6 <sup>b</sup>	2.7	20.0	30.0	11.1	20.4 <sup>a</sup>	2.3	17.0	26.0	11.4	21.8 <sup>a</sup>	2.5	17.0	28.0	11.6
pChW	18.1 <sup>b</sup>	2.5	14.0	23.0	13.8	14.1 <sup>a</sup>	1.9	11.0	17.0	13.2	15.0 <sup>a</sup>	2.8	11.0	22.0	18.5
aRuW	32.6 <sup>ab</sup>	2.4	30.0	37.0	7.3	31.4 <sup>a</sup>	2.4	27.0	35.0	7.5	31.4 <sup>a</sup>	2.1	28.0	36.0	6.6
InD	16.5 <sup>ab</sup>	1.1	15.0	18.0	6.7	15.7 <sup>a</sup>	1.3	14.0	18.0	8.2	16.0 <sup>a</sup>	1.1	14.0	18.0	6.7
pRuW	20.4 <sup>b</sup>	2.9	17.0	28.0	14.0	16.2 <sup>a</sup>	1.3	14.0	18.0	8.0	16.9 <sup>a</sup>	3.2	14.0	24.0	19.1
BoL	126.4 <sup>c</sup>	2.6	121.0	130.0	9.7	127.5 <sup>c</sup>	1.9	125.0	133.0	7.0	126.8 <sup>c</sup>	2.3	121.0	131.0	8.5
BaL	59.6 <sup>ab</sup>	5.0	48.0	69.0	8.3	57.9 <sup>a</sup>	4.3	51.0	65.0	7.5	58.0 <sup>a</sup>	3.9	52.0	65.0	6.7
ScL	45.1 <sup>ab</sup>	3.0	40.0	50.0	6.7	42.7 <sup>a</sup>	3.3	36.0	49.0	7.8	44.4 <sup>ab</sup>	2.8	39.0	50.0	6.3
ILisL	32.1 <sup>b</sup>	2.4	28.0	37.0	7.5	29.5 <sup>a</sup>	4.2	21.0	37.0	14.2	30.7 <sup>ab</sup>	3.5	22.0	37.0	11.4
OcCoL	150.1 <sup>bc</sup>	12.6	126.0	183.0	8.4	141.3 <sup>ab</sup>	10.9	120.0	160.0	7.7	138.2 <sup>a</sup>	11.4	104.0	156.0	8.3
ThC	118.3 <sup>b</sup>	5.4	111.0	128.0	4.6	110.4 <sup>a</sup>	8.5	94.0	124.0	7.7	115.5 <sup>ab</sup>	7.5	95.0	128.0	6.5
PeraC	22.1 <sup>b</sup>	1.8	20.0	25.0	8.3	20.4 <sup>a</sup>	2.3	17.0	25.0	11.3	21.6 <sup>ab</sup>	1.8	17.0	25.0	8.4
HoL	45.2 <sup>ab</sup>	2.4	41.0	49.0	5.4	43.2 <sup>a</sup>	3.1	38.0	49.0	7.1	43.9 <sup>ab</sup>	2.7	38.0	49.0	6.0
Fal	49.1 <sup>b</sup>	2.6	45.0	55.0	5.3	46.6 <sup>a</sup>	2.7	42.0	50.0	5.7	48.5 <sup>ab</sup>	3.2	42.0	55.0	6.5
FoL	21.1 <sup>c</sup>	0.5	21.0	23.0	2.3	20.3 <sup>ab</sup>	0.5	20.0	21.0	2.4	20.7 <sup>bc</sup>	0.4	20.0	21.0	2.1
HW	13.7 <sup>c</sup>	0.6	13.0	15.0	4.2	12.9 <sup>ab</sup>	0.8	12.0	14.0	6.1	13.0 <sup>b</sup>	1.0	11.0	15.0	7.5
FrL	21.5 <sup>b</sup>	1.1	20.0	25.0	5.3	20.6 <sup>a</sup>	0.9	18.0	22.0	4.6	21.2 <sup>ab</sup>	1.2	18.0	24.0	5.6
HL	14.3 <sup>b</sup>	1.3	12.0	16.0	8.8	12.5 <sup>a</sup>	0.9	11.0	14.0	7.5	12.4 <sup>a</sup>	1.9	10.0	16.0	15.1
FHL	53.0 <sup>a</sup>	3.2	48.0	60.0	6.0	51.1 <sup>a</sup>	3.3	45.0	57.0	6.4	52.3 <sup>a</sup>	3.0	46.0	59.0	5.8
Age	4.8 <sup>abc</sup>	0.8	3.0	6.0	16.4	5.4 <sup>c</sup>	0.8	4.0	6.0	14.0	4.7	1.0	3.0	7.0	21.9
Weight	117.3 <sup>a</sup>	12.0	97.0	132.0	10.2	128.3 <sup>a</sup>	14.4	102.0	172.0	11.2	126.0	19.4	70.0	174.0	15.4
HeW	105.9 <sup>a</sup>	3.3	100.0	111.0	3.1	112.9 <sup>b</sup>	3.6	105.0	118.0	3.2	108.4	5.7	92.0	120.0	5.3
DSH	47.3 <sup>a</sup>	2.6	42.0	53.0	5.5	48.0 <sup>ab</sup>	1.3	46.0	50.0	2.8	49.1	3.5	32.0	56.0	7.1
HeS	57.1 <sup>a</sup>	3.1	51.0	62.0	5.4	59.6 <sup>ab</sup>	2.2	55.0	63.0	3.6	61.0	4.2	51.0	70.0	6.9
HeB	61.2 <sup>ab</sup>	2.7	53.0	65.0	4.5	62.8 <sup>b</sup>	3.0	58.0	68.0	4.8	61.3	3.6	53.0	70.0	5.8
HetB	105.9 <sup>a</sup>	3.0	100.0	110.0	2.9	112.4 <sup>c</sup>	3.3	107.0	118.0	3.0	108.6	5.1	94.0	119.0	4.7
HeCro	109.5 <sup>ab</sup>	3.5	102.0	115.0	3.2	110.2 <sup>ab</sup>	5.3	97.0	120.0	4.8	111.1	5.5	97.0	121.0	5.0
HeP	99.1 <sup>ab</sup>	3.6	90.0	103.0	3.6	105.2 <sup>b</sup>	4.7	97.0	114.0	4.4	99.0	8.3	61.0	114.0	8.4
HeI	13.1 <sup>a</sup>	0.2	13.0	14.0	1.7	13.1 <sup>a</sup>	0.2	13.0	14.0	1.7	13.0	0.7	11.0	15.0	5.1
AHeB	108.1 <sup>ab</sup>	5.5	99.0	117.0	5.1	112.4 <sup>c</sup>	3.6	106.0	117.0	3.2	108.2	5.4	95.0	118.0	5.0
BiW	21.7 <sup>a</sup>	1.6	20.0	24.0	7.2	20.5 <sup>a</sup>	1.2	18.0	24.0	6.0	21.8	2.6	17.0	30.0	12.0
pChW	14.8 <sup>a</sup>	1.0	13.0	17.0	7.0	15.3 <sup>a</sup>	0.7	14.0	17.0	4.4	15.5	2.4	11.0	23.0	15.2
aRuW	32.6 <sup>ab</sup>	2.3	29.0	36.0	7.0	34.0 <sup>b</sup>	1.5	31.0	37.0	4.4	32.4	2.3	27.0	37.0	7.1
InD	16.3 <sup>ab</sup>	0.9	15.0	17.0	5.7	17.0 <sup>b</sup>	0.0	17.0	17.0	0.0	16.3	1.1	14.0	18.0	6.5
pRuW	17.3 <sup>a</sup>	3.3	14.0	24.0	19.0	20.8 <sup>ab</sup>	1.1	20.0	24.0	5.2	18.4	3.1	14.0	28.0	17.1
BoL	124.1 <sup>b</sup>	2.3	121.0	129.0	9.5	121.6 <sup>a</sup>	1.3	120.0	125.0	5.9	125.3	3.0	120.0	133.0	11.9
BaL	59.3 <sup>ab</sup>	4.1	49.0	65.0	6.9	62.8 <sup>b</sup>	2.6	56.0	65.0	4.1	59.5	4.3	48.0	69.0	7.3
ScL	46.5 <sup>bc</sup>	3.2	40.0	50.0	6.9	48.9 <sup>c</sup>	1.1	46.0	50.0	2.3	45.6	3.5	36.0	50.0	7.6
ILisL	32.1 <sup>b</sup>	1.4	30.0	34.0	4.5	31.5 <sup>ab</sup>	1.3	30.0	34.0	4.1	31.2	2.9	21.0	37.0	9.3
OcCoL	149.1 <sup>bc</sup>	8.3	131.0	165.0	5.6	152.6 <sup>c</sup>	6.0	139.0	163.0	3.9	146.3	11.4	104.0	183.0	7.8
ThC	112.3 <sup>a</sup>	5.7	98.0	121.0	5.1	115.4 <sup>ab</sup>	5.1	106.0	125.0	4.4	114.4	7.0	94.0	128.0	6.1
PeraC	21.4 <sup>ab</sup>	1.8	18.0	24.0	8.4	20.9 <sup>ab</sup>	1.8	19.0	25.0	8.8	21.3	2.0	17.0	25.0	9.3
HoL	45.1 <sup>ab</sup>	2.0	40.0	48.0	4.5	45.4 <sup>b</sup>	0.9	44.0	47.0	2.0	44.6	2.4	38.0	49.0	5.5
Fal	48.2 <sup>ab</sup>	1.4	44.0	51.0	3.0	48.5 <sup>ab</sup>	1.9	46.0	53.0	3.9	48.2	2.5	42.0	55.0	5.2
FoL	20.4 <sup>ab</sup>	0.7	19.0	22.0	3.3	20.1 <sup>a</sup>	0.3	20.0	21.0	1.5	20.6	0.6	19.0	23.0	3.0
HW	12.3 <sup>ab</sup>	0.9	11.0	14.0	7.1	12.3 <sup>a</sup>	0.7	12.0	14.0	5.3	12.9	0.9	11.0	15.0	7.2
FrL	21.3 <sup>ab</sup>	1.2	19.0	23.0	5.7	20.4 <sup>a</sup>	0.8	19.0	22.0	3.7	21.0	1.1	18.0	25.0	5.4
HL	12.3 <sup>a</sup>	1.9	10.0	15.0	15.2	14.8 <sup>b</sup>	0.4	14.0	15.0	2.8	13.3	1.7	10.0	16.0	13.0
FHL	52.5 <sup>a</sup>	2.0	50.0	56.0	3.8	52.1 <sup>a</sup>	2.3	50.0	57.0	4.4	52.2	2.8	45.0	60.0	5.4

<sup>a,b,c</sup> Different letters in the same line indicate statistically different averages between subregions ( $p < 0.05$ ). GM: Golfo de Morrosquillo. MM: Montes de María. MO: Mojana. SJ: San Jorge. SA: Sabanas. SD: standard deviation. Min: minimum. Max: maximum. CV: coefficient of variation. HeW: height at the withers. DSH: dorsal-sternal height. HeS: height at the sternum. HeB: height at the back. HetB: height at the back. HeCro: height at the croup. HeP: height to the pelvis. HeI: height to the ischium. aHeB: anterior height of the back. BiW: bicostal width. pChW: posterior chest width. aRuW: anterior rump width. InD: interiliac distance. pRuW: posterior rump width. BoL: body length. BaL: back length. ScL: scapula length. ILisL: ilio-ischial length. OcCoL: occipital-coccygeal length. ThC: thoracic circumference. PeraC: perimeter of the anterior cane. HoL: hock lift. Fal: facial length. FoL: length of the front. HW: head width. FrL: front length. HL: head length. FHL: full head length.

for the saddle and hiking, in which the long back, together with a large chest should predominate. The foregoing coincides with the management given to the CCD in the MM and SA subregions, where it is used as a means of transport (Medina-Montes *et al.* 2020). Also, a large barrel (bicostal width, BiW) indicates a suitable respiratory biotype for dynamic activities, as occurs in the GM and SJ subregions, where the use of CCD is more for the loading of inputs and agricultural products. Additionally, the use of donkeys for onotherapy requires short and long animals since it facilitates the human approach during donkey therapy (Karatosidi *et al.* 2013). From this point, the CCD presented a total length (OcCoL) slightly higher than the reports of Ethiopian donkeys (Kefena *et al.* 2014), Czechs (Kostuková *et al.* 2015), Italians (Sargentini *et al.* 2018), and Cubans (Fonseca Jiménez *et al.* 2016a), suggesting potential new use of the species.

The results seem to indicate that the morphological variation is not only related to the productive function of the CCD within the production system, but also to the geographical and climatic conditions in which they were reared. This is confirmed by hierarchical cluster analysis. The studied subregions allowed the formation of two groups (Figure 1), the first made up of the SJ and SA donkeys and the second made up of the MO, MM, and GM animals. All the zoometric measures evaluated for each of the groups (Table 2) varied significantly ( $p < 0.05$ ). Thus, group one was superior in 60.1 % of the zoometric measurements, showing a higher CCD at the withers and larger hindquarters. For its part, group two presented a CCD of greater amplitude in the anterior region and larger head. Coincidentally, the two groups formed have similar geographic proximity and agroclimatic conditions, although the potential use of the donkey in each of them is potentially different. In addition, the absence of genetic improvement programs within the species may lead to increased inbreeding within each subregion. All this agrees with work on genetic diversity previously carried out

by Medina-Montes *et al.* (2020) in this same department and with some of these same animals. Another factor that could affect the organization of the groups is related to the grouping method used. The Euclidean distance, which, although it is simple to estimate, has the disadvantage of being sensitive to the units of measurement of the variables (Arredondo *et al.* 2015). Thus, variables of greater magnitude will contribute to a greater extent to the observed variation than variables of lesser magnitude. The above explains why the groups are determined by high-value morphological variables such as lengths, widths, and perimeters taken at the level of the trunk.

The variation degree in the body structure is used to establish morphostructural homogeneity. The coefficient of variation is used as an indicator, thus, the higher the CV, the lower the homogeneity (Flórez *et al.* 2018). It is considered that a CV lower than 4 % indicates a great homogeneity, between 5 and 9 % indicates a medium degree of uniformity and if it is greater than 10 %, a high variability should be considered in the context of the sample studied (Salamanca Carreño *et al.* 2015). The coefficients of variation for the entire population and trunk measurements varied between 5.0 and 17.1 % (Table 1). For measurements in extremities between 5.5 and 9.3 %. Finally, for the head measurements between 3.0 and 13.0 %. The lowest average CV was presented by the donkeys from the SA subregion, while the highest value was presented by the animals from the MO subregion (Table 1). In this sense, the measurements at the extremities of the CCD indicate a medium homogeneity, while the measurements of the trunk and head have low and medium-low homogeneity, respectively. There are no reports on this type of determination in other breeds of donkeys in the world, however, in araucanian creole horses of Colombia (CCC), CVs lower than 10 % are presented (Salamanca Carreño *et al.* 2015) and in colombian hair sheep (OPC) values lower than 13.63 % (Flórez *et al.* 2018).

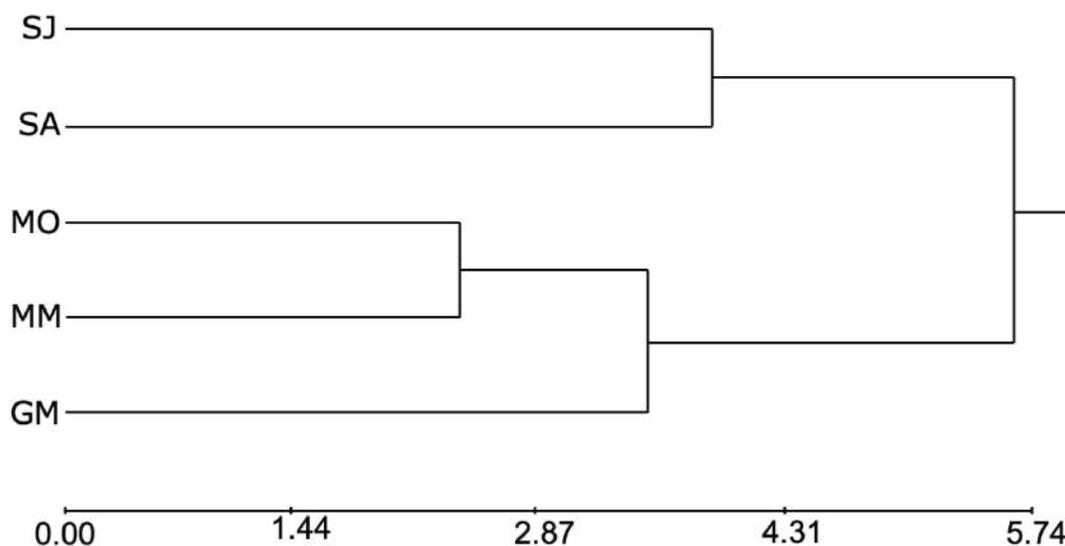


Figure 1. The hierarchical conglomerate of classification by the similarity of the colombian creole donkeys (CCD) of the five natural subregions from department of Sucre. GM: Golfo de Morrosquillo. MM: Montes de María. MO: Mojana. SJ: San Jorge. SA: Sabanas.

Table 2. Body measurements of the colombian creole donkey (CCD) groups according to the hierarchical cluster analysis.

Body Measure	Group 1 (SA and SJ. n=40)					Group 2 (GM. MM and MO. n=60)				
	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
Age	5.1 <sup>a</sup>	0.4	4.8	5.4	8.32	4.5 <sup>b</sup>	0.5	4.1	5.1	11.76
Weight	122.8 <sup>b</sup>	7.8	117.3	128.3	6.33	128.1 <sup>a</sup>	9.7	117.7	136.8	7.54
HeW	109.4 <sup>a</sup>	4.9	105.9	112.9	4.52	107.8 <sup>b</sup>	2.1	105.7	109.8	1.90
DSH	47.7 <sup>b</sup>	0.5	47.3	48.0	1.04	49.9 <sup>a</sup>	1.7	48.1	51.4	3.37
HeS	58.4 <sup>b</sup>	1.8	57.1	59.6	3.03	62.8 <sup>a</sup>	1.0	62.0	64.0	1.66
HeB	62.0 <sup>a</sup>	1.1	61.2	62.8	1.82	60.7 <sup>b</sup>	2.0	58.6	62.6	3.31
HetB	109.2 <sup>a</sup>	4.6	105.9	112.4	4.21	108.1 <sup>b</sup>	2.2	106.1	110.5	2.05
HeCro	109.9 <sup>a</sup>	0.5	109.5	110.2	0.45	111.9 <sup>b</sup>	3.8	107.7	115.1	3.41
HeP	105.2 <sup>a</sup>	0.0	105.2	105.2	0.00	96.9 <sup>b</sup>	1.7	94.9	98.2	1.80
HeI	13.1 <sup>a</sup>	0.0	13.1	13.1	0.00	12.9 <sup>b</sup>	0.1	12.8	12.9	0.45
AHeB	110.3 <sup>a</sup>	3.0	108.1	112.4	2.76	106.8 <sup>b</sup>	2.3	104.5	109.0	2.11
BiW	21.1 <sup>b</sup>	0.8	20.5	21.7	4.02	22.3 <sup>a</sup>	2.1	20.4	24.6	9.60
pChW	15.1 <sup>b</sup>	0.4	14.8	15.3	2.35	15.7 <sup>a</sup>	2.1	14.1	18.1	13.34
aRuW	33.3 <sup>a</sup>	1.0	32.6	34.0	2.97	31.8 <sup>b</sup>	0.7	31.4	32.6	2.18
InD	16.7 <sup>a</sup>	0.5	16.3	17.0	2.97	16.1 <sup>b</sup>	0.4	15.7	16.5	2.52
pRuW	19.1 <sup>a</sup>	2.5	17.3	20.8	12.99	17.8 <sup>b</sup>	2.3	16.2	20.4	12.62
BoL	122.9 <sup>b</sup>	1.8	121.6	124.1	1.44	126.9 <sup>a</sup>	0.6	126.4	127.5	0.44
BaL	61.1 <sup>a</sup>	2.5	59.3	62.8	4.05	58.5 <sup>b</sup>	1.0	57.9	59.6	1.63
ScL	47.7 <sup>a</sup>	1.7	46.5	48.9	3.56	44.1 <sup>b</sup>	1.2	42.7	45.1	2.80
ILisL	31.8 <sup>a</sup>	0.4	31.5	32.1	1.33	30.8 <sup>b</sup>	1.3	29.5	32.1	4.23
OcCoL	150.9 <sup>a</sup>	2.5	149.1	152.6	1.64	143.2 <sup>b</sup>	6.2	138.2	150.1	4.31
ThC	113.9 <sup>b</sup>	2.2	112.3	115.4	1.93	114.7 <sup>a</sup>	4.0	110.4	118.3	3.49
PeraC	21.2 <sup>b</sup>	0.4	20.9	21.4	1.67	21.4 <sup>a</sup>	0.9	20.4	22.1	4.09
HoL	45.3 <sup>a</sup>	0.2	45.1	45.4	0.47	44.1 <sup>b</sup>	1.0	43.2	45.2	2.30
Fal	48.4 <sup>a</sup>	0.2	48.2	48.5	0.44	48.1 <sup>b</sup>	1.3	46.6	49.1	2.72
FoL	20.3 <sup>b</sup>	0.2	20.1	20.4	1.05	20.7 <sup>a</sup>	0.4	20.3	21.1	1.93
HW	12.3 <sup>b</sup>	0.0	12.3	12.3	0.00	13.2 <sup>a</sup>	0.4	12.9	13.7	3.30
FrL	20.9 <sup>b</sup>	0.6	20.4	21.3	3.05	21.1 <sup>a</sup>	0.5	20.6	21.5	2.17
HL	13.6 <sup>a</sup>	1.8	12.3	14.8	13.05	13.1 <sup>b</sup>	1.1	12.4	14.3	8.18
FHL	52.3 <sup>a</sup>	0.3	52.1	52.5	0.54	52.1 <sup>b</sup>	1.0	51.1	53.0	1.84

<sup>a,b</sup> Different letters in the same line indicate statistically different averages between subregions ( $p < 0.05$ ). GM: Golfo de Morrosquillo. MM: Montes de María. MO: Mojana. SJ: San Jorge. SD: standard deviation. Min: minimum. Max: maximum. CV: coefficient of variation. HeW: height at the withers. DSH: dorsal-sternal height. HeS: height at the sternum. HeB: height at the back. HetB: height at the back. HeCro: height at the croup. HeP: height to the pelvis. HeI: height to the ischium. aHeB: anterior height of the back. BiW: bicostal width. pChW: posterior chest width. aRuW: anterior rump width. InD: interiliac distance. pRuW: posterior rump width. BoL: body length. BaL: back length. ScL: scapula length. ILisL: ilio-ischial length. OcCoL: occipital-coccygeal length. ThC: thoracic circumference. PeraC: perimeter of the anterior cane. HoL: hock lift. Fal: facial length. FoL: length of the front. HW: head width. FrL: front length. HL: head length. FHL: full head length.

Most of the genes that influence structural conformation are not local, but general. Hence the importance of estimating the harmony of the morphostructural model, which is made from the amount of significant positive correlations between the measurements. Therefore, the higher this percentage, the more structurally harmonic the animal is (Flórez *et al.* 2018). These results showing an average structural harmony in the donkeys of the MM (53.2 %) and MO (47.3 %). While, the asses of GM, MA, and SJ presented low structural harmony, with values of 38.2, 19.7, and 18.7 %, respectively. On the other hand, when analysing all the subregions as a single population and the 406 possible correlations,

the percentage of positive and significant correlations increased to 74.9 %, indicating high morphostructural harmony (Table 3). This last value is unusual in an autochthonous population without racial recognition. Although, the absence of reproductive management plans can increase consanguinity and favour positive correlations. Compared with other reports of colombian creole species, morphostructural harmony differed from CCC and OPC where only 26.9 and 62.3 % of significant positive correlations were reached, respectively (Salamanca Carreño *et al.* 2015; Flórez *et al.* 2018).

Table 3. Pearson's correlation coefficients between the variables measured in colombian creole donkeys CCD.

	Weight	HeW	DSH	HeS	HeB	HetB	HeCro	HeP	HeI	AHeB	BiW	pChW	aRuW	InD
Weight	—													
HeW	0.682**	—												
DSH	0.447**	0.312*	—											
HeS	0.418**	0.393**	0.428**	—										
HeB	0.467**	0.645**	0.169	0.369**	—									
HetB	0.618**	0.861**	0.267*	0.467**	0.655**	—								
HeCro	0.653**	0.842**	0.297*	0.418**	0.634**	0.901**	—							
HeP	0.284*	0.604**	0.096	0.167	0.609**	0.574**	0.546**	—						
HeI	0.014	0.143	0.040	0.062	0.051	0.140	0.164	0.262	—					
AHeB	0.576**	0.833**	0.215*	0.202*	0.690**	0.799**	0.772**	0.593**	0.162	—				
BiW	0.522**	0.332**	0.501**	0.361**	0.328**	0.355**	0.355**	0.062	-0.062	0.237*	—			
pChW	0.578**	0.517**	0.502**	0.352**	0.452**	0.538**	0.474**	0.116	-0.135	0.458**	0.731**	—		
aRuW	0.409**	0.495**	0.200*	0.091	0.326**	0.487**	0.451**	0.368**	0.215*	0.533**	0.253*	0.391**	—	
InD	0.521**	0.549**	0.352**	0.190	0.375**	0.539**	0.497**	0.290*	0.147	0.554**	0.342**	0.531**	0.826**	—
pRuW	0.367**	0.429**	0.181	0.032	0.405**	0.487**	0.468**	0.177**	-0.100	0.534**	0.246*	0.537**	0.587**	0.626**
BoL	0.126	-0.095	0.250*	0.392**	-0.136	-0.157	-0.156	-0.222*	-0.080	-0.229*	0.290*	0.058	-0.221*	-0.245*
BaL	0.413**	0.621**	0.169	0.099	0.469**	0.567**	0.526**	0.403**	0.099	0.624**	0.141	0.388**	0.563**	0.576**
ScL	0.430**	0.517**	0.213*	0.088	0.478**	0.532**	0.538**	0.496**	0.163	0.656**	0.132	0.285**	0.596**	0.611**
ILisL	0.408**	0.457**	0.208*	0.260**	0.356**	0.418**	0.478**	0.210*	0.040	0.380**	0.332**	0.364**	0.324**	0.464**
OcCoL	0.515**	0.588**	0.202*	0.101	0.466**	0.555**	0.548**	0.401**	0.077	0.557**	0.359**	0.383**	0.484**	0.507**
ThC	0.809**	0.729**	0.464**	0.373**	0.484**	0.693**	0.689**	0.357**	0.105	0.692**	0.551**	0.639**	0.541**	0.597**
PeraC	0.502**	0.582**	0.310*	0.325**	0.510**	0.495**	0.450**	0.336**	0.002	0.495**	0.480**	0.472**	0.199*	0.273*
HoL	0.194	0.463	0.147	0.353**	0.504**	0.497**	0.490**	0.357**	0.238*	0.546**	0.190	0.328**	0.294*	0.308*
FaL	0.495**	0.535**	0.300*	0.398**	0.475**	0.568**	0.584**	0.267*	0.023	0.548**	0.398**	0.430**	0.371**	0.361**
FoL	0.415**	0.232*	0.337**	0.335**	0.260*	0.215*	0.221*	-0.009	0.005	0.107	0.554**	0.404**	-0.145	-0.063
HW	0.389**	0.168	0.349**	0.400**	0.147	0.272*	0.190	-0.073	-0.108	0.107	0.439**	0.451**	0.116	0.223*
FrL	0.433**	0.359**	0.392**	0.393**	0.240*	0.320*	0.327**	0.108	-0.026	0.224**	0.580**	0.391**	0.095	0.149
HL	0.246*	0.357**	0.076	0.065	0.341**	0.440**	0.397**	0.173	-0.016	0.450**	0.089	0.389**	0.415**	0.489**
FHL	0.514**	0.532**	0.264*	0.309*	0.482**	0.511**	0.497**	0.265*	-0.044	0.469**	0.463**	0.421**	0.339**	**
	pRuW	BoL	BaL	ScL	ILisL	OcCoL	ThC	PeraC	HoL	FaL	FoL	HW	FrL	HL
Weight														
HeW														
DSH														
HeS														
HeB														
HetB														
HeCro														
HeP														
HeI														
AHeB														
BiW														
pChW														
aRuW														
InD														
pRuW	—													
BoL	-0.385*	—												
BaL	0.506**	-0.313**	—											
ScL	0.399**	-0.441**	0.496**	—										
ILisL	0.206*	-0.145	0.206*	0.348**	—									
OcCoL	0.320*	-0.175	0.558**	0.560**	0.348**	—								
ThC	0.462**	0.099	0.454**	0.472**	0.494**	0.514**	—							
PeraC	0.118	0.212*	0.377**	0.243*	0.320*	0.425**	0.622**	—						
HoL	0.252*	-0.088	0.224*	0.431**	0.327**	0.247*	0.336**	0.422**	—					
FaL	0.276*	0.164	0.414**	0.351**	0.289*	0.413**	0.561**	0.590**	0.407**	—				
FoL	0.015	0.372**	0.032	-0.011	0.109	0.148	0.377**	0.465**	0.096	0.286*	—			
HW	0.314**	0.299*	0.217*	-0.005	0.070	0.056	0.377**	0.389**	0.177	0.270*	0.524**	—		
FrL	-0.075	0.307*	0.108	0.173	0.331**	0.361**	0.507**	0.544**	0.275*	0.474**	0.534**	0.262*	—	
HL	0.817**	-0.459**	0.431**	0.388**	0.136	0.215*	0.294*	-0.021	0.265*	0.055	-0.014	0.288*	-0.208*	—
FHL	0.127	0.150	0.403**	0.267*	0.347**	0.488**	0.532**	0.660**	0.207*	0.710**	0.378**	0.207*	0.568**	-0.043

\*p < 0.05, \*\*p < 0.001. HeW: height at the withers. DSH: dorsal-sternal height. HeS: height at the sternum. HeB: height at the back. HetB: height at the back. HeCro: height at the croup. HeP: height to the pelvis. HeI: height to the ischium. aHeB: anterior height of the back. BiW: bicostal width. pChW: posterior chest width. aRuW: anterior rump width. InD: interiliac distance. pRuW: posterior rump width. BoL: body length. BaL: back length. ScL: scapula length. ILisL: ilio-ischial length. OcCoL: occipital-coccygeal length. ThC: thoracic circumference. PeraC: perimeter of the anterior cane. HoL: hock lift. FaL: facial length. FoL: length of the front. HW: head width. FrL: front length. HL: head length. FHL: full head length.

Of the six estimated ethnological indices (Table 4), only the ilio-ischial index (ILisI) did not vary significantly between subregions. The donkeys from the GM subregion presented the highest values (p < 0.05) in the corporal index (CI), compactness index (ComI), and cephalic index (CepI), on the other hand, the CCDs from the MM region presented the corporal index (CI) and pelvic index (PelI) higher. The estimated body index shows a long-line donkey, as the donkeys of the Calabria (101.94 ± 2.9) (Liotta *et al.* 2014) and Tuscany (91.2 ± 8.7) regions (Sargentini *et al.* 2009) in Italy, but also in the creole donkeys of Cuba (91.79 ± 1.9) (Fonseca Jiménez *et*

*al.* 2016b) and Ecuador (100.0 ± 1.0) (Jumbo Benítez *et al.* 2015). In the same way, the thoracic index (ThI), categorizes the CCD as longilinear, like the Italian donkeys (Sargentini *et al.* 2009; Liotta *et al.* 2014) and other Creoles (Jumbo Benítez *et al.* 2015; Fonseca Jiménez *et al.* 2016b). The CCD shows a proportionate croup, although, for pelvic index values greater than 100, this is classified as concavilinear. This agrees with the Ecuadorian donkey with an index of 112.6 (Jumbo Benítez *et al.* 2015) but does not agree with the Cuban donkey (Fonseca Jiménez *et al.* 2016b) with an index of 92.6, showing a rump of convex lines. The estimated compactness

index was higher than that reported in Calabrian donkeys (Liotta *et al.* 2014), indicating a longline animal. The cephalic index (CepI) refers to the harmony of the proportions of the head in general, this data classifies the CCD as dolichocephalic because it has an CepI less than 100, where the longitudinal diameters of the head prevail over the transverse diameters. This is similar to that reported in donkeys from Ecuador and Cuba (Jumbo Benítez *et al.* 2015; Fonseca Jiménez *et al.* 2016b), although this estimate in these animals was higher (29.0 and 31.9, respectively).

The productive indices: posterior foot index (PoFI), firewood load index (FrLI), and dactyl-thoracic index (DaThI) did not vary significantly between subregions ( $p > 0.05$ ). On the other hand, the proportionality index (ProI) was higher in the MO subregion and the relative depth index (ReDeI) in the donkeys of the GM region (Table 4). The ReDeI indicates a CCD with good proportionality and aptitude for work (Jumbo Benítez *et al.* 2015), although the value obtained was less than 50. The above is correlated with motor aptitude or drag of large masses, determined by the firewood load index, which in this case shows an animal with strong limbs with

Table 4. Descriptive statistics of the ethnological and productive indices of the colombian creole donkeys (CCD) of the five natural subregions from department of Sucre.

Index	GM					MM					MO				
	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
CI	106.9 <sup>a</sup>	4.9	99.2	115.2	4.5	116.2 <sup>b</sup>	8.8	104.1	134.0	7.6	110.2 <sup>b</sup>	7.4	99.2	131.6	6.8
ThI	47.9 <sup>b</sup>	4.9	38.5	57.7	10.2	42.7 <sup>a</sup>	6.0	35.4	62.5	14.1	43.3 <sup>a</sup>	3.9	37.8	50.9	8.9
ILIsI	51.7 <sup>a</sup>	4.4	43.2	58.1	8.5	54.1 <sup>a</sup>	7.0	44.1	70.8	12.9	52.6 <sup>a</sup>	6.2	46.9	70.8	11.7
ComI	124.3 <sup>b</sup>	15.1	100.0	152.7	12.1	110.4 <sup>a</sup>	19.2	75.0	140.4	17.4	120.4 <sup>ab</sup>	11.7	101.0	148.7	9.7
PelI	353.9 <sup>ab</sup>	25.9	316.2	428.6	7.3	371.1 <sup>b</sup>	52.5	310.8	523.8	14.2	361.8 <sup>ab</sup>	34.6	310.8	445.8	9.6
CepI	27.9 <sup>b</sup>	1.5	24.5	30.4	5.4	27.7 <sup>b</sup>	2.1	24.0	31.8	7.7	26.8 <sup>ab</sup>	2.2	24.0	31.0	8.2
ProI	73.5 <sup>a</sup>	4.8	63.9	84.1	6.5	74.9 <sup>ab</sup>	3.1	68.4	79.2	4.1	78.4 <sup>b</sup>	7.0	68.0	101.0	8.9
ReDeI	46.9 <sup>b</sup>	2.3	42.5	52.4	4.9	45.7 <sup>b</sup>	4.9	28.1	52.0	10.6	46.7 <sup>b</sup>	2.5	41.7	52.4	5.3
PoFI	46.7 <sup>a</sup>	6.4	37.3	68.9	13.7	45.7 <sup>a</sup>	3.7	40.0	53.5	8.2	45.6 <sup>a</sup>	6.4	37.3	68.9	14.0
FrLI	16.4 <sup>a</sup>	2.2	11.9	21.4	13.5	17.9 <sup>a</sup>	3.2	14.0	24.3	17.9	16.8 <sup>a</sup>	1.7	13.6	19.8	10.2
DaThI	18.7 <sup>a</sup>	1.4	16.3	20.9	7.3	18.5 <sup>a</sup>	1.4	15.7	21.7	7.6	18.7 <sup>a</sup>	1.2	16.7	20.7	6.3
Index	SJ					SA					All				
	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
CI	110.8 <sup>ab</sup>	6.4	101.7	127.6	5.8	105.5 <sup>a</sup>	4.2	97.6	114.2	4.0	109.9	7.4	97.6	134.0	6.7
ThI	45.9 <sup>ab</sup>	3.4	37.7	51.1	7.3	42.8 <sup>a</sup>	3.2	36.7	52.2	7.4	44.5	4.8	35.4	62.5	10.7
ILIsI	50.9 <sup>a</sup>	3.1	45.5	56.7	6.1	54.1 <sup>a</sup>	2.2	50.0	56.7	4.0	52.7	4.9	43.2	70.8	9.4
ComI	110.7 <sup>a</sup>	10.4	92.6	123.1	9.4	113.5 <sup>ab</sup>	10.8	94.4	147.0	9.5	115.8	14.6	75.0	152.7	12.6
PelI	342.2 <sup>a</sup>	16.7	311.8	371.0	4.9	366.2 <sup>ab</sup>	19.7	323.5	403.3	5.4	359.0	33.3	310.8	523.8	9.3
CepI	25.6 <sup>a</sup>	1.7	22.5	29.2	6.6	25.4 <sup>a</sup>	1.5	22.6	29.2	5.9	26.7	2.1	22.4	31.8	7.7
ProI	71.2 <sup>a</sup>	3.8	65.5	79.1	5.4	74.1 <sup>a</sup>	2.6	68.8	80.0	3.5	74.4	5.0	63.9	101.0	6.7
ReDeI	44.7 <sup>ab</sup>	2.2	40.4	48.6	5.0	42.6 <sup>a</sup>	2.0	39.3	47.6	4.7	45.3	3.3	28.1	52.4	7.3
PoFI	45.5 <sup>a</sup>	2.2	41.7	48.4	4.9	43.3 <sup>a</sup>	1.5	40.7	45.5	3.5	45.3	4.6	37.3	68.9	10.0
FrLI	18.4 <sup>a</sup>	2.3	14.8	24.0	12.4	16.7 <sup>a</sup>	1.8	12.8	19.6	11.0	17.2	2.4	11.9	24.3	13.9
DaThI	19.1 <sup>a</sup>	1.5	16.4	22.0	7.8	18.1 <sup>a</sup>	1.3	16.4	20.7	7.0	18.6	1.3	15.7	22.0	7.2

<sup>a,b,c</sup> Different letters in the same line indicate statistically different averages between subregions ( $p < 0.05$ ). SD: standard deviation. Min: minimum. Max: maximum. CV: coefficient of variation. GM: Golfo de Morrosquillo. MM: Montes de María. MO: Mojana. SJ: San Jorge. SA: Sabanas. SD: standard deviation; CV: coefficient of variation. Min: minimum. Max: maximum. CI: corporal index. ThI: thoracic index. ILIsI: ilio-ischial index. ComI: compactness index. PelI: pelvic index. CepI: cephalic index. ProI: proportionality index. ReDeI: relative depth index. PoFI: posterior foot index. FrLI: firewood load index. DaThI: dactyl-thoracic index.

good towing and carrying capacity. The PoFI is considered ideal when it is equal to 33, in this work the value obtained was higher, showing animals with a low rump. The DaThI also called the metacarpal-thoracic index is an indicator of the size of the animal (small, medium, or large) since it determines the relationship between the mass of the individual and the limbs that support it. In this sense, the CCD can be considered as hypermetric or heavy, this also indicates that it has larger members than necessary. As hypermetric, the donkeys of Ecuador (Jumbo Benítez *et al.* 2015), Romagnolo  $11.9 \pm 0.9$  (Beretti *et al.* 2005) and the Tuscany region of  $13.1 \pm 1.0$  (Sargentini *et al.* 2009) are also categorized, while the Cuban donkeys are more of the hypometric or ellipometric type (Fonseca Jiménez *et al.* 2016b).

In conclusion, the CCD has high morphological variability, as it does not present a defined zootechnical aptitude, its genetic improvement can be directed according to the needs of the producer, this could not only include loading and dragging but also onotherapy. Likewise, the CCD can be classified as longilinear, hypermetric, dolichocephalic, and concavilinear, proportionate, with good poise and aptitude for work.

**Acknowledgments:** To the University of Sucre for the financing of this research and the owners of the donkeys evaluated for their high collaboration. **Conflict of interest:** The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all the authors, who declare that does not exist any conflict of interest that could jeopardize the validity of the results presented.

## REFERENCES

1. ARREDONDO, V.; MACEDO, R.; MOLINA, J.; MAGAÑA, J.; PRADO, O.; GARCÍA, L. 2015. Análisis multivariado de la variación morfológica de la oveja pelibuey en Colima, México. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal-AICA (España)*. 5:87-92.
2. BERETTI, V.; ZANON, A.; SOFFIANTINI, C.; SABBIONI, A. 2005. Preliminary results about morphological and demographic traits of Romagnolo donkey. *Annali della Facoltà di Medicina Veterinaria (Italia)*. 25:131-144.
3. BOETTCHER, P.J.; TIXIER-BOICHARD, M.; TORO, M.A.; SIMIANER, H.; EDING, H.; GANDINI, G.; JOOST, S.; GARCIA, D.; COLI, L.; AJMONE-MARSAN, P.; THE GLOBALDIV CONSORCIO. 2010. Objectives, criteria and methods for using molecular genetic data in priority setting for conservation of animal genetic resources. *Animal Genetics*. 41(Supl. 1):64-77.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02050.x>
4. CECCHI, F.; CIAMPOLINI, R.; CIANI, E.; MAZZANTI, E.; TANCREDI, M.; PRESCIUTTINI, S. 2007. Morphological characterization of the Amiata donkey breed through the data reported in the anagraphic register. *Italian Journal of Animal Science (Italia)*. 6(Supl 1):70.  
<https://doi.org/10.4081/ijas.2007.1s.70>
5. CORREA A., L.; REYES E., C.; PARDO P., E.; CAVADIA M., T. 2015. Genetic diversity detection of the domestic horse (*Equus caballus*) by genes associated with coat color. *Revista MVZ Córdoba*. 20(3):4779-4789.  
<https://doi.org/10.21897/rmvz.47>
6. DELGADO, J.V.; MARTÍNEZ, A.M.; ACOSTA, A.; ÁLVAREZ, L.A.; ARMSTRONG, E.; CAMACHO, E.; CAÑÓN, J.; CORTÉS, O.; DUNNER, S.; LANDI, V.; MARQUES, J.R.; MARTÍN-BURRIEL, I.; MARTÍNEZ, O.R.; MARTÍNEZ, R.D.; MELUCCI, L.; MUÑOZ, J.E.; PENEDO, M.C.T.; POSTIGLIONI, A.; QUIRÓZ, J.; RODELLAR, C.; SPONENBERG, P.; UFFO, O.; ULLOA-ARVIZU, R.; VEGA-PLA, J.L.; VILLALOBOS, A.; ZAMBRANO, D.; ZARAGOZA, P.; GAMA, L.T.; GINJA, C. 2012. Genetic characterization of Latin-American creole cattle using microsatellite markers. *Animal Genetics (Estados Unidos)*. 43(1):2-10.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02207.x>
7. DI RIENZO, J.; BALZARINI, M.; GONZALEZ, L.; CASANOVA, F.; TABLADA, M.; ROBLEDO C. 2016. InfoStat: Software Estadístico. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible desde Internet en:  
<https://www.infostat.com.ar/> (con acceso el 06/06/2020).
8. FLÓREZ, J.M.; HERNÁNDEZ, M. DE J.; BUSTAMANTE, M. DE J.; VERGARA, O.D. 2018. Caracterización morfoestructural de tres poblaciones de Ovino de Pelo Criollo Colombiano "OPC". *Archivos de Zootecnia*. 67(259):340-348.  
<https://doi.org/10.21071/az.v67i259.3789>
9. FONSECA JIMÉNEZ, Y.; CEDEÑO MOLINA, I.; PÉREZ PINEDA, E.; RODRÍGUEZ VALERA, Y.; MARTÍNEZ AGUILAR, Y.; COS DOMÍNGUEZ, Y.; CHACÓN MARCHECO, E. 2016a. Caracterización zoométrica del asno criollo cubano (*Equus asinus asinus*), en la provincia Granma, Cuba. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria (Cuba)*. 17(3):1-11.
10. FONSECA JIMÉNEZ, Y.; PÉREZ PINEDA, E.; MARTÍNEZ AGUILAR, Y.; FONT FUENTES, H.; CHACÓN MARCHECO, E. 2016b. Parámetros biométricos del asno criollo cubano (*Equus asinus asinus*), en la región oriental de Cuba. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria (Cuba)*. 17(10):1-10.
11. HERNÁNDEZ H., D.; MONTES V., D.; DE LA OSSA V., J. 2019. Asociación del polimorfismo FecB con la prolificidad natural del Ovino de Pelo Colombiano. *Revista MVZ Córdoba*. 25(1):e1771.  
<https://doi.org/10.21897/rmvz.1771>
12. JORDANA, J.; FERRANDO, A.; MIRÓ, J.; GOYACHE, F.; LOARCA, A.; MARTÍNEZ LÓPEZ, O.R.; CANELÓN, J.L.; STEMMER, A.; AGUIRRE, L.; LARA, M.A.C.; ÁLVAREZ, L.A.; LLAMBÍ, A.S.; GÓMEZ, N.; GAMA, L.T.; NÓVOA, M.F.; MARTÍNEZ, R.D.; PÉREZ, E.; SIERRA, A.; CONTRERAS, M.A.; GUASTELLA, A.M.; MARLETTA, D.; ARSENO, G.; CURIK, I.; LANDI, V.; MARTÍNEZ, A.; DELGADO, J.V. 2016. Genetic relationships among American donkey populations: Insights into the process of colonization. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 133(2):155-164.  
<https://doi.org/10.1111/jbg.12180>
13. JORDANA, J.; FOLCH, P. 1998. La raza asnal Catalana: programa de conservación y mejora de una población en peligro de extinción. *Archivos de Zootecnia*. 47(178):403-409.
14. JUMBO BENÍTEZ, N.C.; MEJÍA T., M.; FERNÁNDEZ GUARNIZO, P.; BENITEZ GONZÁLEZ, E.E.; JUMBO J., D.; VARGAS REYES, J. 2015. Caracterización fenotípica y zoométrica del asno criollo (*Equus asinus*), cantón Gonzanamá, provincia de Loja. *Revista del Colegio de Médicos Veterinarios del Estado Lara (Venezuela)*. 14(2):1-7.
15. KARATOSIDI, D.; MARSICO, G.; TARRICONE, S. 2013. Modern use of donkeys. *Iranian Journal of Applied Animal Science (Iran)*. 3(1):13-17.

16. KEFENA, E.; DESSIE, T.; TEGEGNE, A.; BEJA-PEREIRA, A.; YUSUF KURTU, M.; ROSENBOM, S.; HAN, J.L. 2014. Genetic diversity and matrilineal genetic signature of native ethiopian donkeys (*Equus asinus*) inferred from mitochondrial DNA sequence polymorphism. *Livestock Science*. 167:73-79.  
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.06.006>
17. KOSTŮKOVÁ, M.; ČERNOHORSKÁ, H.; BIHUNCOVÁ, I.; ORAVCOVÁ, I.; SOBOTKOVÁ, E.; JISKROVÁ, I. 2015. Characteristics of morphological parameters of donkeys in the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis (República Checa)*. 63(2):419-424.  
<https://doi.org/10.11118/actaun201563020419>
18. LIOTTA, L.; ARCUDI, D.; PANETTA, C.; SICLARI, A.; D'ALESSANDRO, E. 2014. Uso dell'analisi d'immagine per la caratterizzazione fenotípica della popolazione asinina Calabrese. *Archivos de Zootecnia (España)*. 63(243):551-554.  
<https://doi.org/10.21071/az.v63i243.535>
19. LJUBODRAG, S.; VLADIMIR, D.; PREDRAG, S.; NADA, L.; IVICA, R.; ANTE, I.; JEVROSIMA, S.; ZORAN, S. 2015. Morphological, biochemical and hematological characterization of endangered Balkan donkey breed. *Acta Veterinaria (Polonia)*. 65(1):125-136.  
<https://doi.org/10.1515/acve-2015-0010>
20. MEDINA-MONTES, A.; CARRILLO-GONZALEZ, D.F.; HERNÁNDEZ-HERRERA, D.Y. 2021. Association of a genetic polymorphism in the BMPR-1B gene, and non-genetic factors with the natural prolificacy of the colombian-haired sheep. *Tropical Animal Health and Production (Estados Unidos)*. 53(2):206.  
<https://doi.org/10.1007/s11250-021-02651-0>
21. MEDINA-MONTES, A.; HERNÁNDEZ-HERRERA, D.; BELTRÁN-HERRERA, J.; MONTES-VERGARA, D. 2020. Genetic diversity of the colombian creole donkey in the department of Sucre. *Veterinarska stanica (Eslovaquia)*. 51(6):611-619.  
<https://doi.org/10.46419/vs.51.6.2>
22. MIRÓ-ARIAS, M.; GÓMEZ, M.; NOGALES, S.; MARTÍN, A.; DELGADO, J.V. 2011. Estudio morfométrico de la cabaña actual de la raza asnal Andaluza. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal AICA (España)*. 1:106-109.
23. MONTES VERGARA, D.; DE LA OSSA V., J.; HERNÁNDEZ H., D. 2019. Caracterización morfológica de la gallina criolla de traspatio de la subregión Sabana departamento de Sucre (Colombia). *Revista MVZ Córdoba*. 24(2):7218-7224.  
<https://doi.org/10.21897/rmvz.1646>
24. PIMENTEL, M.L.; PINHEIRO, M.; FILHO, H.M.; SAKAMOTO, S.M.; NOBRE, F.V.; DIAS, R.V.; DA, C. 2014. Parâmetros biométricos de asininos (*Equus asinus*) utilizados em provas de corrida no estado do Rio Grande do Norte. *Acta Veterinaria Brasilica (Brasil)*. 8(2):136-143.  
<https://doi.org/10.21708/avb.2014.8.2.3579>
25. REVIDATTI, M.A.; DELGADO-BERMEJO, J.V.; GAMA, L.T.; LANDI-PERIATI, V.; GINJA, C.; ALVAREZ, L.A.; VEGA-PLA, J.L.; MARTÍNEZ, A.M.; BIOPIG CONSORTIUM. 2014. Genetic characterization of local Criollo pig breeds from the Americas using microsatellite markers. *Journal of Animal Science (Estados Unidos)*. 92(11):4823-4832.  
<https://doi.org/10.2527/jas.2014-7848>
26. ROSENBERG, N.A.; KANG, J.T.L. 2015. Genetic diversity and societally important disparities. *Genetics (Estados Unidos)*. 201(1):1-12.  
<https://doi.org/10.1534/genetics.115.176750>
27. SALAMANCA CARREÑO, A.; MONRROY, N.; PARÉS-CASANOVA, P.M.; CROSBY G., R.A. 2015. Aporte a la evaluación para la preservación del caballo criollo araucano en Colombia. *Zootecnia Tropical (Venezuela)*. 33(4):317-315.
28. SARGENTINI, C.; TOCCI, R.; LORENZINI, G.; GIANANGELI, B.; MARTINI, A.; GALLAI, S.; GIORGETTI, A. 2009. Morphological characteristics of Amiata donkey reared in Tuscany. *Italian Journal of Animal Science (Italia)*. 8(Sup. 2):721-723.  
<https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s2.721>
29. SARGENTINI, C.; TOCCI, R.; MARTINI, A.; BOZZI, R. 2018. Morphological characterization of Amiata donkey through multivariate analyses. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 47:e20170310.  
<https://doi.org/10.1590/rbz4720170310>
30. SILVA-GÓMEZ, S.E.; RODRÍGUEZ-GALVÁN, G.; HERNÁNDEZ-ZEPEDA, J.S.; ZARAGOZA-MARTÍNEZ, L.; PALESTINA-GONZÁLEZ, M.I. 2017. El asno para transporte y carga. *AICA (España)*. 10:83-87.



## Curvas de crecimiento en ovino de pelo colombiano en los departamentos de Córdoba y Cesar, Colombia

### Growth curves in Colombian hair sheep in the Departments of Córdoba and Cesar, Colombia

Jorge Noriega-Márquez<sup>1</sup> , Darwin Hernández-Herrera<sup>2</sup> , Moris Bustamante-Yáñez<sup>3</sup> , Luz Álvarez-Franco<sup>4</sup> ,  
Manuel Ariza-Botero<sup>5</sup> , Yineth Palacios-Erazo<sup>4</sup> , Oscar Vergara-Garay<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación El Nus. San Roque - Antioquia, Colombia; e-mail: jnoriega@agrosavia.co

<sup>2</sup>Universidad de Sucre, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación en Reproducción y Mejoramiento Genético Animal. Sincelejo - Sucre, Colombia; e-mail: darwin.hernandez@unisucra.edu.co

<sup>3</sup>Universidad de Córdoba, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Grupo de Investigación en producción Animal Tropical. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: morisbustamante@correo.unicordoba.edu.co, overgara@correo.unicordoba.edu.co

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación en Recursos Zoogenéticos. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: laalvarezf@unal.edu.co, ypalacios@unal.edu.co

<sup>5</sup>Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación en Genética Molecular Animal. Bogotá, Colombia; e-mail: mfarizab@unal.edu.co  
\*autor de correspondencia: overgara@correo.unicordoba.edu.co

**Cómo citar:** Noriega-Márquez, J.; Hernández-Herrera, D.; Bustamante-Yáñez, M.; Álvarez-Franco, L.; Ariza-Botero, M.; Palacios-Erazo, Y.; Vergara-Garay, O. 2022. Curvas de crecimiento en ovino de pelo colombiano en los departamentos de Córdoba y Cesar, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1727. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1727>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** octubre 1 de 2020

**Aceptado:** agosto 18 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

La producción ovina en los últimos años en Colombia, se considera como una actividad con miras a exportación de carne, por lo cual, es necesario conocer el desempeño productivo de las diferentes razas dedicadas a este propósito en las regiones, con un número considerable de animales respecto al inventario nacional; por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue describir el crecimiento en ovinos de pelo colombiano en los departamentos de Córdoba y Cesar, Colombia. Se utilizaron 99 animales de los biotipos Sudán y Etíope. Fueron evaluados los modelos Gompertz, Von Bertalanffy, Brody y Logístico. Los parámetros para obtener las curvas de crecimiento fueron estimados por medio del procedimiento NLIN de SAS. Utilizando el modelo de mejor ajuste, se determinó el porcentaje y la edad de madurez. El modelo Brody fue el que

mejor ajustó los datos. El sexo no tuvo efecto significativo sobre los parámetros estimados, mientras que el biotipo racial fue significativo para todos los parámetros estimados, con la excepción de  $\beta_1$ ; la zona presentó efecto significativo sobre  $\beta_0$  y  $\beta_2$  y la época solo para  $\beta_1$ . De acuerdo con los parámetros de la curva Brody estimados y a los porcentajes y edades a la madurez, en las poblaciones en estudio, se debe mejorar la alimentación de los animales e implementar un programa de selección, con el fin de mejorar los pesos de los animales, al llegar a la edad adulta.

Palabras clave: Corderos; Modelo Brody; Ovino criollo; *Ovis aries*; Crecimiento y desarrollo.

## ABSTRACT

Sheep production in recent years in Colombia is considered as an activity for the exportation of meat, therefore, it is necessary to know the productive performance of the different breeds dedicated to this purpose in the regions with a considerable number of animals with respect to national inventory. Therefore, the purpose of this research was to describe the growth in Colombian hair sheep in the departments of Cordoba and Cesar, Colombia. 99 animals of the Sudan and Ethiopian biotypes were used. The Gompertz, Von Bertalanffy, Brody and Logistic models were evaluated. The parameters of the growth curves were estimated by the procedure NLIN of SAS. Using the best fit model, the percentage and age of maturity were determined. The Brody model was the one that best fit the data. Sex had no significant effect on the estimated parameters, while racial biotype was significant for all estimated parameters, with the exception of  $\beta_1$ ; the zone presented a significant effect on  $\beta_0$  and  $\beta_2$ ; and the season only for  $\beta_1$ . According to the estimated parameters of the Brody curve and the percentages and ages at maturity, in the populations under study, the feeding of the animals should be improved and a conduct a selection program, in order to improve the weights of the animals at reach adulthood.

Keywords: Brody model; Creole sheep; Lambs; Growth and development; *Ovis aries*.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia existe una diversidad de ovinos, denominados ovinos criollos, resultado del cruce de diferentes razas, desde la época de la colonización y que se adaptaron a diferentes regiones del país (Vergara Garay *et al.* 2017a). Dentro de estos ovinos, se encuentran los Sudán y los Etíope, considerados como dos poblaciones con características y potencial morfoestructural diferente (Flórez *et al.* 2018; Vivas A. *et al.* 2020).

En Colombia, el sector ovino ha tomado importancia dentro de los diferentes sistemas de producción y mercadeo. Este sector, se caracteriza por la producción de cárnicos, la crianza de animales como reproductores y vientres, para abastecer las granjas que quieran multiplicar sus rebaños o iniciar nuevos proyectos (Acero-Plazas, 2014). Además, la producción ovina del país, se caracteriza por la utilización de razas introducidas y criollas y de cruzamientos entre ellas, con el fin de fortalecer el vigor híbrido, para la producción de carne. Estos sistemas productivos son extensivos y semi-intensivos, con baja a mediana incorporación de tecnología y, por lo general, pertenecientes a pequeños productores (Vergara-Garay *et al.* 2017b). Estas explotaciones son el eje central de la agricultura familiar y el abastecimiento de pequeños nichos de mercado, cumpliendo con una función económica importante (Acero-Plazas, 2014).

La conservación de los recursos zoogenéticos tiene importancia, a nivel mundial, ya que, para la implementación de programas de mejoramiento, en los cuales, se seleccionen aquellos animales superiores para características productivas y que tenga adaptabilidad a un entorno determinado, facilita este proceso y se puede lograr

mayor progreso genético, en un tiempo determinado (Noriega M. *et al.* 2018). Se debe tener en cuenta que, bajo condiciones de altas temperatura, se activan mecanismos de termorregulación, en los cuales, animales que no estén adaptados a estas altas temperaturas, como las de los bosque seco tropical y bosque muy seco tropical, aumentan su frecuencia cardiaca y consumo de agua y disminuyen el consumo de alimento (Pérez *et al.* 2020). En este sentido, los ovinos de pelo son un recurso genético, que debe ser valorado.

A pesar de los esfuerzos, acompañamientos y campañas realizadas para incentivar la crianza de ovinos en el país, el inventario nacional es bajo. Según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2020), la explotación de la especie en el país cuenta con solo 1'682,767 de animales. La mayor parte de la población, se registra en los Departamentos de La Guajira, con 42,1 %; Magdalena, con 11,8 %; Cesar, con 8,8 %; Boyacá, con 7,8 % y Córdoba, con 5,4 %, que agrupan el 75,9 % del total. De acuerdo con estas cifras, las poblaciones de ovino de pelo criollo colombiano OPC habitan, principalmente, en zonas de bosque muy seco tropical, que se presenta una época del año en la que la disponibilidad de forraje es escasa (Acero-Plazas, 2014).

Aunque se debe considerar que en los Departamentos de Córdoba y Cesar la ovinocultura se encuentra en un periodo de crecimiento, en donde se trata de producir estos animales como una fuente primaria de ingresos y no como una especie secundaria a otros sistemas de producción y donde los animales relevantes son los bovinos. Cabe resaltar que el sacrificio de ovinos aumentó, a nivel nacional, entre el segundo trimestre del 2016 y el segundo trimestre del 2020, en un 46,2 %, mientras que las exportaciones se han reducido, ya que entre 2017 y del 2018, las exportaciones fluctuaron entre 56 y 60 toneladas de carne año, respectivamente, pero para el segundo trimestre del 2020, no se reportan exportaciones (DANE, 2022).

Por lo anterior, y teniendo en cuenta las características de adaptabilidad del OPC a condiciones del Trópico bajo colombiano y la información que aportan los diferentes modelos no lineales para describir el crecimiento de las poblaciones animales, se deben llevar a cabo investigaciones, que permitan describir el crecimiento de los ovinos y demuestren las ventajas que brindarían estos animales a los sistemas productivos, por lo que el objetivo de esta investigación fue determinar la curva de crecimiento en ovinos de pelo colombiano, en zonas de bosque muy seco tropical, del Departamento de Córdoba y bosque muy seco tropical, del Departamento del Cesar, Colombia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** Se utilizaron las bases de datos provenientes de cinco granjas, ubicadas en la zona de bosque seco tropical, del Departamento de Córdoba y seis bases de datos de granjas pertenecientes al bosque seco muy tropical, del Departamento del Cesar. Para la utilización de las bases de datos, se contó con los permisos respectivos de los propietarios de las granjas. Dichas bases de datos tenían información sobre la identificación del padre, de la madre, fecha de nacimiento y de destete de los animales, peso al nacer y los pesajes periódicos cada 30 días.

**Toma de datos y manejo de animales.** Se estudiaron 99 animales puros de los biotipos Sudán (59 animales) y Etíope (40 animales), de los cuales, 42 (19 machos y 23 hembras), se encontraban en la zona de bosque seco tropical y 57 (46 machos y 11 hembras), en el bosque muy seco tropical. Los nacimientos ocurrieron entre diciembre de 2015 y julio de 2016. A partir del nacimiento, cada 30 días, los animales fueron pesados, hasta una edad aproximada de 12 meses, tiempo, en el cual, alcanzan el peso al sacrificio. Los pesajes, se realizaron en una báscula digital AWS DINA 50k, con capacidad para 50 kg, considerando para análisis los animales con un mínimo de 10 pesajes y máximo 13. El destete se realizó a los 90 días.

Los animales, se manejaron bajo condiciones de pastoreo en praderas de pasto natural angleton (*Dichanthium aristatum*) y guinea (*Megathyrus maximus*), *Bothriochloa pertusa*, *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria brizanta*, de acuerdo con las pasturas de cada sistema de producción; además, contaban con disponibilidad de agua y sal mineralizada a voluntad. Asimismo, los animales fueron suplementados en la época de escasas de lluvia con ensilado de maíz *Zea mays*, debido a la poca disponibilidad de forraje en los sistemas de producción. Esta suplementación se hizo, con el fin de que los animales no tuvieran pérdidas de peso en este periodo.

**Curvas de Crecimiento.** A partir de la información generada por los pesajes, se construyó una base de datos, que se utilizó para evaluar las curvas de crecimiento de los siguientes modelos no lineales:

$$y_t = \beta_0 e^{-\beta_1 t - \beta_2 t^2}, \text{ Gompertz (Gompertz, 1825).}$$

$$y_t = \beta_0 (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 t})^{-1}, \text{ Logístico (Nelder, 1961).}$$

$$y_t = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 t})^3, \text{ Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1938).}$$

$$y_t = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 t}), \text{ Brody (Brody, 1945).}$$

Dónde:  $y_t$  representa el peso del animal en el tiempo  $t$ ;  $\beta_0$  representa el peso asintótico del animal cuando " $t$ " tiende a infinito;  $\beta_1$  es un parámetro de ajuste cuando  $y \neq 0$  o  $t \neq 0$ ;  $\beta_2$  es un índice de madurez o medida de precocidad y su valor, a medida que aumenta, sugiere una tasa de crecimiento mayor.

El porcentaje de madurez a una edad de cuatro (M4) y seis meses (M6) y edad al alcanzar el 75 y 95 % de madurez (EM75 y EM95, respectivamente), se estimaron a partir del modelo que mejor ajuste tuvo para describir el crecimiento de los animales en estudio, de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$M4 = (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 \cdot 120})$$

$$M6 = (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 \cdot 180})$$

$$EM75 = -\log((1 - 0.75)/\beta_1)/\beta_2$$

$$EM95 = -\log((1 - 0.95)/\beta_1)/\beta_2$$

**Análisis estadístico.** Para la estimación de los parámetros de las curvas de crecimiento evaluadas, se utilizó el procedimiento NLIN del SAS (SAS, 2007). Como criterios para seleccionar el modelo que mejor describiera el crecimiento de los ovinos estudiados, se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el criterio de información Bayesiano (BIC), el criterio de información de Akaike (AIC) y el porcentaje de curvas convergentes (PCC), dado por el número de curvas que convergieron respecto al total de curvas. A partir del modelo que mejor ajuste tuvo, se determinó, para los parámetros del modelo ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ , y  $\beta_2$ ), los porcentajes de madurez y las edades a la madurez; si hubo diferencia estadística entre biotipo racial, sexo, zona y época de nacimiento (época de lluvias y época de sequía), a través de un análisis de varianza, mediante el procedimiento GML del SAS (SAS, 2007).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1, se presentan los estimadores de los parámetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , y los criterios para la selección del modelo que mejor se ajustó a los datos. De acuerdo con los resultados, se puede observar que, en los modelos de Gompertz, Bertalanffy y Logístico, las diferencias entre los criterios de selección son muy pequeñas, lo que supondría que cualquiera de ellas ajustaría, satisfactoriamente, para describir el crecimiento de la población ovina estudiada; sin embargo, teniendo en cuenta los valores AIC y BIC estimados para el modelo de Brody, se infiere que es el modelo que mejor se ajusta, además el valor de  $R^2$  no dista mucho de los otros modelos, similar a lo reportado por Nimase *et al.* (2018). Asimismo, Ullah *et al.* (2013), Sieklicki *et al.* (2016), Balan *et al.* (2017), Gautam *et al.* (2018) y Mohammadiam *et al.* (2019) encontraron que el modelo Brody fue el que mejor ajuste tuvo al describir el crecimiento de ovinos machos comerciales Texel, Mecheri, Sonadi y Kordi, respectivamente.

A diferencia de este estudio, se reportó que el modelo de Brody no convergió bien, al describir el crecimiento en ovinos de diferentes grupos genéticos y sexo (López *et al.* 2018). En este mismo sentido, en corderos Norduz fueron evaluados los modelos de Gompertz, Von Bertalanffy, Brody, Logístico y Exponencial Negativo y se demostró que el modelo Logístico fue el que mejor describió el crecimiento en los ovinos (Daskiran *et al.* 2010). Da Silva *et al.* (2012) estudiaron los modelos de Brody, Richards, Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico para describir el crecimiento en ovinos Santa Inés y sugirieron el modelo Logístico, como el de mejor ajuste. A la misma conclusión llegaron Lupi *et al.* (2015), al estudiar en ovinos de la raza Segureña utilizando los modelos de Brody Verhulst, Gompertz, Von Bertalanffy y Logístico. Por otro lado, Paz *et al.* (2018) utilizaron los modelos de Brody, Richards, Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico para describir el crecimiento en ovinos de la raza Morada Nova, siendo el modelo de Gompertz el que presentó el mejor ajuste. En ovinos Rahmani fueron evaluados los modelos Brody, Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy, siendo, para este estudio, el modelo de Gompertz, el que presentó mejor ajuste para describir su crecimiento (Rashad *et al.* 2017). Por su parte, otros investigadores, al describir las curvas de crecimiento en ovejas Mehraban iraníes, utilizando los modelos de Brody, Exponencial Negativo, Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy, encontraron

Tabla 1. Estimadores de los parámetros ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ ), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), criterio de información Akaike (AIC), criterio de información Bayesiano (BIC) y porcentaje de curvas convergente (PCC) de los modelos estudiados.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$	AIC	BIC	PCC
Gompertz	32,3005	2,3737	0,0116	99,38	55,66	56,08	100
Von Bertalanffy	33,9476	0,5718	0,0094	99,40	55,66	56,08	100
Brody	38,8717	0,9411	0,0052	97,58	43,97	44,12	98
Logístico	29,8701	7,2646	0,0186	99,25	55,65	56,07	100

que el modelo que mejor describió la curva de crecimiento en la población de estudio fue el Von Bertalanffy (Hojjati & Hossein-Zadeh, 2018).

De acuerdo con lo expresado, se puede evidenciar que es específico de cada población tener un modelo particular para describir en forma más apropiada su crecimiento, lo cual, está directamente relacionado con el tipo racial, sistema de alimentación, condiciones ambientales, en las que se desarrollan los individuos. Al ser el modelo de Brody el de mejor ajuste en la población de estudio, puede servir para hacer ajustes en el manejo nutricional de los animales y establecer metas, de acuerdo con la edad y el peso, adecuados para el sacrificio.

Al comparar los valores estimados en esta investigación con otros estudios, se encontraron valores superiores para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  en ovinos Santa Inés por Criollo ( $\beta_0= 46,8$ ;  $\beta_1=0,95$ ) (Simanca *et al.* 2016) y en ovinos de Pelo Criollos ( $\beta_0= 58,5$ ;  $\beta_1=0,98$ ) (Vergara-Garay *et al.* 2016), utilizando el modelo Brody. Los valores estimados para  $\beta_2$ , por Sarmento *et al.* (2006) y Vergara-Garay *et al.* (2016), fueron superiores a los encontrados en el presente estudio (0,0094 y 0,0054, respectivamente). En ovinos criollos, en Colombia, se encontraron valores inferiores para los diferentes parámetros ( $\beta_0=33,8$ ;  $\beta_1= 0,91$  y  $\beta_2=0,0046$ ) (Simanca S. *et al.* 2017). Por otro lado, en Ovejas Madgyal fueron encontrados valores inferiores para  $\beta_0=25,2$ ,  $\beta_1=0,85$  y superior  $\beta_2=0,21$  (Nimase *et al.* 2018). En hembras F1 Santa Inés por Criollo y Criollo, se estimó  $\beta_0$  (43,5)

superior al presente estudio,  $\beta_1$  similar (0,94) y  $\beta_2$  (0,0046) inferior (Vergara-Garay *et al.* 2017b). En este estudio, se debe considerar que en los sistemas de producción en la zona de estudio se presentan limitaciones en la toma de información, por ello, solo se utilizaron datos hasta alrededor del año de edad, por lo que podría haber una sobrestimación del parámetro  $\beta_0$ .

Con relación al porcentaje de madurez alcanzado a los seis meses, el cual, es importante en la especie ovina, ya que en las granjas y mercados regionales es el referente, como la edad adecuada, para sacrificar a los corderos y para utilizar las hembras como reproductoras de reemplazo. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 2), se sugiere la necesidad de mejorar el manejo alimenticio de los animales y hacer selección de animales superiores, con el fin de mejorar los porcentajes de madurez y las edades a la madurez, para obtener animales más pesados al sacrificio en menor tiempo (Vergara Garay *et al.* 2019). En la figura 1, se muestra la curva de crecimiento promedio de los ovinos de pelo colombiano, de acuerdo con el modelo Brody, realizada a partir de los parámetros estimados para este modelo, descritos en la tabla 1. Para la realización del gráfico, se hizo una proyección hasta los 720 d de edad.

Por otro lado, como el mejor modelo para describir el crecimiento en ovinos de pelo colombiano fue el Brody, al considerar los efectos biotipo racial, sexo, zona y época para este modelo (Tabla 3), se encontró que para el efecto sexo no se detectaron diferencias ( $P > 0,05$ ), entre las medias de los parámetros estimados. Para el efecto

Tabla 2. Estimadores para porcentajes de madurez y edades a la madurez en las poblaciones ovinas estudiadas, de acuerdo con el modelo Brody.

Variable	Promedio	Desvío Estándar
M4 (%)	46,61	16,92
M6 (%)	58,35	18,35
EM75 (d)	356,5	227,3
EM95 (d)	787,6	498,8

M4 = porcentaje de madurez a los 4 meses; M6 = porcentaje de madurez a los 6 meses; EM75 = edad al alcanzar el 75 % de madurez; EM95 = edad al alcanzar el 95 % de madurez.

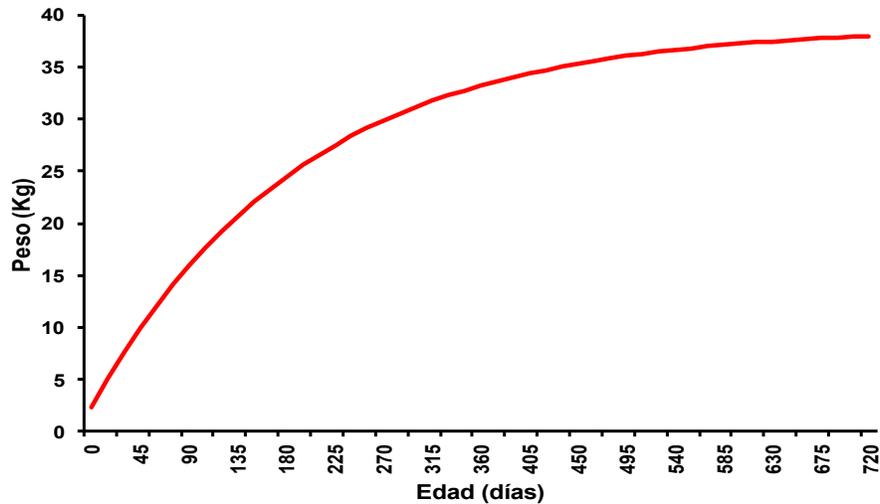


Figura 1. Curva de crecimiento de ovinos de pelo colombiano, según el modelo Brody.

Tabla 3. Medias de cuadrados mínimos (entre paréntesis error estándar) estimados para los parámetros estudiados, de acuerdo con el modelo Brody, según biotipo racial, sexo, zona y época de nacimiento.

Modelo	Efecto	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	M4	M6	EM75	EM95
Biotipo racial	Etíope	47,2471 <sup>a</sup> (2,3671)	0,9508 <sup>a</sup> (0,0085)	0,0016 <sup>a</sup> (0,0007)	28,00 <sup>a</sup> (3,73)	38,75 <sup>a</sup> (3,98)	569,1 <sup>a</sup> (50,7)	1256,9 <sup>a</sup> (110,8)
	Sudán	31,1417 <sup>b</sup> (1,8835)	0,9260 <sup>a</sup> (0,0068)	0,0079 <sup>b</sup> (0,0005)	61,06 <sup>b</sup> (2,97)	73,51 <sup>b</sup> (3,17)	194,5 <sup>b</sup> (40,4)	432,6 <sup>b</sup> (88,2)
Sexo	Macho	40,6185 <sup>a</sup> (1,1756)	0,9408 <sup>a</sup> (0,0042)	0,0050 <sup>a</sup> (0,0003)	45,18 <sup>a</sup> (1,86)	56,73 <sup>a</sup> (1,97)	372,0 <sup>a</sup> (25,2)	822,8 <sup>a</sup> (5,0)
	Hembra	37,7702 <sup>a</sup> (1,5890)	0,9359 <sup>a</sup> (0,0057)	0,0045 <sup>a</sup> (0,0005)	43,88 <sup>a</sup> (2,51)	55,53 <sup>a</sup> (2,67)	390,6 <sup>a</sup> (34,0)	866,7 <sup>a</sup> (74,4)
Zona	Cesar	44,9492 <sup>a</sup> (2,3814)	0,9517 <sup>a</sup> (0,0085)	0,0033 <sup>a</sup> (0,0007)	38,000 <sup>a</sup> (3,76)	50,15 <sup>a</sup> (4,00)	428,9 <sup>a</sup> (51,0)	947,6 <sup>a</sup> (111,5)
	Córdoba	33,4396 <sup>b</sup> (1,8881)	0,9250 <sup>a</sup> (0,0068)	0,0063 <sup>b</sup> (0,0005)	51,07 <sup>b</sup> (2,98)	62,11 <sup>a</sup> (3,18)	334,6 <sup>a</sup> (40,5)	741,9 <sup>a</sup> (88,4)
Época	Seca	40,7615 <sup>a</sup> (1,2281)	0,9497 <sup>a</sup> (0,0044)	0,0044 <sup>a</sup> (0,0004)	42,03 <sup>a</sup> (1,93)	53,58 <sup>a</sup> (2,07)	409,1 <sup>a</sup> (26,3)	902,8 <sup>a</sup> (57,5)
	Lluvia	37,6273 <sup>a</sup> (1,5108)	0,9270 <sup>b</sup> (0,0054)	0,0051 <sup>a</sup> (0,0004)	47,02 <sup>a</sup> (2,38)	58,69 <sup>a</sup> (2,54)	354,4 <sup>a</sup> (32,4)	786,6 <sup>a</sup> (70,7)

Para un efecto determinado (dentro de subdivisiones), letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ( $P \leq 0,05$ ); M4 = porcentaje de madurez a los 4 meses; M6 = porcentaje de madurez a los 6 meses; EM75 = edad al alcanzar el 75 % de madurez; EM95 = edad al alcanzar el 95 % de madurez.

biotipo racial fue significativo ( $P \leq 0,05$ ) para todos los parámetros estimados, con excepción de  $\beta_1$ , mientras que el efecto zona fue significativo para  $\beta_0$ ,  $\beta_2$  y M4. Con relación al efecto época, solo fue significativo ( $P \leq 0,05$ ) para el parámetro  $\beta_1$ . Se puede observar en la figura 2, la representación de las curvas de crecimiento por biotipo racial, sexo, zona y época de los ovinos de pelo colombiano, de acuerdo con el modelo Brody.

Similar a lo estimado en este trabajo, se ha reportado diferencia significativa del sexo sobre los estimados de  $\beta_0$ , demostrando superioridad de los pesos de los machos respecto a las hembras. Esto se explica, por el efecto anabólico producido por la hormona testosterona en los machos, que actúa como promotor de crecimiento,

reflejando un mayor peso a mayor madurez (Daskiran *et al.* 2010; Lupi *et al.* 2015).

De acuerdo con los resultados obtenidos, los animales de la raza Sudán son más precoces, debido a que tienen mayor valor de  $\beta_2$ , ya que este representa la tasa de madurez y la velocidad de crecimiento del animal al llegar a su tamaño adulto. Animales con mayor valor de  $\beta_2$  representan madurez precoz, en comparación con individuos de valores inferiores de  $\beta_2$  y de peso inicial semejante, por lo que, el valor de  $\beta_2$  representa con buena precisión, la variación en la velocidad relativa de crecimiento del animal (Simanca S. *et al.* 2017). Esto se confirma, por los valores obtenidos en los porcentajes de madurez y edades de los biotipos estudiados (Tabla 3), en la cual, el biotipo

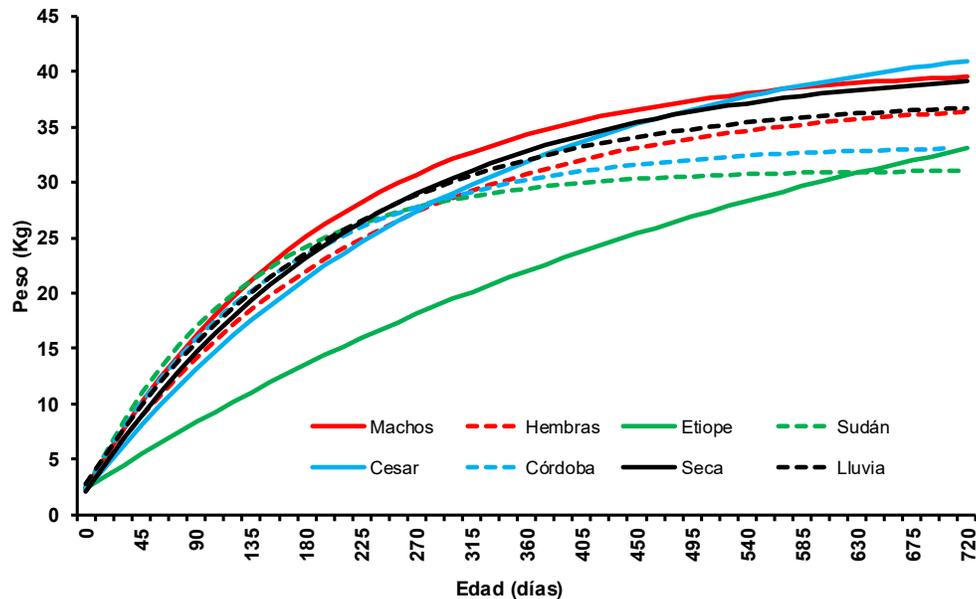


Figura 2. Curvas de crecimiento de ovinos de pelo colombiano, de acuerdo con el biotipo racial, sexo, zona y época, según el modelo Brody.

Sudán fue superior en un 34,76 %, para el porcentaje de madurez, a los seis meses y alcanzando una edad al 95 % de madurez, 824,3 días antes, respecto al biotipo Etiópe. Estos resultados coinciden biológicamente con la alta variabilidad genética encontrada en OPC, por Noriega M. *et al.* (2018), lo cual, hace interesante el biotipo Sudán para futuros planes de selección asistida por genes, en pro de aumentar la productividad en los sistemas ovinos, manejándolo como base genética para su explotación.

Se debe considerar que, al evaluar el crecimiento en ovejas, se pueden encontrar divergencias en la convergencia de los modelos, por las particularidades de cada población, en cuanto a tipo racial, alimentación, sexo, entre otros factores (Lupi *et al.* 2015). Además, al evaluar diferentes sistemas de producción, se requiere determinar todos los parámetros de forma colectiva para poder decidir cuál es modelo de curva de crecimiento que mejor se ajusta a determinado sistema de producción (Teixeira *et al.* 2012). Por ello, para cada sistema de producción, debe existir un modelo que mejor ajusta para describir el crecimiento de los animales.

Como conclusión, el modelo de Brody se puede utilizar en la descripción del crecimiento de ovinos, de acuerdo con los parámetros de la curva de crecimiento, para instaurar proyecciones en el comportamiento productivo. Asimismo, los estimados, los porcentajes y las edades, a la madurez en las poblaciones en estudio, muestran que la raza, con mejoras en factores no genéticos, como la alimentación, permiten que sean candidatos para implementar programas de selección, con el fin de incrementar los pesos de los animales al llegar a la edad adulta y al sacrificio, mejorando sus índices productivos. También, se puede afirmar que el biotipo Sudán tuvo una mayor tasa de crecimiento, aunque un peso adulto inferior al biotipo Etiópe, por lo que puede ser un biotipo adecuado para su explotación en las zonas en estudio.

**Agradecimientos.** Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS (Contrato FP44842-484-2014; 2014-0401 COLCIENCIAS), por la financiación del proyecto y a los productores que facilitaron sus animales para la toma de información. **Conflicto de intereses:** Este manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

- ACERO-PLAZAS, V.M. 2014. El bienestar animal en sistemas productivos de ovinos caprinos en Colombia. *Spei Domus*. 10(20):57-62. <https://doi.org/10.16925/sp.v10i21.918>
- BALAN, C.; KATHIRAVAN, G.; THIRUNAVUKKARASU, M.; JEICHITRA, V. 2017. Non-linear growth modelling in Mecheri breed of sheep. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 5(5):2005-2008.
- BRODY, S. 1945. *Bioenergetics and growth*. Hafner Publishing company, INC. 1023p.
- DA SILVA, L.S.A.; FRAGA, A.B.; DA SILVA, F. DE L.; GUIMARÃES BEELEN, P.M.; DE OLIVEIRA SILVA, R.M.; TONHATI, H.; BARROS, C.C. 2012. Growth curve in Santa Inês sheep. *Small Ruminant Research*. 105(1-3):182-185. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.11.024>
- DASKIRAN, I.; KONCAGUL, S.; BINGOL, M. 2010. Growth characteristics of indigenous Norduz female and male lambs. *Journal of Agricultural Sciences*. 16(1):62-69.

6. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, DANE. 2022. Encuesta de sacrificio de ganado. Disponible desde Internet en:  
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/a-gropecuario/encuesta-de-sacrificio-de-ganado/encuesta-de-sacrificio-de-ganado-esag-historicos> (con acceso 30/11/2020).
7. FLÓREZ, J.M.; HERNÁNDEZ, M. DE J.; BUSTAMANTE, M. DE J.; VERGARA, O.D. 2018. Caracterización morfoestructural de tres poblaciones de Ovino de Pelo Criollo Colombiano "OPC". *Archivos de Zootecnia*. 67(259):340-348. <https://doi.org/10.21071/az.v67i259.3789>
8. GAUTAM, L.; KUMAR, V.; WAIZ, H.A.; NAGDA, R.K. 2018. Estimation of growth curve parameters using non-linear growth curve models in sonadi sheep. *International Journal of Livestock Research*. 8(9):104-113. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20180131044656>
9. GOMPERTZ, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 115(1825):513-583.
10. HOJJATI, F.; HOSSEIN-ZADEH, N.G. 2018. Comparison of non-linear growth models to describe the growth curve of Mehraban sheep. *Journal of Applied Animal Research*. 46(1):499-504. <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1348949>
11. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 2020. Censo pecuario año 2020. Disponible desde Internet en:  
<https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018> (Con acceso 28/09/2020).
12. LÓPEZ, B.; LUPI, T.M.; LEÓN, J.M.; LÓPEZ, F.; AGUDO, B.; DELGADO, J.V. 2018. Characterization of the commercial growth curves of Spanish Merino, Fleischschaf, and crossbred lambs in an associative economy context. *Small Ruminant Research*. 164:8-14. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.04.009>
13. LUPI, T.M.; NOGALES, S.; LEÓN, J.M.; BARBA, C.; DELGADO, J.V. 2015. Characterization of commercial and biological growth curves in the Segureña sheep breed. *Animal*. 9(8):1341-1348. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000567>
14. MOHAMMADIAM, Y.; MOKHTARI, M.S.; SAGHICA, D.A.; SHAHDADI, A.R. 2019. Modeling the growth curve in Kordi sheep: The comparison of non-linear models and estimation of genetic parameters for the growth curve traits. *Small Ruminant Research*. 177:117-123. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.06.012>
15. NELDER, J.A. 1961. The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics*. 17(1):89-110. <https://doi.org/10.2307/2527498>
16. NIMASE, R.G.; KANDALKAR, Y.B.; BANGAR, Y.C. 2018. Non-linear modeling for estimation of growth curve parameters in Madgyal sheep. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 6(2):463-465.
17. NORIEGA M., J.; HERNANDEZ H., D.; BUSTAMANTE YÁNEZ, M.; ÁLVAREZ, L.Á.; ARIZA B., M.F.; VERGARA G., O. 2018. Polymorphisms of candidate genes to growth in two populations of colombian creole sheep. *Indian Journal of Science and Technology*. 11(46):1-9. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i46/132587>
18. PAZ, C.C.P.; VENTURINI, G.C.; CONTINI, E.; COSTA, R.L.D.; LAMERHINA, L.P.; QUIRINO, C.R. 2018. Non-linear models of Brazilian sheep in adjustment of growth curves. *Czech journal of animal science*. 63(8):331-338. <https://doi.org/10.17221/87/2017-CJAS>
19. PÉREZ, R.V.; MACÍAS CRUZ, U.; AVENDAÑO REYES, L.; CORREA CALDERÓN, A.; LÓPEZ BACA, M. DE LOS A.; LARA RIVERA, A.L. 2020. Impacto del estrés por calor en la producción de ovinos de pelo. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 11(1):205-222. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4923>
20. RASHAD, A.M.A.; RAMADAN, T.A.; MAHDY, A.E. 2017. Comparison among models to describe growth curves of Rahmani lambs in relation to ewe milk yield and composition. *Egyptian Journal of Animal Production*. 54(2):125-135. <https://dx.doi.org/10.21608/ejap.2017.93275>
21. SARMENTO, J.L.R.; REGAZZI, A.J.; DE SOUSA, W.H.; TORRES, R. DE A.; BREDA, F.C.; MENEZES, G.R. DE O. 2006. Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 35(2):435-442. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982006000200014>
22. SIEKLIICKI, M. DE F.; PEDROSA, V.B.; ROCHA, C.G.; MOREIRA, R.P.; FALCÃO, P.R.; DOS SANTOS, I.C.; FERREIRA, E.M.; MARTINS, A. DE S. 2016. Growth curves of texel male lambs. *Acta Scientiae Veterinariae*. 44:1-6. <https://doi.org/10.22456/1679-9216.81165>
23. SIMANCA, J.C.; VERGARA, O.D.; BUSTAMANTE, M. DE J. 2016. Descripción del crecimiento de ovinos Santa Inés x criollo manejados en pastoreo extensivo en dos poblaciones de Córdoba, Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias Veterinarias*. 57(1):61-67.
24. SIMANCA S., J.; VERGARA GARAY, O.; BUSTAMANTE Y., M. 2017. Descripción del crecimiento de ovinos criol-

- los (*Ovis aries*) en dos poblaciones de Córdoba, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*. 22(3):6310-6319. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1135>
25. STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS. 2007. User's Guide (Release 9.1.3). SAS Institute Inc (Cary NC, USA). 220p.
26. TEIXEIRA, M.; VILLARROEL, B.A.; PEREIRA, S.E.; DE OLIVEIRA, S.M.P.; ALBUQUERQUE, I.A.; MIZUBUTI, I. 2012. Curva de crecimiento de cordeiros oriundos de três sistemas de produção na Região Nordeste do Brasil. *Semina: Ciências Agrá*. 33:2011-2018.
27. ULLAH, M.A.; AMIN, M.; ABBAS, M.A. 2013. Non-linear regression models to predict the lamb and sheep weight growth. *Pakistan Journal of Nutrition*. 12(9):865-869. <https://dx.doi.org/10.3923/pjn.2013.865.869>
28. VERGARA-GARAY, O.; LLORENTE-MARTÍNEZ, E.; RAMOS-CARO, L.; BUSTAMANTE-YÁNEZ, M.; SIMANCA-SOTELO, J. 2016. Descripción del crecimiento en ovinos criollos utilizando el modelo Brody. *Orinoquía*. 20(2):34-39. <https://doi.org/10.22579/20112629.351>
29. VERGARA GARAY, O.; MEDINA RIOS, H.; ROBLES SIERRA, C.; SIMANCA SOTELO, J.; BUSTAMANTE YANEZ, M. 2017a. Determinación de la curva de crecimiento en ovinos criollos de pelo, mediante la utilización del modelo Gompertz, en el trópico bajo colombiano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20(2):385-391. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.396>
30. VERGARA GARAY, O.; SIMANCA SOTELO, J.; BUSTAMANTE YÁNEZ, M.; BULA TORRES, J.; CAMARGO PITALUA, C.; MAHUAD RUÍZ, N. 2019. Características de crecimiento y medidas del área del ojo del lomo en ovinos criollos del departamento de Córdoba, Colombia. *Revista U. D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 22(2):e1371. <http://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1371>
31. VERGARA-GARAY, O.D.; HINCAPIÉ-GUTIÉRREZ, L.C.; VALLEJO-ROMERO, D.A.; SIMANCA-SOTELO, J.C.; BUSTAMANTE-YÁNEZ, M. DE J. 2017b. Utilización del modelo Brody para describir el crecimiento de dos grupos raciales de ovinos en Córdoba, Colombia. *Revista Veterinaria y Zootecnia*. 11(1):1-12. <https://doi.org/10.17151/vetzo.2017.11.1.1>
32. VIVAS A., N.; LANDI, V.; MUÑOZ FLÓREZ, J.; BUSTAMANTE YANEZ, M.; ÁLVAREZ FRANCO, L. 2020. Diversidad genética de vinos criollos colombianos. *Revista MVZ Córdoba*. 25(3):e2185. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2185>
33. VON BERTALANFFY, L. 1938. A quantitative theory of organic growth (Inquiries on growth laws. II). *Human Biology*. 10(2):181-213.



# ***Bacillus subtilis* mejora el desarrollo de órganos digestivos, la morfología del intestino y el rendimiento productivo en pollos de engorde**

## ***Bacillus subtilis* improve digestive organs development, intestinal morphology and growth performance in broilers**

Carlos Abel Maya-Ortega<sup>1\*</sup> ; Tomás Antonio Madrid-Garcés<sup>1</sup> ; Jaime Eduardo Parra-Suescún<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Producción Animal. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: camayao@unal.edu.co; tamadridg@unal.edu.co; jeparrasu@unal.edu.co

\*autor de correspondencia: camayao@unal.edu.co

**Cómo citar:** Maya-Ortega, C.A.; Madrid-Garcés, T.A.; Parra-Suescún, J.E. 2022. *Bacillus subtilis* mejora el desarrollo de órganos digestivos, la morfología del intestino y el rendimiento productivo en pollos de engorde. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1848. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1848>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** febrero 2 de 2021

**Aceptado:** septiembre 22 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### **RESUMEN**

La regulación en el uso de antibióticos promotores de crecimiento en la alimentación animal requiere de la búsqueda de alternativas nutricionales seguras, que mejoren la salud intestinal y el rendimiento productivo en los animales, mientras protegen la salud del consumidor. La investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de *Bacillus subtilis* sobre el desarrollo de órganos digestivos, la morfología del intestino y el rendimiento productivo, en pollos de engorde. 192 pollos Cobb 500 de un día de edad fueron asignados aleatoriamente a una de tres dietas: basal libre de antibióticos (D1), basal adicionada con 10 ppm de avilamicina (D2) o basal adicionada con 50 ppm de esporas de *B. subtilis* (D3), durante 42 días. Los días 21 y 42 de edad, se determinó la conversión alimenticia (CA), la ganancia acumulada de peso (GAP) y se evaluó el desarrollo de los principales órganos digestivos y la histomorfología de cada segmento del intestino delgado, mediante el sacrificio de 48 aves (8 aves/dieta/día). El uso de *B. subtilis* incrementó significativamente la CA y la GAP. Por otra parte, *B. subtilis* aumentó la alometría del intestino en comparación con el uso de antibióticos, aunque no

se evidenciaron diferencias significativas para el peso de órganos digestivos, entre ambos tratamientos; *B. subtilis* mejoró la altura de las vellosidades y disminuyó la profundidad de las criptas, significativamente. *B. subtilis* favorece el desempeño productivo en pollos de engorde, mejora el desarrollo de órganos digestivos y la histomorfología del intestino delgado.

Palabras clave: Antibiótico; *Bacillus subtilis*; Morfología intestinal; Pollos de engorde; Rendimiento productivo.

### **ABSTRACT**

Regulation in the use of growth promoters antibiotics in animal feed has led to the search for safe nutritional alternatives that improve intestinal health and growth performance in animal, while protecting consumer health. The aim was to assess the effect of *Bacillus subtilis* on the digestive organs development, intestinal morphology and growth performance in broilers. A total of 192 one-day old Cobb 500 chicks, were randomized and assigned to one of three diets: basal diet free of antibiotics (D1) or basal diet

added with 10ppm of avilamicyn (D2) or basal diet added with 50ppm of *B. subtilis*'s spores (D3) for 42 days. On days 21 and 42 the feed conversion ratio (FCR) and average body weight (ABW) were determined; also, eight birds per treatment were euthanized to assess the development of digestive organs and the histomorphology in the different sections of the small intestine. The use of *B. subtilis* significantly increased FCR and ABW. On the other hand, *B. subtilis* significantly small intestine length compared to antibiotic growth promoter, but there was no differences in the weight of the digestive organs between *B. subtilis* and antibiotic diet, in addition *B. subtilis* improve villus height and decreased crypt depth significantly. In conclusion, the use of *B. subtilis* improve growth performance, digestive organs development and small intestine histomorphology in broilers.

Keywords: Antibiotics; *Bacillus subtilis*; Growth performance; Gut morphology; Broilers.

## INTRODUCCIÓN

Las producciones avícolas, a nivel comercial, vienen creciendo rápidamente, para hacer frente a las altas demandas de proteína de origen animal, como consecuencia del acelerado crecimiento de la población mundial (Roa *et al.* 2018). Algunas ciencias, como la genética y la nutrición, han sido indispensables para incrementar la eficiencia productiva de las aves. En la actualidad, para la producción de pollo de engorde, se cuenta con aves mejoradas genéticamente, con altas tasas de crecimiento y mayor eficiencia en la acreción muscular (Henchion *et al.* 2017); sin embargo, la susceptibilidad de las aves al estrés y a las alteraciones del ambiente intestinal causado, principalmente, por desequilibrios en la microbiota normal del intestino (Henchion *et al.* 2017; Sokale *et al.* 2019), desencadenan la aparición de procesos inflamatorios, daños en la integridad del intestino y disminución en la capacidad para digerir y absorber los nutrientes del alimento, comprometiendo el rendimiento productivo y la rentabilidad de las granjas (Oviedo-Rondón, 2019).

El suministro de antibióticos en bajas dosis, como promotores de crecimiento (APC), a través del alimento, es una estrategia para mitigar el efecto que tienen los desbalances microbianos intestinales sobre el rendimiento productivo (Salim *et al.* 2018); no obstante, en los últimos años, ha aumentado la preocupación en los consumidores y en la comunidad científica, sobre la aparición de bacterias resistentes a antibióticos y por la presencia de residuos de estos compuestos en el producto final y el medio ambiente, lo que se ha convertido en un riesgo para la salud pública (Mohammadi Gheisar & Kim, 2018).

En enero de 2006, la Unión Europea prohibió el uso de antibióticos, como medida profiláctica en producciones animales; sin embargo, países como Estados Unidos tiene una regulación más estricta (Dodds, 2017). Actualmente, en Colombia, se adopta la prohibición de algunos antimicrobianos promotores del crecimiento-APC (Colistina, Polimixina B, Furazolidona, Nitrofurazona y Furaltona), en la alimentación animal (Resolución ICA N° 1082, 1995; Resolución ICA N° 22747, 2018). Así, los investigadores en el área de la nutrición animal, se han dado a la tarea de buscar

alternativas biológicamente seguras a los APC's, que garanticen el bienestar de los animales, el rendimiento productivo y la salud del consumidor (Mehdi *et al.* 2018).

Entre las alternativas alimenticias más estudiadas, se encuentran probióticos, prebióticos, enzimas, ácidos orgánicos y fitobióticos (Sugiharto, 2016). Por su parte, diversos estudios muestran resultados favorables en la administración de probióticos, específicamente, mediante el uso de *B. subtilis*, evidenciando efectos favorables sobre la morfometría del epitelio intestinal, disminuyendo el pH y modificando la composición de los ecosistemas microbianos, presentes a lo largo del tracto gastrointestinal-TGI (Chávez *et al.* 2016; Lokapirnasari *et al.* 2017; Chowdhury *et al.* 2018), lo cual, se ve reflejado en un mejor aprovechamiento de los nutrientes y un mayor rendimiento productivo de los animales (Liu *et al.* 2018; Park *et al.* 2020). Estas bondades, han hecho de los probióticos, especialmente *B. subtilis*, una posible alternativa como sustituto al uso de antibióticos, promotores del crecimiento.

Con el fin de aportar resultados frente a la búsqueda de alternativas para disminuir el uso de antibióticos en la alimentación animal, el objetivo de la presente investigación consistió en evaluar el efecto que tiene la inclusión de *B. subtilis* sobre el desarrollo de órganos digestivos, la morfología del intestino delgado y el rendimiento productivo en pollos de engorde.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los procedimientos experimentales llevados a cabo dentro del estudio siguieron los lineamientos estipulados en las guías "The International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals". Esta investigación fue avalada por El Comité Institucional para el Cuidado y Uso de los Animales-CICUA, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (CEMED-013. Mayo 04 de 2018).

Para el abordaje de la investigación, se desarrolló en la estación agraria San Pablo, perteneciente a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, ubicada en el municipio de Rionegro, a una altitud de 2.100 m s.n.m. y una temperatura que oscila entre los 12 y 18 °C. Para la investigación, se utilizaron un total de 192 pollos machos de línea COBB500, de un día de nacidos, alojados en corrales en piso, con cama de viruta. La cría, se llevó a cabo siguiendo los procedimientos experimentales de una granja comercial. Cinco horas antes de la llegada de los pollitos, las criadoras fueron encendidas con la finalidad de precalentar el galpón y alcanzar una temperatura promedio de 32 °C, al momento de la recepción. Las aves recibieron agua y alimento a voluntad durante todo el periodo experimental, que tuvo una duración de 42 días.

**Dietas.** Se elaboró una dieta basal ajustada a los requerimientos nutricionales de los animales sin la adición de antibiótico y probiótico. Los tratamientos utilizados se establecieron de la siguiente manera:

- Dieta Control (D1): dieta basal sin la adición de antibiótico y probiótico.
- Dieta 2 (D2): dieta basal más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm).
- Dieta 3 (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas), a razón de 50 ppm.

El plan de alimentación fue dividido en dos etapas, para lo cual, se realizó una dieta de iniciación (1-21 días) y finalización (22-42 días) (Tabla 1), cumpliendo los requerimientos nutricionales establecidos por la distribuidora comercial. La adición del antimicrobiano (avilamicina) en el alimento, se realizó según las indicaciones de la casa productora, a razón de 10 gramos por tonelada (10 ppm). La cantidad de *Bacillus subtilis* (PB6 ATCC-PTA 6737, ®Kemin Industries, Inc., EEUU) incorporada en la dieta 3, se llevó a cabo atendiendo la recomendación del fabricante; esto es 50 gramos por tonelada de alimento, para garantizar una dosis de  $10^8$  UFC.

**Parámetros Zootécnicos.** Dentro de los parámetros zootécnicos se evaluaron: peso acumulado (PA), peso final, ganancia acumulada de peso (GAP) y conversión alimenticia (CA) (Chávez *et al.* 2016; Madrid-Garcés *et al.* 2017). Las mediciones se realizaron en un total de 144 aves.

Conversión alimenticia (CA):

$$CA = \frac{\text{Alimento consumido}}{\text{Peso Ganado}} \quad \text{ecuación 1}$$

Ganancia acumulada de peso (GAP):

$$GAP = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso Inicial}}{\text{Edad (días)}} \quad \text{ecuación 1}$$

**Eutanasias humanitarias y toma de muestras.** Durante la fase de experimentación, se realizaron eutanasias escalonadas a las aves, de la siguiente forma: los días 21 y 42, se sacrificaron 24 aves (ocho aves por dieta), respectivamente, para un total de 48 aves. Todas las aves fueron sacrificadas 3 horas después de su última comida. Los animales, se sedaron por inhalación de Nitrox y, posteriormente, se les realizó eutanasia humanitaria con dióxido de carbono, durante 3 minutos (Chávez *et al.* 2016).

Después del sacrificio, se realizó un corte desde la parte anterior del cuello hasta la cloaca, cortando solo la piel. Se realizaron dos pequeños cortes laterales hasta llegar a las costillas y, luego un corte de las costillas en dirección craneal. Se evaluó la presencia de exudados y el estado de sacos aéreos. Posteriormente, se extrajo en un solo paquete los órganos del tracto gastrointestinal y anexos: estómago, hígado, páncreas, bazo, intestino delgado y grueso (Svihus, 2014). Se identificó y se diseccionó cada uno de los segmentos de intestino delgado, utilizando tijeras de disección con punta recta, como se describe a continuación: duodeno (desde el píloro hasta la porción distal de la vuelta duodenal), yeyuno (desde la porción distal del giro duodenal al divertículo de Meckel), íleon (desde el divertículo de Meckel hasta el inicio de los ciegos) y ciegos (Barrera-Barrera *et*

*al.* 2014). Cada uno de los fragmentos y órganos digestivos fueron lavados con solución salina fría, pesados en una báscula de precisión digital y medidos con un metro convencional (Madrid-Garcés *et al.* 2017). Los pesos de los órganos fueron convertidos a porcentaje de peso vivo (% P.V) (Ecuación 3). Para determinar la ontogénesis del crecimiento de los diferentes órganos y su relación con el peso corporal, se utilizó el coeficiente de Crecimiento Alométrico (CA) (Ecuación 4) (Chávez *et al.* 2016).

$$\% P.V = \frac{\text{peso del organo}}{\text{peso del ave}} * 100 \quad \text{ecuación 3}$$

$$C.A = \frac{O_n / O_h}{P_{Cn} / P_{Ch}} \quad \text{ecuación 4}$$

Donde:  $O_n$  = peso del órgano al día  $n$  de la evaluación;  $O_h$  = peso al nacimiento;  $P_{Cn}$  = peso corporal al día de la evaluación y  $P_{Ch}$  = peso corporal al nacimiento.

Finalmente, cada segmento del intestino delgado fue alineado y medido en una mesa sin ningún tipo de tensión y se tomaron 2 cm del centro de duodeno, yeyuno e íleon. Una vez cortada cada muestra, se hizo un lavado por infusión con solución salina fría de la porción removida para eliminar impurezas y la digesta contenida; posteriormente, cada una de las muestras tomadas fue almacenada en formalina, al 10 % (Madrid-Garcés *et al.* 2017).

**Análisis morfométrico del Intestino delgado.** Transcurrido 48 horas después de la colecta, las muestras de las diferentes secciones del intestino fueron almacenadas en formalina al 10 % y enviadas al laboratorio, para ser analizadas por expertos.

**Procesamiento histotécnico:** Los tejidos, se fijaron en formalina tamponada al 10 %, por 48 horas, a 4 °C, incluidos en parafina, cortados a 4  $\mu$ m de espesor y coloreados con Hematoxilina-Eosina, para ser lavados y almacenados en etanol:agua (75:25, v:v) (Chávez *et al.* 2016). Estos cortes fueron microdisecionados, para determinar el promedio de la altura y ancho de las vellosidades intestinales, así como la profundidad de las criptas adyacentes. En cada lámina se montaron tres cortes transversales.

**Evaluación microscópica y análisis morfométrico de imágenes:** Los cortes histológicos fueron analizados cuantitativamente, mediante un procesamiento de imágenes digitales computarizadas, así: para la identificación de las zonas tisulares, se hizo uso de un microscopio óptico Leica (Meyer, Houston, TX, USA); luego, se capturaron las imágenes correspondientes, con una cámara para microscopía digital instantánea Motican 2300 (Motic, Hong Kong, China), con una resolución de 3 megapíxeles, en un aumento de 200x y se analizaron dichas imágenes con el software para tratamiento de imágenes Motic® Images plus 2.0 (Motic, Hong Kong, China).

Las variables morfométricas que se midieron en cada corte histológico fueron (Chávez *et al.* 2016):

- Altura: una vez se estableció la base de la vellosidad, desde su punto medio, se trazó una línea hasta el ápice.

Tabla 1. Aporte nutricional de la dieta basal (DB) diseñada en dos etapas: iniciación y finalización. modelo Brody, según biotipo racial, sexo, zona y época de nacimiento.

<b>Ingrediente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Iniciación</b>	<b>Finalización</b>
Maíz	%	55,41	56,49
Gluten de maíz	%	3,00	0,00
Soya integral	%	7,39	10,00
Torta de soya	%	22,19	20,64
Hemoglobina	%	1,43	1,00
Aceite de soya	%	1,99	4,61
Pre mezcla	%	0,69	0,68
Carbonato de calcio	%	1,29	1,11
Sal de mar	%	0,20	0,28
Bicarbonato de sodio	%	0,18	0,04
<b>Aporte nutricional</b>		<b>Iniciación</b>	<b>Finalización</b>
Humedad	%	10,926	10,845
Energía metabolizable (aves)	KCAL/kg	3 152.165	3 299.259
Proteína bruta	%	21,474	19,976
Grasa	%	8,301	10,213
Extracto Libre de N (ELN)	%	49,673	50,195
Fibra bruta	%	2,927	2,801
Cenizas	%	6,108	5,379
Calcio	%	0,997	0,832
Fósforo disponible	%	0,418	0,360
Fósforo total	%	0,648	0,580
Lisina	%	1,363	1,270
Metionina	%	0,650	0,602
Metionina+ Cisteína	%	0,993	0,924
Treonina	%	0,901	0,825
Triptófano	%	0,242	0,222
Arginina	%	1,336	1,228
Isoleucina	%	0,881	0,815
Leucina	%	1,902	1,802
Valina	%	1,042	0,915

- Ancho: con una línea, se unieron los bordes apicales de las células epiteliales de lados opuestos, ubicadas, aproximadamente, en la mitad de la vellosidad.
- Profundidad de la cripta: se obtuvo trazando una línea o segmentos continuos, desde su apertura hasta el fondo de la misma.

El valor promedio para cada variable, se calculó después de realizar mediciones en ocho vellosidades y sus correspondientes criptas intestinales. Debido al hecho de que la altura de las vellosidades puede variar en cada pliegue intestinal (siendo más corta en el ápice), se requería que cada región estuviera igualmente representada en la evaluación. En consecuencia, se eligió un pliegue circular de la mucosa, midiendo dos vellosidades desde la parte inferior, dos a la

derecha, dos desde el lado izquierdo y dos desde el vértice (Chávez *et al.* 2016).

**Diseño experimental y análisis estadístico.** Para el análisis de las variables productivas, se realizó un modelo de medidas repetidas en el tiempo, bajo un diseño completamente al azar, con tres tratamientos (dieta) y cuatro repeticiones (12 pollos por repetición), para un total de 144 aves. Cada uno de los animales fue asignado aleatoriamente a una de las tres dietas y se registró el peso de los pollos, los días 21 y 42. El análisis estadístico, se realizó según el procedimiento Proc Mixed del SAS®.

Para el análisis de las variables morfométricas y el desarrollo de órganos digestivos, se realizó un modelo de parcelas, divididas bajo un esquema de aleatorización completamente al azar (cuatro repeticiones). Las parcelas grandes estuvieron constituidas por las dietas y las subparcelas por los diferentes días de sacrificio. Cada animal fue asignado aleatoriamente a cada uno de los tratamientos (dieta \* edad de sacrificio) y cada tratamiento tuvo un total de

Tabla 2. Parámetros productivos evaluados los días 21 y 42, en pollos alimentados con una dieta basal o dieta basal suplementada con antibiótico (avilamicina) o probiótico (*B. subtilis*). Ganancia diaria de peso (GDP); conversión alimenticia promedio (CAP). (D1): dieta sin la adición de antibiótico y probiótico; (D2): dieta control más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm); (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas) a razón de 50 ppm. A, B, C dentro de una misma fila, medias con un superíndice común (por variable en estudio), no difieren estadísticamente ( $P > 0,05$ ).

Variable	Edad (días)	Dieta			Valor p
		D1	D2	D3	
GAP (gr)	21	1095,5 <sup>B</sup>	1098,0 <sup>B</sup>	1128,6 <sup>A</sup>	<0,001
	42	2808,5 <sup>C</sup>	2887,5 <sup>B</sup>	2950,5 <sup>A</sup>	<0,001
Consumo Alimento (gr)	21	1402,24 <sup>A</sup>	1394,46 <sup>A</sup>	1410,75 <sup>A</sup>	0,0236
	42	4381,26 <sup>A</sup>	4215,02 <sup>B</sup>	4159,5 <sup>C</sup>	<0,001
CAP	21	1,28 <sup>A</sup>	1,27 <sup>A</sup>	1,25 <sup>A</sup>	0,372
	42	1,56 <sup>A</sup>	1,46 <sup>AB</sup>	1,41 <sup>B</sup>	<0,001

Un resumen del peso medio de los órganos digestivos, como porcentaje del peso vivo del animal (%PV), es presentado en la tabla 3. En general, se puede observar que el uso de *B. subtilis* (D3) estimula, de manera significativa ( $p < 0,05$ ), el crecimiento de órganos digestivos, en comparación a la dieta control (D1). Además, se encontró un efecto estadísticamente superior ( $p < 0,05$ ) con la adición de *B. subtilis* respecto al uso de avilamicina (D2) en órganos, como ventrículo, intestino e hígado y un efecto estadísticamente similar ( $p > 0,05$ ), para el crecimiento del proventrículo.

El coeficiente medio de alometría para los diferentes órganos es presentado en la tabla 4. Las dietas D2 y D3 incrementaron, de manera significativa ( $p < 0,05$ ), el desarrollo de órganos, como ventrículo, intestino, hígado y páncreas con respecto a D1; sin embargo, el uso de *B. subtilis* en el alimento favoreció, de manera significativa, el desarrollo de intestino e hígado, en comparación con los órganos de las aves que recibieron antibiótico, promotor de crecimiento en la dieta.

ocho repeticiones. El análisis estadístico fue desarrollado usando el procedimiento GLM del SAS®. El procedimiento de comparaciones múltiples, se realizó mediante una prueba de Tukey.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2, se presenta un resumen del rendimiento zootécnico de las aves sometidas a las diferentes dietas. Se puede observar que la ganancia diaria de peso (GDP) incrementó, de manera significativa ( $p < 0,05$ ), en aquellas aves que recibieron *B. subtilis* (D3), en comparación con las aves que recibieron avilamicina, como promotor de crecimiento (D2). Por su parte, se logró una disminución significativa ( $p < 0,05$ ) en la tasa de conversión alimenticia promedio (CAP), al final del periodo experimental, mediante el uso de *B. subtilis* (D3) en la dieta, frente a los resultados obtenidos con la dieta control (D1); sin embargo, entre el uso de *B. subtilis* y avilamicina no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ).

En cuanto a la longitud media de las diferentes secciones del intestino (duodeno, yeyuno, íleon y ciego) presentada en la tabla 5, se puede observar que la adición de *B. subtilis* incrementó, de manera significativa ( $p < 0,05$ ), la longitud de las diferentes secciones intestinales, en comparación a la dieta control; sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre el uso de *B. subtilis* y avilamicina, como promotor de crecimiento, para las variables mencionadas anteriormente.

En la tabla 6, se presentan los resultados de las variables relacionadas con la morfometría de duodeno, yeyuno e íleon. Se puede observar, que el uso de *B. subtilis* incrementó, de manera significativa ( $p < 0,05$ ), la altura de las vellosidades en duodeno, yeyuno e íleon, en comparación al resultado obtenido bajo el uso de avilamicina (D2), en la dieta. Del mismo modo, se puede observar una menor profundidad ( $p < 0,05$ ) de las criptas intestinales en los tres

Tabla 3. Efecto de *B. subtilis* sobre el peso de diferentes órganos, como porcentaje del peso vivo en pollos de engorde. Porcentaje del peso vivo (%PV). (D1): dieta sin la adición de antibiótico y probiótico; (D2): dieta control más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm); (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas), a razón de 50 ppm. A, B, C dentro de una misma fila, medias con un superíndice común (por variable en estudio), no difieren estadísticamente ( $P > 0,05$ ). EEM corresponde al error estándar de la media.

Órganos	Edad (días)	Dieta			Valor P
		D1	D2	D3	
Proventrículo (%PV)	21	0,33 <sup>A</sup>	0,38 <sup>B</sup>	0,41 <sup>B</sup>	<0,001
	42	0,50 <sup>A</sup>	0,61 <sup>B</sup>	0,60 <sup>B</sup>	<0,001
Ventrículo (%PV)	21	1,49 <sup>A</sup>	1,47 <sup>A</sup>	1,69 <sup>B</sup>	0,008
	42	2,40 <sup>A</sup>	2,74 <sup>B</sup>	2,81 <sup>C</sup>	<0,001
Intestino completo (%PV)	21	4,90 <sup>A</sup>	5,45 <sup>B</sup>	5,50 <sup>B</sup>	<0,001
	42	7,15 <sup>A</sup>	7,37 <sup>B</sup>	8,38 <sup>C</sup>	0,017
Hígado (%PV)	21	2,40 <sup>A</sup>	2,58 <sup>B</sup>	2,63 <sup>B</sup>	0,002
	42	3,31 <sup>A</sup>	3,32 <sup>A</sup>	3,84 <sup>B</sup>	0,003
Páncreas	21	0,21 <sup>A</sup>	0,20 <sup>A</sup>	0,24 <sup>A</sup>	0,654
	42	0,33 <sup>A</sup>	0,34 <sup>A</sup>	0,36 <sup>A</sup>	0,328

Tabla 4. Efecto del uso de *B. subtilis* sobre el coeficiente de alometría, para diferentes órganos digestivos. Coeficiente de alometría por órgano (C.A.O). (D1): dieta sin la adición de antibiótico y probiótico; (D2): dieta control más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm); (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas), a razón de 50 ppm. A, B, C dentro de una misma fila, medias con un superíndice común (por variable en estudio), no difieren estadísticamente ( $P > 0,05$ ). EEM corresponde al error estándar de la media.

CAO	Edad (días)	Dieta			Valor P
		D1	D2	D3	
Proventrículo	21	0,18 <sup>A</sup>	0,24 <sup>A</sup>	0,26 <sup>A</sup>	0,549
	42	0,32 <sup>A</sup>	0,34 <sup>A</sup>	0,39 <sup>A</sup>	0,461
Ventrículo	21	0,24 <sup>A</sup>	0,24 <sup>A</sup>	0,21 <sup>A</sup>	0,639
	42	0,32 <sup>A</sup>	0,39 <sup>AB</sup>	0,45 <sup>B</sup>	0,005
Intestino completo	21	0,27 <sup>A</sup>	0,29 <sup>A</sup>	0,32 <sup>A</sup>	0,321
	42	0,36 <sup>A</sup>	0,43 <sup>AB</sup>	0,50 <sup>B</sup>	0,001
Hígado	21	0,35 <sup>A</sup>	0,35 <sup>A</sup>	0,40 <sup>A</sup>	0,487
	42	0,42 <sup>A</sup>	0,60 <sup>B</sup>	0,77 <sup>C</sup>	<0,001
Páncreas	21	0,26 <sup>A</sup>	0,43 <sup>B</sup>	0,46 <sup>B</sup>	<0,001
	42	0,44 <sup>A</sup>	0,51 <sup>AB</sup>	0,56 <sup>B</sup>	<0,001

segmentos evaluados, cuando se adicionó *B. subtilis*, en la dieta de las aves.

El uso de probióticos en la alimentación animal, como alternativa al uso de antibióticos promotores de crecimiento (APC), ha demostrado resultados favorables sobre la salud del intestino y el rendimiento productivo de los animales. Son diversos los modos de acción, mediante los cuales, los probióticos permiten obtener un mejor aprovechamiento de los nutrientes presentes en la

dieta, incrementando, así, la eficiencia productiva de los animales (Sugiharto, 2016; Lokapirnasari *et al.* 2017).

Un indicador importante en la rentabilidad de las granjas es el rendimiento productivo de los animales. Acorde con los resultados zootécnicos obtenidos en la presente investigación, se ha reportado en la literatura que el uso de *B. subtilis* tiene un efecto similar o estadísticamente superior sobre la ganancia diaria de peso y la tasa de conversión alimenticia, en comparación al uso de APC's (Gong

Tabla 5. Influencia de *B. subtilis* sobre la longitud de diferentes secciones intestinales en pollos de engorde. (D1): dieta sin la adición de antibiótico y probiótico; (D2): dieta control más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm); (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas), a razón de 50 ppm. A, B, C dentro de una misma fila, medias con un superíndice común (por variable en estudio), no difieren estadísticamente ( $P > 0,05$ ). EEM corresponde al error estándar de la media.

Longitud sección intestinal (cm)	Edad (días)	Dieta			Valor P
		D1	D2	D3	
Duodeno	21	26,5 <sup>A</sup>	25,0 <sup>A</sup>	25,0 <sup>A</sup>	0,739
	42	27,0 <sup>A</sup>	30,5 <sup>B</sup>	31,5 <sup>B</sup>	0,003
Yeyuno	21	48,5 <sup>A</sup>	47,5 <sup>A</sup>	46,0 <sup>A</sup>	0,592
	42	55,0 <sup>A</sup>	60,0 <sup>AB</sup>	63,5 <sup>B</sup>	<0,001
Íleon	21	50,0 <sup>A</sup>	57,0 <sup>B</sup>	53,5 <sup>C</sup>	<0,001
	42	52,0 <sup>A</sup>	60,5 <sup>B</sup>	63,5 <sup>B</sup>	<0,001
Ciegos	21	11,5 <sup>A</sup>	10,0 <sup>A</sup>	10,0 <sup>A</sup>	0,462
	42	14,0 <sup>A</sup>	16,0 <sup>B</sup>	16,0 <sup>B</sup>	<0,001

Tabla 6. Efecto de *B. subtilis* sobre la altura de las vellosidades y profundidad de las criptas, en las diferentes secciones del intestino delgado. (D1): dieta sin la adición de antibiótico y probiótico; (D2): dieta control más la adición de antibiótico (Avilamicina 10 ppm); (D3): dieta control más la adición de *B. subtilis* (en forma de esporas), a razón de 50 ppm. A, B, C dentro de una misma fila, medias con un superíndice común (por variable en estudio), no difieren estadísticamente ( $P > 0,05$ ).

Variable	Día 21				Valor p
		D1	D2	D3	
Altura vellosidad (µm)	Duodeno	1278,0 <sup>C</sup>	1441,9 <sup>B</sup>	1521,3 <sup>A</sup>	<0,001
	Yeyuno	1276,5 <sup>C</sup>	1356,5 <sup>B</sup>	1521,1 <sup>A</sup>	<0,001
	Íleon	884,6 <sup>C</sup>	1205,7 <sup>B</sup>	1343,5 <sup>A</sup>	<0,001
Profundidad cripta (µm)	Duodeno	53,6 <sup>A</sup>	50,1 <sup>B</sup>	40,5 <sup>C</sup>	<0,001
	Yeyuno	62,8 <sup>A</sup>	59,5 <sup>B</sup>	54,2 <sup>C</sup>	<0,001
	Íleon	74,4 <sup>A</sup>	70,3 <sup>B</sup>	57,6 <sup>C</sup>	<0,001
<b>Día 42</b>					
Altura vellosidad (µm)	Duodeno	1658,7 <sup>C</sup>	1745,0 <sup>B</sup>	1830,2 <sup>A</sup>	<0,001
	Yeyuno	1661,5 <sup>C</sup>	1699,4 <sup>B</sup>	1911,9 <sup>A</sup>	<0,001
	Íleon	1200,9 <sup>C</sup>	1205,7 <sup>B</sup>	1343,5 <sup>A</sup>	<0,001
Profundidad cripta (µm)	Duodeno	48,6 <sup>A</sup>	39,9 <sup>B</sup>	31,1 <sup>C</sup>	<0,001
	Yeyuno	52,1 <sup>A</sup>	51,8 <sup>A</sup>	38,5 <sup>C</sup>	<0,001
	Íleon	65,2 <sup>A</sup>	56,9 <sup>B</sup>	47,8 <sup>C</sup>	<0,001

*et al.* 2018). Además, se ha evidenciado la capacidad de *B. subtilis* para contrarrestar los impactos desfavorables en las diferentes infecciones causadas por *Clostridium perfringens* o *Coccidia* sp., sobre el desempeño productivo (Park *et al.* 2020). Son diversos los estudios realizados en los que se alcanza un mejor desempeño zootécnico en pollos de engorde, mediante el uso de *B. subtilis*, como alternativa a los APC's (Goodarzi Borojjeni *et al.* 2018).

Un mejor rendimiento productivo es estrechamente ligado a una óptima salud intestinal (Li *et al.* 2017). Los principales mecanismos, mediante los cuales, los probióticos permiten conservar la salud del intestino, son la producción de ácidos orgánicos, bacteriocinas o simplemente por exclusión competitiva de microorganismos. Por lo anterior, la adición de probióticos en el alimento, permite modular los ecosistemas microbianos presentes a lo largo del intestino

(Gadde *et al.* 2017), garantizando la simbiosis estable entre los microorganismos intestinales y el hospedante, disminuyendo el gasto catabólico asociado a la hiperactivación del sistema inmune, protegiendo la integridad del intestino y favoreciendo el buen funcionamiento del epitelio intestinal, para cumplir, con eficiencia, con los procesos de digestión del alimento y la absorción de los nutrientes (Madrid-Garcés *et al.* 2017; Omonijo *et al.* 2018).

La importancia en el desarrollo óptimo (CA) de los órganos del tracto gastrointestinal radica en la capacidad para obtener de la dieta los nutrientes necesarios para garantizar las funciones de mantenimiento y crecimiento de los animales (Gao *et al.* 2019; Modina *et al.* 2019). Cuando el órgano crece en la misma proporción al peso corporal, CA es de 1; si el crecimiento del órgano es más lento al peso corporal, CA es menor a 1 y cuando CA es mayor a 1, hay un crecimiento rápido con relación a la ganancia total de peso corporal (Chávez *et al.* 2016). Por lo anterior, estudios realizados en pollos de engorde han reportado que la inclusión de *B. subtilis* incrementa, de manera significativa, el peso y el coeficiente alométrico (CA) de los órganos digestivos (Chávez *et al.* 2016), resultados similares a los obtenidos en la presente investigación. Además, *B. subtilis* tiene la capacidad de contrarrestar el efecto de microorganismos patógenos (como coccidia) y de mejorar el desarrollo y el crecimiento del intestino delgado, en pollos de engorde (Wang *et al.* 2018).

El óptimo desarrollo y la protección de la superficie del epitelio intestinal permite obtener una mayor área de contacto entre el contenido intestinal y las vellosidades y microvellosidades que albergan a los enterocitos, encargados de la digestión y el transporte de los nutrientes (Thongsong *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020). Por tanto, un mejor desarrollo del epitelio intestinal, principalmente a nivel de duodeno y yeyuno, está asociado a una mayor eficiencia en la digestión y absorción de nutrientes (Peng *et al.* 2016), mientras que la disminución en la profundidad de las criptas, se asocia a un menor gasto energético, producto de la disminución en la tasa de mitosis en la base de la cripta, con el fin de reemplazar los enterocitos desprendidos en la parte apical de la vellosidad (M'sadeq, 2019). Estudios realizados en pollos de engorde, incluyendo esta investigación, reportan que el uso de *B. subtilis* incrementa la altura de las vellosidades y disminuye la profundidad de las criptas intestinales (Wilson *et al.* 2018; Li *et al.* 2019).

Los probióticos muestran la capacidad de proteger el epitelio intestinal, ya que disminuyen la tasa de descamación, asociada a la acción de bacterias patógenas (Gadde *et al.* 2017), mientras mejoran el desarrollo e integridad del intestino e incrementan el metabolismo, por un aumento en la actividad enzimática en los enterocitos (Gong *et al.* 2018).

La adición de *B. subtilis* en la dieta de pollos de engorde mejora el desarrollo de órganos digestivos, principalmente, la alometría del intestino delgado y la morfología del epitelio intestinal, además, de una mejor tasa de conversión alimenticia. De esta manera, *B. subtilis* se considera una alternativa eficaz y biológicamente segura ante el uso de antibióticos, promotores de crecimiento en pollos de engorde.

**Agradecimientos.** Al personal de apoyo de la Estación de Producción Animal “San Pablo” de la Universidad Nacional de Colombia, por su dedicación y compromiso en el desarrollo del proyecto. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Este manuscrito es derivado del trabajo de grado “Efecto en la adición de compuestos antimicrobianos en la dieta sobre la microbiota y parámetros intestinales (íleon) en pollos de engorde” del primer autor, para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias. Financiación: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Registro único de proyectos. Código HERMES 37384.

## REFERENCIAS

1. BARRERA-BARRERA, M.H.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, S.P.; TORRES-VIDALES, G. 2014. Efectos de la adición de ácido cítrico y un probiótico comercial en el agua de bebida, sobre la morfometría del duodeno y parámetros zootécnicos en pollo de engorde. Orinoquia (Colombia). 18(2):52-62.
2. CHÁVEZ, L.; LÓPEZ, A.; PARRA, J. 2016. Crecimiento y desarrollo intestinal de aves de engorde alimentadas con cepas probióticas. Archivos de Zootecnia. 65(249):51-58. <http://dx.doi.org/10.21071/az.v65i249.441>
3. CHOWDHURY, S.; MANDAL, G.P.; PATRA, A.K. 2018. Different essential oils in diets of chickens: 1. Growth performance, nutrient utilisation, nitrogen excretion, carcass traits and chemical composition of meat. Animal Feed Science and Technology. 236:86-97. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.12.002>
4. DODDS, D.R. 2017. Antibiotic resistance: a current epilogue. Biochemical Pharmacology. 134:139-146. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2016.12.005>
5. GADDE, U.D.; OH, S.; LEE, Y.; DAVIS, E.; ZIMMERMAN, N.; REHBERGER, T.; LILLEHOJ, H.S. 2017. Dietary *Bacillus subtilis* based direct fed microbials alleviate LPS-induced intestinal immunological stress and improve intestinal barrier gene expression in commercial broiler chickens. Research in Veterinary Science. 114:236-243. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.05.004>
6. GAO, J.; YIN, J.; XU, K.; LI, T.; YIN, Y. 2019. What is the impact of diet on nutritional diarrhea associated with gut microbiota in weaning piglets: a system review. BioMed Research International. 2019:6916189. <https://doi.org/10.1155/2019/6916189>
7. GONG, L.; WANG, B.; MEI, X.; XU, H.; QIN, Y.; LI, W.; ZHOU, Y. 2018. Effects of three probiotic *Bacillus* on growth performance, digestive enzyme activities, antioxidative capacity, serum immunity, and biochemical parameters in

- broilers. *Animal Science Journal*. 89(11):1561-1571.  
<https://doi.org/10.1111/asj.13089>
8. GOODARZI BOROOJENI, F.; VAHJEN, W.; MÄNNER, K.; BLANCH, A.; SANDVANG, D.; ZENTEK, J. 2018. *Bacillus subtilis* in broiler diets with different levels of energy and protein. *Poultry Science*. 97(11):3967-3976.  
<https://doi.org/10.3382/ps/pey265>
  9. HENCHION, M.; HAYES, M.; MULLEN, A.M.; FENELON, M.; TIWARI, B. 2017. Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*. 6(7):53.  
<https://doi.org/10.3390/foods6070053>
  10. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 1995. Resolución No. 1082. 20 de abril de 1995. ICA. Disponible desde Internet en:  
<https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/regulacion-y-control-de-medicamentos-veterinarios/resoluciones-prohibicion-o-restriccion-de-sustanci/06-res-1082-95-furazolidona.aspx>
  11. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, ICA. 2018. Resolución 22747 de 2018. "Por medio de la cual se prohíbe la importación, fabricación, registro, comercialización y uso de aditivos que contengan polimixina E (colistina) y polimixina B como promotores de crecimiento en especies animales productoras de alimentos para el consumo humano". ICA. Disponible desde Internet en:  
<https://www.ica.gov.co/getattachment/4972ba67-e1ba-4b2a-89ed-09f54f5c62b4/2018R22747.aspx>
  12. LI, C.-L.; WANG, J.; ZHANG, H.-J.; WU, S.-G.; HUI, Q.-R.; YANG, C.-B.; FANG, R.-J.; QI, G.-H. 2019. Intestinal morphologic and microbiota responses to dietary *Bacillus spp.* in a broiler chicken model. *Frontiers in Physiology*. 9:1968.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01968>
  13. LI, Y.; SONG, Z.; KERR, K.A.; MOESER, A.J. 2017. Chronic social stress in pigs impairs intestinal barrier and nutrient transporter function, and alters neuro-immune mediator and receptor expression. *Plos One*. 12(2):e0171617.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171617>
  14. LIU, Y.; ESPINOSA, C.D.; ABELILLA, J.J.; CASAS, G.A.; LAGOS, L.V.; LEE, S.A.; KWON, W.B.; MATHAI, J.K.; NAVARRO, D.M.D.L.; JAWORSKI, N.W.; STEIN, H.H. 2018. Non-antibiotic feed additives in diets for pigs: A review. *Animal Nutrition*. 4(2):113-125.  
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.01.007>
  15. LOKAPIRNASARI, W.P.; DEWI, A.R.; FATHINAH, A.; HIDANAH, S.; HARIJANI, N.; SOEHARSONO, S.; KARIMAH, B.; ANDRIANI, A.D. 2017. Effect of probiotic supplementation on organic feed to alternative antibiotic growth promoter on production performance and economics analysis of quail. *Veterinary World*. 10(12):1508-1514.  
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2017.1508-1514>
  16. M'SADEQ, S.A. 2019. Effect of dietary supplementation of miaclost on performance and gut morphology in broiler chickens challenged with *escherichia coli*. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 2(50):506-514.  
<https://doi.org/10.36103/ijas.v2i50.650>
  17. MADRID-GARCÉS, T.A.; LÓPEZ-HERRERA, A.; PARRA-SUESCÚN, J.E. 2017. La ingesta de aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) mejora la morfología intestinal en Broilers. *Archivos de zootecnia*. 67(260):470-476.  
<https://doi.org/10.21071/az.v0i0.3876>
  18. MEHDI, Y.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M.P.; GAUCHER, M.-L.; CHORFI, Y.; SURESH, G.; ROUISSI, T.; BRAR, S.K.; CÔTÉ, C.; AVALOS RAMIREZ, A.; GODBOUT, S. 2018. Use of antibiotics in broiler production: global impacts and alternatives. *Animal Nutrition*. 4(2):170-178.  
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.03.002>
  19. MODINA, S.C.; POLITO, U.; ROSSI, R.; CORINO, C.; DI GIANCAMILLO, A. 2019. Nutritional regulation of gut barrier integrity in weaning piglets. *Animals*. 9(12):1045.  
<https://doi.org/10.3390/ani9121045>
  20. MOHAMMADI GHEISAR, M.; KIM, I.H. 2018. Phytobiotics in poultry and swine nutrition: a review. *Italian Journal of Animal Science*. 17(1):92-99.  
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
  21. OMONIJO, F.A.; NI, L.; GONG, J.; WANG, Q.; LAHAYE, L.; YANG, C. 2018. Essential oils as alternatives to antibiotics in swine production. *Animal Nutrition*. 4(2):126-136.  
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2017.09.001>
  22. OVIEDO-RONDÓN, E.O. 2019. Holistic view of intestinal health in poultry. *Animal Feed Science and Technology*. 250:1-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.01.009>
  23. PARK, I.; LEE, Y.; GOO, D.; ZIMMERMAN, N.P.; SMITH, A.H.; REHBERGER, T.; LILLEHOJ, H.S. 2020. The effects of dietary *Bacillus subtilis* supplementation, as an alternative to antibiotics, on growth performance, intestinal immunity, and epithelial barrier integrity in broiler chickens infected with *Eimeria maxima*. *Poultry Science*. 99(2):725-733.  
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.12.002>
  24. PENG, Q.Y.; LI, J.D.; LI, Z.; DUAN, Z.Y.; WU, Y.P. 2016. Effects of dietary supplementation with oregano essential oil on growth performance, carcass traits and jejunal

- morphology in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*. 214:148-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.02.010>
25. ROA, M.L.; GUZMAN, Y.E.; NAVARRO, C.A. 2018. Efecto del uso de probióticos en la morfometría intestinal de pollos de engorde. *Archivos de Zootecnia (Colombia)*. 67(257):93-98.  
<https://doi.org/10.21071/az.v0i0.3878>
26. SALIM, H.M.; HUQUE, K.S.; KAMARUDDIN, K.M.; BEG, M.A.H. 2018. Global restriction of using antibiotic growth promoters and alternative strategies in poultry production. *Science Progress*. 101(1):52-75.  
<https://doi.org/10.3184/003685018X15173975498947>
27. SOKALE, A.O.; MENCONI, A.; MATHIS, G.F.; LUMPKINS, B.; SIMS, M.D.; WHELAN, R.A.; DORANALLI, K. 2019. Effect of *Bacillus subtilis* DSM 32315 on the intestinal structural integrity and growth performance of broiler chickens under necrotic enteritis challenge. *Poultry Science*. 98(11):5392-5400.  
<https://doi.org/10.3382/ps/pez368>
28. SUGIHARTO, S. 2016. Role of nutraceuticals in gut health and growth performance of poultry. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 15(2):99-111.  
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.06.001>
29. SVIHUS, B. 2014. Function of the digestive system. *Journal of Applied Poultry Research*. 23(2):306-314.  
<https://doi.org/10.3382/japr.2014-00937>
30. THONGSONG, B.; WIYAPORN, M.; KALANDAKANOND-THONGSONG, S. 2019. Blood glucose, amino acid profiles and nutrient transporter gene expressions in the small intestine of low and normal birthweight piglets during the early suckling period. *The Veterinary Journal*. 247:1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2019.02.006>
31. WANG, M.; YANG, C.; WANG, Q.; LI, J.; HUANG, P.; LI, Y.; DING, X.; YANG, H.; YIN, Y. 2020. The relationship between villous height and growth performance, small intestinal mucosal enzymes activities and nutrient transporters expression in weaned piglets. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 104(2):606-615.  
<https://doi.org/10.1111/jpn.13299>
32. WANG, X.; KIESS, A.S.; PEEBLES, E.D.; WAMSLEY, K.G.S.; ZHAI, W. 2018. Effects of *Bacillus subtilis* and zinc on the growth performance, internal organ development, and intestinal morphology of male broilers with or without subclinical coccidia challenge. *Poultry Science*. 97(11):3947-3956.  
<https://doi.org/10.3382/ps/pey262>
33. WILSON, F.D.; CUMMINGS, T.S.; BARBOSA, T.M.; WILLIAMS, C.J.; GERARD, P.D.; PEEBLES, E.D. 2018. Comparison of two methods for determination of intestinal villus to crypt ratios and documentation of early age-associated ratio changes in broiler chickens. *Poultry Science*. 97(5):1757-1761.  
<https://doi.org/10.3382/ps/pex349>



# Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba

## Machine learning application to industrial analysis of the sugar provision in Matanzas, Cuba

Yasmany García-López<sup>1\*</sup> ; Lourdes Yamen González-Sáez<sup>2</sup> ; Juan Alfredo Cabrera-Hernández<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Matanzas, Cuba; e-mail: yasmanygarcia31@gmail.com

<sup>2</sup>Universidad de Matanzas, Departamento de Química e Ingeniería Química. Matanzas, Cuba; e-mail: lourdesgonzalez71@gmail.com

<sup>3</sup>Universidad de Matanzas, Observatorio Ambiental COSTATENAS. Matanzas, Cuba; e-mail: alfredojuan1956@gmail.com

\*autor de correspondencia: yasmanygarcia31@gmail.com

**Cómo citar:** García-López, Y.; González-Sáez, L.Y.; Cabrera-Hernández, J.A. 2022. Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2334. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2334>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** septiembre 8 de 2022

**Aceptado:** noviembre 24 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El análisis de los servicios ecosistémicos puede aportar conocimientos importantes sobre cómo se procesan y se obtienen los bienes del sistema agroindustrial azucarero. Para este trabajo, se recopilaron 346 datos del procesamiento industrial de la caña de azúcar en tres zafra, en la agroindustria del municipio Calimete, Provincia Matanzas (Cuba), con el objetivo de emplear algoritmos de aprendizaje automático, para predicciones relacionadas a datos biofísicos y económicos. Se analizaron siete predictores y mediante best subset selection, se identificó la combinación de rendimiento potencial en caña y pérdidas industriales totales, para predecir el servicio de provisión azucarera, mediante la regresión lineal múltiple. Se ajustó, también, un segundo modelo, que predice el efecto económico de las pérdidas industriales. En ambos modelos, se logró explicar por encima del 70 % de la variabilidad observada, en las variables dependientes, con un test F significativo (p-value: < 0,05), además de cumplirse con las condiciones de diagnóstico y validación.

Palabras clave: Industria; Predicción; Modelo; Provisión; Azúcar.

### ABSTRACT

The analysis of ecosystem services can provide important insights into how goods are processed and obtained from the sugar agro-industrial system. For this work, 346 data were collected on the industrial processing of sugarcane in three harvest, in the agroindustry of the Calimete municipality, Matanzas Province (Cuba), with the objective to use the machine learning algorithm, to predict both, biophysical and economic data. Seven predictors were analyzed and by best subset selection, it was identified both the potential yield in sugarcane and the total industrial losses combination to predict the sugar provision service, by multiple linear regression. In addition, it was adjusted a second model to predict the economic effect of the industrial losses. In both models were able to explain over 70 % of the variability observed, in the dependent variables, with a significant F test (p-value: <0.05), also the diagnostic and validation conditions were met.

Keywords: Industry; Prediction; Model; Provision; Sugar.

## INTRODUCCIÓN

El término “provisión” es una categoría dentro del enfoque de los servicios ecosistémicos y se refiere a los productos, como comida, agua, madera y fibra, que son obtenidos de los ecosistemas y agroecosistemas (Grunewald *et al.* 2015). Este enfoque es investigado por diferentes autores, como Gaba *et al.* (2015) y Waweru Wangai *et al.* (2016) y se está convirtiendo en la piedra angular del pensamiento contemporáneo sostenible (Bull *et al.* 2016). Su estudio, así como sus aplicaciones en la toma de decisiones, es un área creciente, con amplias perspectivas, para proveer soluciones viables a numerosos desafíos sociales y ambientales, como cambio climático, prevención de la desertificación y gestión del agua (Liquete *et al.* 2016).

El análisis de los servicios ecosistémicos es un enfoque hacia los beneficios producidos por el capital natural y su relación con los manejos para potenciarlos. Este enfoque, comprende aquellos beneficios que se perciben directamente por sus precios comercializables, como el azúcar y los que soportan su generación, como pueden ser la formación de suelo y los ciclos de nutrientes.

Las producciones agrícolas son definidas como servicios de provisión (Gaba *et al.* 2015). En un contexto agroindustrial azucarero, el servicio de provisión puede ser entendido en términos de toneladas de caña producida en los campos o de azúcar posterior a un procesamiento industrial. La caña de azúcar es influenciada por múltiples factores de carácter natural; también necesita de un adecuado manejo de recursos, para llegar a producciones sostenibles (Bhatt, 2020), que pueden ser analizados mediante herramientas estadísticas. En el trabajo de Everingham *et al.* (2016), para una predicción del rendimiento de la caña de azúcar, se consideró a las variables basadas en simulación de biomasa, datos de precipitaciones, radiación y temperaturas máximas y mínimas. Para Kaup (2015), el rendimiento por hectárea depende fuertemente de la región de cultivo, debido a los manejos específicos de cada campo de caña de azúcar y su relación con el tipo de suelo y las características del cultivo (Pérez Iglesias *et al.* 2015).

Aunque mayores rendimientos de caña de azúcar pueden implicar mayor cantidad de azúcar final, el incremento por tonelada de caña molida, necesita, además, de mayor eficiencia industrial. Los procesos agrícolas e industriales promueven las transformaciones del ecosistema en campos manejados, para el incremento del servicio de provisión, pero considerar el enfoque de los servicios ecosistémicos en la de toma de decisión, requiere de metodologías robustas, que incluyan el mapeo de su presencia (Vang Rasmussen *et al.* 2016) y analicen colecciones de datos, para incluir aspectos ambientales, dentro del planeamiento económico local (Keith *et al.* 2016; Sunderland & Butterworth, 2016); sin embargo, identificar correctamente conflictos y potencialidades, estimar impactos simultáneos, no es una tarea simple (Villasante *et al.* 2016). El empleo de colecciones de datos y el uso de algoritmos de aprendizaje automático pueden ser de ayuda en el ajuste de modelos para el enfoque de los servicios ecosistémicos y la estimación de flujos asociados (Willcock *et al.* 2018). Los algoritmos de aprendizaje automático (del inglés, *machine learning algorithm*) es el

sub-campo de la inteligencia artificial, diseñado para aplicar las técnicas estadísticas y aprender de los datos recopilados (Nwanganga & Chapple, 2020).

Dentro de un contexto agroindustrial azucarero, se pueden encontrar múltiples ejemplos de usos de algoritmos de aprendizaje automático y modelos, como son análisis de regresión lineal, para evaluar relaciones con el rendimiento del cultivo (Rahman & Robson, 2016); modelo de polinomio, para evaluar la relación de factores con la reducción de rendimiento en azúcar (Nashiruddin *et al.* 2020); las combinaciones de redes neuronales y algoritmos genéticos, para predecir características del jugo de la caña de azúcar (Tarafdar *et al.* 2020); los algoritmos de random forest, boosting y máquinas de soporte vectorial, para predecir el rendimiento agrícola (Natarajan *et al.* 2016; Hammer *et al.* 2019). Shahzad *et al.* (2017) correlacionan el recuperado azucarero con diferentes rasgos morfológicos de la caña de azúcar. También, se utilizan métodos *stepwise regression*, para la selección de variables significativas (Kumar Verma *et al.* 2020). La selección de variables, mediante criterios estadísticos, permite elegir el subgrupo de predictores y establecer una relación adecuada de bias-varianza, además de evitar sobre o bajo ajuste del modelo (Ramasubramanian & Singh, 2019; Zimmerman, 2020).

El análisis predictivo, mediante un modelo basado en la relación causa-efecto con uno o más predictores, permite predecir una variable objetivo en función de un conjunto de variables de entrada (Contreras Juárez *et al.* 2016; Andrade Saltos & Flores M., 2018); sin embargo, cada modelo tiene diferentes niveles de flexibilidad y de restricciones, así como facilidad o dificultad para su interpretación (James *et al.* 2013).

Además de esto, el análisis del servicio de provisión azucarera (SPA) en esta agroindustria, enfrenta grandes retos con respecto a su predicción y a las variabilidades espacio-temporales, donde influyen múltiples factores y se requiere la recopilación de distintos indicadores biofísicos y económicos. El SPA puede ser expresado en términos de rendimiento agrícola ( $t\ ha^{-1}$ ), producción de azúcar ( $t$ ), así como una combinación de las etapas agrícolas e industrial, o sea, cantidad de azúcar (kg) por toneladas de caña molida ( $kg\ azúcar\ t\ caña^{-1}$ ). Es de resaltar que cada indicador explica un comportamiento en un espacio-tiempo y como tal puede ser analizado y predicho, con las tecnologías y los conocimientos adecuados. Así, los algoritmos de aprendizaje y el ajuste de un modelo predictivo, podrían proporcionar importantes elementos sobre las relaciones con diferentes factores y cómo estos producen incrementos o no, de azúcar.

Por ello, el presente trabajo tiene la finalidad de comprobar si los datos de la agroindustria evaluada pueden ser analizados, mediante algoritmos de aprendizaje automático y servir para las predicciones asociadas al servicio de provisión azucarera, con valores biofísicos y económicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Descripción del estudio de caso.** El estudio, se realizó en la agroindustria azucarera del municipio Calimete, provincia de Matanzas, entre las coordenadas 22° 25' 41" N a 22° 36' 22" N y 81° 11' 14" W a 80° 48' 25" W. La misma, se compone por un central azucarero, que permite el procesamiento de la caña de azúcar y la obtención de productos requeridos por la sociedad, así como la generación de residuos. El suministro de caña de azúcar (materia prima principal) procedió de unidades de producción agrícola, las cuales, se subdividen en bloques y estos, a su vez, en campos (unidad mínima de manejo). La concepción de unidades, bloques y campos es una estructura creada en la agroindustria azucarera, que establece límites en el manejo de recursos y la gestión humana, además de una interrelación con las estructuras, los procesos y las funciones ecosistémicas, en un espacio-tiempo determinado.

**Análisis del servicio de provisión.** Se recurrió a un indicador de SPA en kilogramos de azúcar por tonelada de caña molida ( $\text{kg}_{\text{azúcar}} \text{t}_{\text{caña}}^{-1}$ ); de esta forma, el análisis se centró en la eficiencia vinculada al servicio de provisión azucarera y su relación con predictores importantes. Para ello, se confeccionó una base de datos, que contó con 340 días del registro histórico. Los resultados, se comprendieron entre las zafas de 2014, 2015 y 2020, de la agroindustria azucarera mencionada. Se utilizaron diferentes indicadores relacionados al procesamiento de la caña de azúcar, en función del objetivo de estudio. En correspondencia, se buscaron los elementos de entrada en la industria, como el rendimiento potencial, contenido en los tallos de caña de azúcar, Brix, Pol, fibra y materia extraña. También, se consideraron los indicadores relacionados al comportamiento dentro de la industria, como las pérdidas totales, la pureza de miel final y el recobrado, además del aprovechamiento de la norma potencial. En total, los indicadores elegidos dentro de la base de los registros históricos, fueron:

- Rendimiento potencial en caña [RPC] (%)
- Aprovechamiento del RPC [A\_RPC] (%)
- Pérdidas totales [PERD\_T] (%)
- Aprovechamiento de la norma potencial [ANP] (%)
- Materia extraña (ME)
- Pureza de miel final [P\_Miel\_Final] (%)
- Recobrado [RECB] (%)

El uso de algoritmos de aprendizaje jugó un papel fundamental dentro del proceso de análisis, con la selección de los predictores importantes, que permitieron el ajuste de los modelos utilizados, con el cumplimiento de los requisitos necesarios de validación. Para estos análisis, se utilizó el lenguaje de programación (R), software, versión 3.6.1 (R Core Team, 2019).

**Construcción del modelo de regresión lineal.** Para los datos biofísicos, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple, extensión del modelo de regresión lineal simple a  $p$ , variables independientes, según la ecuación 1:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + e \quad \text{ecuación 1}$$

Donde,

Y: fue la variable respuesta o indicador específico de provisión azucarera

$x_1, x_2, x_p$ : fueron las variables independientes seleccionadas

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_p$ : fueron los coeficientes de regresión

e: los errores aleatorios con distribución normal, media cero y varianza  $\sigma^2$

Para el análisis de la relación entre los predictores y la variable respuesta, se realizó una prueba de hipótesis, donde un  $p\text{-value} < \text{valor calculado}$  implicó el rechazo de la hipótesis nula, de que la pendiente es igual a cero (James *et al.* 2013; Carrasquilla-Batista *et al.* 2016). El modelo seleccionado requirió solo dos predictores, por lo que pudo ser representado, mediante un gráfico de superficie de respuesta.

**Selección de predictores importantes.** Las medidas de bondad de ajuste que se emplearon fueron: la suma de cuadrados de los residuos al (RSS) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (ecuación 2), que describió la proporción de variabilidad observada en la variable dependiente (Y), explicada por el modelo respecto a la variabilidad total. Se consideró, además, el criterio Mallow ( $C_p$ ) (ecuación 3); esencialmente, la estadística de  $C_p$  agrega una penalización  $2d\hat{\sigma}^2$  al RSS (James *et al.* 2013).

$$R^2 = 1 - \frac{\text{RSS}}{\text{TSS}} \quad \text{ecuación 2}$$

$$C_p = \frac{1}{n} (\text{RSS} + 2d\hat{\sigma}^2) \quad \text{ecuación 3}$$

Donde: TSS es la suma de cuadrados totales.

Como  $R^2$  aumenta con la inclusión más variables ( $p$ ) (James *et al.* 2013), se calculó también el  $R^2$  ajustado (ecuación 4):

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \frac{\text{RSS}/(n-p-1)}{\text{TSS}/(n-1)} \quad \text{ecuación 4}$$

Se utilizó el método de mejor modelo de selección (*best subset selection*). Según James *et al.* (2013), este sufre limitaciones computacionales, para cantidades de predictores mayores a 40; sin embargo, en este caso, la cantidad de predictores estuvo por debajo de ese valor y el esquema general de la selección consistió en:

-Creación de un conjunto de modelos, todos los posibles (*best subset*), mediante diferentes combinaciones de los predictores disponibles.

-Para cada posible tamaño de modelo (1 predictor, 2 predictores...), se seleccionó el mejor, basado en el RSS de los datos de entrenamiento.

-Los modelos se compararon entre ellos, para identificar el mejor, con base en la estimación de diferentes criterios ( $C_p$ ,  $R^2$  ajustado).

**Ajuste del modelo de regresión lineal.** Se utilizó, para el ajuste del modelo, los criterios  $R^2$  y Error estándar residual (RSE), de acuerdo con lo expuesto por James *et al.* (2013); mediante RSEm se midió la desviación promedio de los puntos estimados por el modelo, respecto a la recta de regresión (ecuación 5).

$$RSE = \sqrt{\frac{1}{n-p-1} \text{RSS}} \quad \text{ecuación 5}$$

Grados de libertad (Gl) = número observaciones (n)-número predictores (p)-1.

**Diagnóstico del modelo lineal.** En el diagnóstico del modelo, se observó cómo se ajustó a los datos de entrenamiento y se comprobaron los principales criterios considerados por diferentes autores: linealidad, distribución normal de los residuos, varianza de residuos constante (homocedasticidad), valores atípicos y de alta influencia, independencia y factor de Inflación de la Varianza (James *et al.* 2013; Ramasubramanian & Singh, 2019).

**Validación del modelo lineal.** Con la validación cruzada, se estimó el error de predicción del modelo. Para ello, a la base de datos de 340 observaciones, se le realizó la extracción aleatoria de 200 datos de entrenamiento del modelo y el resto para la validación y estimación del error de predicción (en un set de validación simple). Al tratarse de una variable continua, se empleó el error cuadrático medio (MSE), que consistió en la división del RSS entre el número de observaciones (n) (ecuación 6):

$$MSE = \frac{\text{RSS}}{n} \quad (\text{Para datos de validación}) \quad \text{ecuación 6}$$

**Análisis de econometría.** En el contexto de variabilidad temporal, se realizó un análisis de econometría, con la utilización de la ecuación 7, la que permitió determinar las diferencias entre potencial azucarero de la caña que es molida ( $P_{Ai}$ ) (ecuación 8) y azúcar B-96 ( $P_{AR}$ ) (ecuación 9).

$$DPR = (P_{Ai} - P_{AR}) \quad \text{ecuación 7}$$

$$P_{Ai} = C_{mi} * \frac{RPC}{100} \quad \text{ecuación 8}$$

$$P_{AR} = C_{mi} * \frac{RB_{96}}{100} \quad \text{ecuación 9}$$

Donde:

DPR: Diferencias entre potencial y real (t)

$C_{mi}$ : Caña de azúcar molida ( $t_{caña}$ )

RPC: Rendimiento potencial en caña (%)

$P_{Ai}$ : potencial azucarero de la caña molida ( $t_{azúcar}$ )

$P_{AR}$ : azúcar B-96 obtenido ( $t_{azúcar}$ )

RB96: Rendimiento industrial en base 96 (%).

Las diferencias obtenidas entre potencial y real producido, se multiplicó por un precio (P) del azúcar, de 227,9 USD  $t_{azúcar}^{-1}$  (Azcuba, 2020) y se dividió entre las toneladas de caña molida ( $C_{mi}$ ) (ecuación 10).

$$DPRE = \frac{DPR * P}{C_{mi}} \quad \text{ecuación 10}$$

A las diferencias entre potencial y real obtenido en términos económicos (DPRE), se les ajustó un modelo de regresión lineal, que las relacionó con las pérdidas industriales totales; se trabajó con 333 observaciones, de la base de datos. La diferencia respondió a valores eliminados por comportamiento, que ejercieron efectos negativos en el modelo. Al igual que en el caso biofísico, se utilizaron aleatoriamente 200 datos, para entrenamiento del modelo, mientras que el resto fue para la validación y la estimación del error de predicción, donde se siguieron los criterios que fueron expuestos previamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variabilidades temporales presentes en el servicio de provisión azucarera son consistentes con un crecimiento de inicio a mediados y un decrecimiento hacia el final de zafra; sin embargo, al disminuir la escala de análisis, además de este comportamiento, existen variabilidades dentro de cada mes, como se puede apreciar en la zafra 2020 (Figura 1).

Las complejidades de la agroindustria azucarera están comprendidas en diferentes escalas espaciales y temporales. Así, el servicio de provisión azucarera en una zafra, no presenta un comportamiento homogéneo para cada uno de los días que la componen, como tampoco es similar en todos los campos de producción del cultivo de la caña de azúcar, debido a diferentes sitios y necesidades específicas de elementos esenciales. Las etapas de este sistema, agrícola e industrial, están sometidas a diversos impulsores de cambio, que fomentan beneficios o los perjudican y se pueden relacionar con el manejo del suelo, la calidad de la caña de azúcar y la máxima eficiencia industrial para procesarla.

Múltiples indicadores dentro del proceso industrial se pueden correlacionar con SPA; sin embargo, también se pueden correlacionar entre ellos, lo que origina información redundante en la construcción del modelo. Por lo que el mejor modelo no es el que posee más predictores, sino el que incluya los más representativos. Según el método de selección (*best subset selection*), los predictores de mayor significación, para el caso evaluado, fueron RPC y PERD\_T. El RPC es resultado de factores de afuera de la industria, como la variedad, edad, época del año y condiciones del

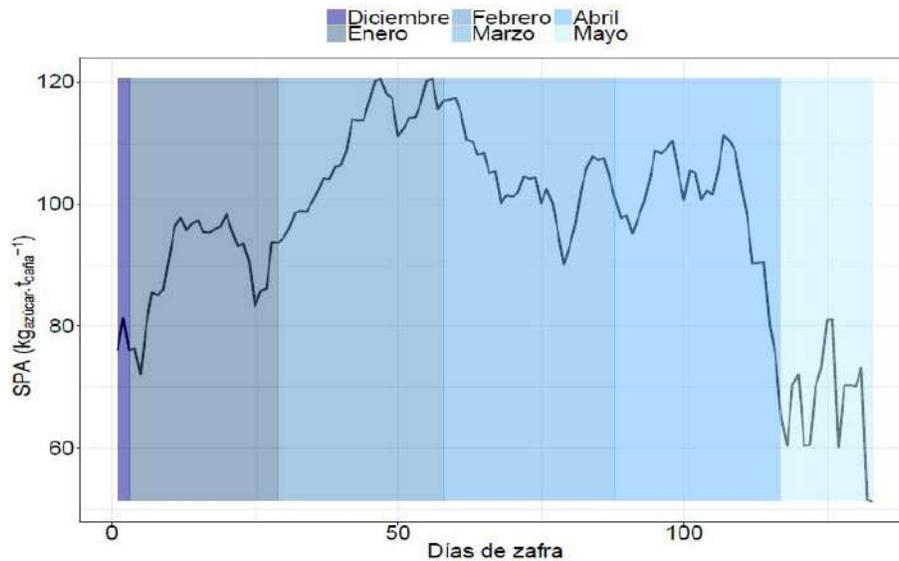


Figura 1. Variabilidad temporal del servicio de provisión azucarera.

Tabla 1. Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple.

	Estimación	Error	valor T	Pr(>  t )	Sig.
Intercepto	60,30	3,66	16,37	$< 2e^{-16}$	***
RPC	6,64	0,30	22,99	$< 2e^{-16}$	***
PERD_T	-2,06	0,07	-26,09	$< 2e^{-16}$	***

Significancia: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 '.'' 1.

Error estándar residual: 3,5 con 197 grados de libertad;  $R^2$  múltiple: 0,85;  $R^2$  ajustado: 0,85; Estadígrafo F: 569,1 en 2 y p-valor:  $< 2,2e^{-16}$ .

cultivo (Martínez Pérez & De León Benítez, 2012), mientras que las pérdidas industriales, se ven influenciadas por factores dentro de la industria, como condiciones de la fábrica, eficiencia y disciplina del proceso industrial (Martínez Pérez & De León Benítez, 2012). Autores, como Roy & Chandra (2020), también destacan que el tiempo después de cosechado el cultivo puede incidir en bajas o altas cuantías de pérdidas de azúcar, mientras que Navarro Hernández & Rostgaard Beltrán (2014), explican que las materias extrañas pueden incrementar las pérdidas en bagazo, así como una disminución de su poder calórico, reducir la pureza del jugo mezclado, aumentar las pérdidas en la miel final y, de forma general, disminuir la producción de azúcar. En resumen, las condiciones de la caña de azúcar a la entrada del central y su procesamiento afectan el servicio de provisión azucarera. Por tal motivo, se concuerda con los indicadores RPC y PERD\_T, como predictores en un modelo regresión lineal, para describir la variabilidad temporal del servicio de provisión azucarera. En la tabla 1, se recoge la significancia y los coeficientes del modelo. Los valores denotan una marcada influencia de los predictores seleccionados en el comportamiento de la variable dependiente.

Al ser dos predictores los seleccionados, el modelo se puede representar en un gráfico de superficie respuesta (Figura 2). El modelo toma la expresión de:

$$"SPA = 60,30 + 6,64 * RPC - 2,06 * PERD\_T"$$

En la validación cruzada el cuadrado medio del error (MSE) obtenido fue de 14,4, mientras que en la figura 2b, se observa la

relación entre los valores observados y los valores predichos del modelo con los datos de prueba, los cuales, se ajustan a una línea recta. Este modelo es capaz de explicar el 85 % de la variabilidad observada en el servicio de provisión azucarera ( $R^2$  de 0,85). El test F muestra que es significativo ( $p$ -value:  $< 2,2 e^{-16}$ ); sin embargo, para que el modelo pueda ser utilizado deben cumplir, además, con otros criterios estadísticos. El diagnóstico del modelo es realizado mediante pruebas estadísticas y comportamientos gráficos. La prueba de *Lilliefors* arrojó un  $p$ -value de 0,62, mientras que la prueba de *Breusch-Pagan*, para residuos estandarizados, el  $p$ -value fue de 0,34. En la prueba de Durbin-Watson, no se encontraron evidencias de autocorrelación, donde el estadístico (d) fue de 2,11 y el  $p$ -value, de 0,36. También, se obtienen valores VIF (1,003), para ambos predictores, por debajo de 5, por lo que no existen problemas de colinealidad, ni presentan una inflación de varianza marcada, por lo que no se encuentran evidencias en el comportamiento de los residuos para rechazar el modelo. Además de lo expuesto, en la figura 3, se muestran los gráficos que corroboran los test estadísticos.

En la figura 3a, no observó ningún patrón, lo cual, es indicativo de que no existen heterocedasticidad; en la figura 3b, se diagnosticó la normalidad y los puntos se encontraron cerca de la diagonal y la figura 3c, también es indicativo para la heterocedasticidad y lo ideal es encontrar una pendiente nula (Ramasubramanian & Singh, 2019), mientras que la figura 3d permite detectar valores atípicos o influyentes. En este, se representó los residuos estandarizados en función del valor de influencia o *leverage*, así como la distancia

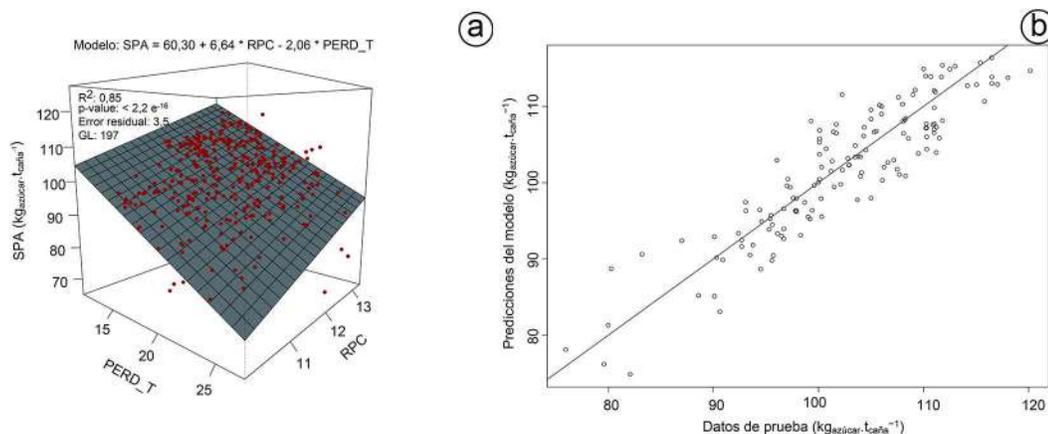


Figura 2. a) Superficie respuesta; b) Validación con datos de prueba.

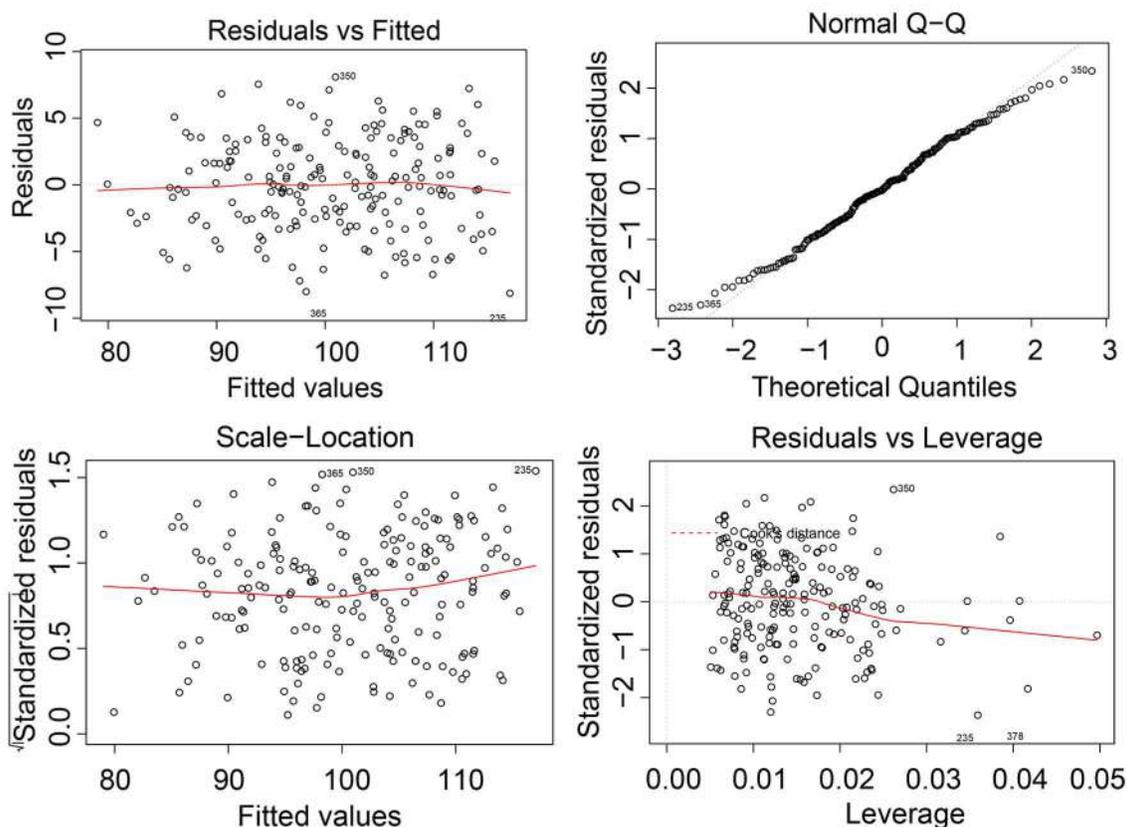


Figura 3. Diagnóstico del modelo de regresión lineal múltiple.

*Cook* para valores influyentes que, al no poseer valores elevados, no existen evidencias de un impacto regular en la línea de la regresión estimada (Nwanganga & Chapple, 2020). Se satisfacen, entonces, las condiciones de normalidad, de autocorrelación y no se presenta una inflación de varianza marcada para los predictores. Tampoco, se encontraron evidencias contra la homogeneidad de varianza, por lo que el servicio de provisión azucarera y su relación con los predictores: rendimiento potencial en caña (RPC) y pérdidas totales en la industria (PERD\_T), puede ser modelada por un modelo de regresión lineal múltiple.

**Resultados del análisis de econometría.** Los análisis biofísicos y económicos pueden ser complementarios y permiten un mejor análisis y comprensión de los servicios ecosistémicos. La cuantificación de la producción real y su alejamiento de un potencial que puede ser alcanzado es una medida de pérdidas presentes en el proceso. Su expresión económica permite razonar la cantidad de beneficio dejado de percibir, además de visualizar un margen financiero que se puede tener, para invertir en acciones de mejoras y disminución de las pérdidas. Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron representar, en un modelo lineal (Figura 4), un alejamiento del potencial azucarero, de 0,42 hasta 10 USD  $tc^{-1}$ , para los parámetros considerados.

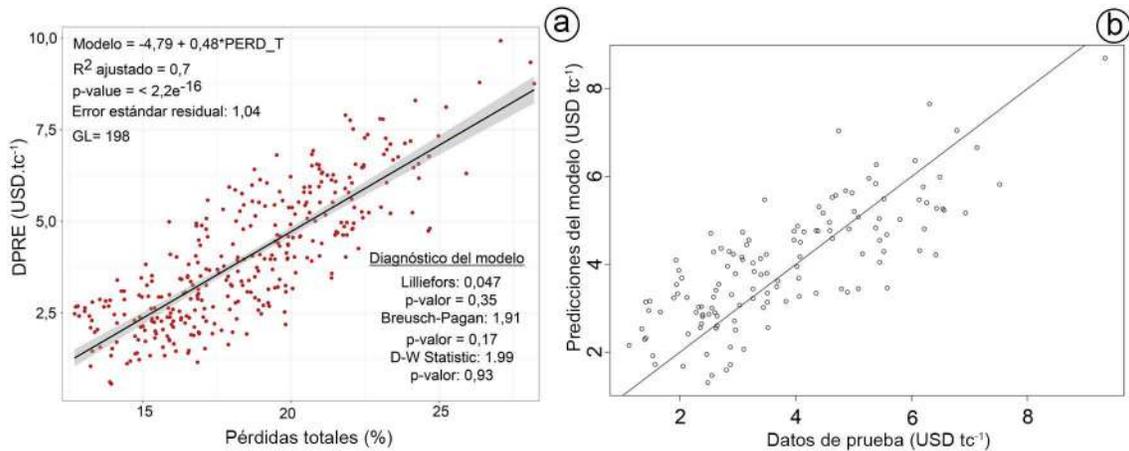


Figura 4. a) Modelo lineal; b) validación con datos de prueba.

Mediante el análisis combinado de parámetros estadísticos calculados y métodos gráficos (Figura 5), se considera que el modelo de regresión lineal simple cumple con los parámetros de diagnósticos y de validación, por lo que se considera adecuado para determinar las DPRE, en función de las pérdidas industriales totales, con un  $R^2$  de 0,7 y un valor de la probabilidad menor que 0,05, mientras que la prueba de *Breusch-Pagan* obtuvo un valor de la probabilidad de 0,17. Además que, en la prueba de Durbin-Watson, no se encontraron evidencias de autocorrelación, donde el estadístico d fue de 1,99 y el *p-value*, de 0,93, además de un

valor MSE, de 1,04, mientras que los métodos gráficos (Figura 5) corroboran los resultados, al igual que en la regresión lineal múltiple. Los resultados encontrados, además de considerar a los modelos válidos, denotan que las predicciones conllevan a un proceso complejo de ajuste, identifican errores y validación; sin obviar la incertidumbre, siempre tiene algún efecto en los métodos de análisis (Azadi *et al.* 2021) y que la incorporación de múltiples indicadores convierte al análisis de servicios ecosistémicos en un desafío (Smith *et al.* 2011).

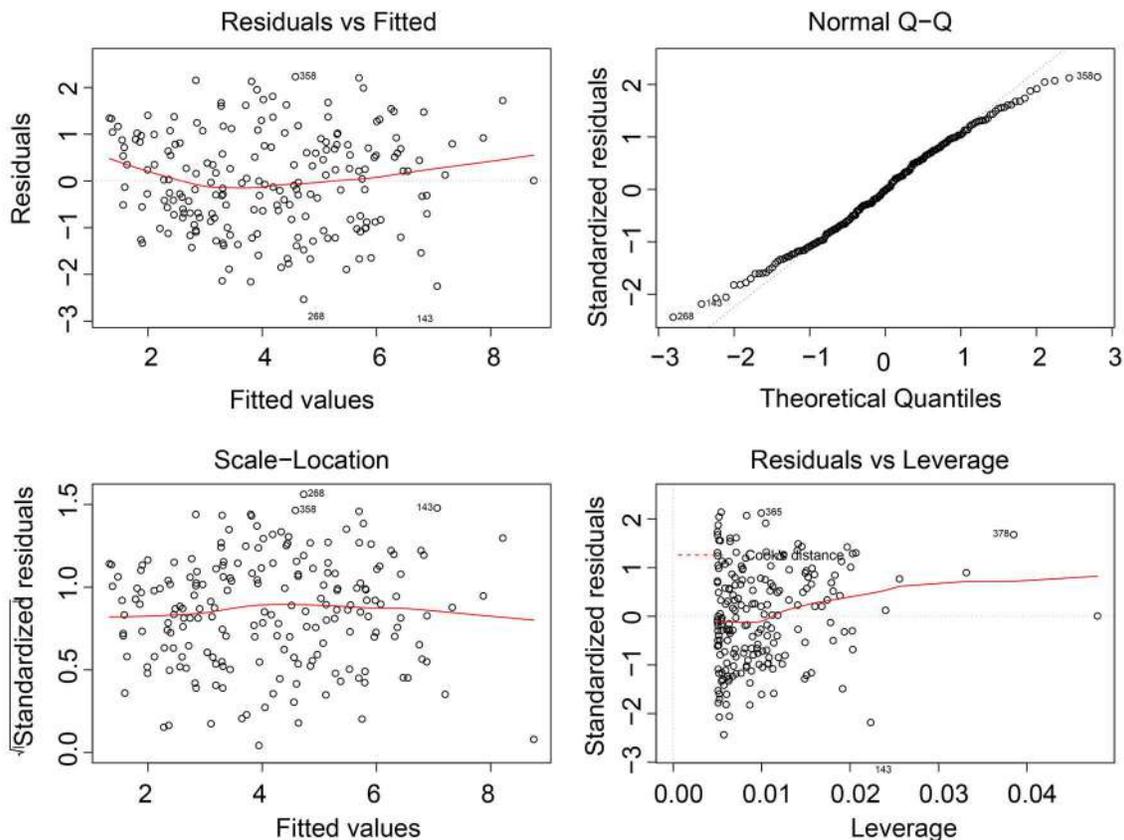


Figura 5. Diagnóstico del modelo de regresión lineal simple.

## REFERENCIAS

En función de los resultados del trabajo, se puede expresar que mayores o menores niveles de eficiencia en la agroindustria azucarera afectan de manera positiva o negativa a los servicios ecosistémicos. Entiéndase por eficiencia, la capacidad de acercar la producción real al potencial azucarero, que posee la caña de azúcar. Las pérdidas industriales conllevan a una menor cantidad de azúcar obtenida, lo que implica un menor beneficio económico por tonelada de caña molida. Por ello, un desafío de la agroindustria azucarera es lograr mayor eficiencia de su proceso e implementar estrategias para su análisis y predicción.

Los modelos de regresión lineal que han sido expuestos pueden contribuir a la comprensión de relaciones que se presentan, para el enfoque de servicios ecosistémicos, en un contexto agroindustrial azucarero y en concordancia con Ribas García *et al.* (2016), ser de utilidad en la planificación y en la optimización del uso de los recursos técnicos, humanos, financieros e indicar las variables tecnológicas de mayor peso.

Como conclusiones se pueden indicar, que los algoritmos de aprendizajes automáticos fueron útiles para el análisis del servicio de provisión azucarera y permitieron la identificación de predictores significativos y ajuste de modelos de regresión lineal, en un contexto agroindustrial azucarero.

El uso de valores biofísicos y económicos, de forma complementaria, permitieron una mejor comprensión de la manera en que se procesa y se obtiene el servicio de provisión azucarera.

Con la técnica de *best subset selection*, se identificaron a las pérdidas industriales y el RPC, como la mejor combinación de los predictores analizados, para modelar el servicio de provisión azucarera.

Se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple, para predecir el servicio de provisión azucarera, en función de las pérdidas industriales y el rendimiento potencial en caña, capaz de explicar el 85 % de la variabilidad observada y un test F significativo, menor a 0,05, además de cumplir con las diferentes condiciones de los residuos y la validación cruzada.

Mediante el modelo de regresión lineal simple, se determinó que el aumento de las pérdidas totales en la industria aleja el servicio de provisión azucarera, del potencial que posee el cultivo de la caña de azúcar, con valores entre 0,42 a 10 USD  $tc^{-1}$ , para los parámetros considerados.

**Conflictos de intereses:** el manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores y se declara que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** la recopilación de datos y los análisis han estado comprendidas dentro de las etapas de trabajo del proyecto: “Tecnologías para adecuar los manejos de suelo y cultivo a la variabilidad del sistema agroindustrial azucarero”, desarrollado por el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar en Matanzas, Cuba.

1. ANDRADE SALTOS, V.A.; FLORES M., P. 2018. Comparativa entre classification trees, random forest y gradient boosting, en la predicción de la satisfacción laboral en Ecuador. *Ciencia Digital*. 2(4.1):42-54. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i4.1..189>
2. AZADI, H.; VAN PASSEL, S.; COOLS, J. 2021. Rapid economic valuation of ecosystem services in man and biosphere reserves in Africa: A review. *Global Ecology and Conservation*. 28:e01697. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01697>
3. AZCUBA. 2020. Evaluación diaria para dirigir económicamente. Empresa Azucarera, Matanzas. Informe No. 096. Matanzas, Cuba.
4. BHATT, R. 2020. Resources management for sustainable sugarcane production. In: Kumar, S.; Meena, R.S.; Jhariya, M.K. (eds.), *Resources use efficiency in agriculture*. Springer. Singapore. p.647-693. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1_18)
5. BULL, J.W.; JOBSTVOGT, N.; BÖHNKE-HENRICH, A.; MASCARENHAS, A.; SITAS, N.; BAULCOMB, C.; LAMBINI, C.K.; RAWLINS, M.; BARAL, H.; ZÄHRINGER, J.; CARTER-SILK, E.; BALZAN, M.V.; KENTER, J.O.; HÄYHÄ, T.; PETZ, K.; KOSS, R. 2016. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats: A SWOT analysis of the ecosystem services framework. *Ecosystem Services*. 7:99-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.012>
6. CARRASQUILLA-BATISTA, A.; CHACÓN-RODRÍGUEZ, A.; NÚÑEZ-MONTERO, K.; GÓMEZ-ESPINOZA, O.; VALVERDE-CERDAS, J.; GUERRERO-BARRANTES, M. 2016. Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. *Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión*. 33-45. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
7. CONTRERAS JUÁREZ, A.; ATZIRY ZUÑIGA, C.; MARTÍNEZ FLORES, J.L.; SÁNCHEZ PARTIDA, D. 2016. Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos percederos. *Estudios Gerenciales*. 32(141):387-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2016.11.002>
8. EVERINGHAM, Y.; SEXTON, J.; SKOCAJ, D.; INMANBAMBER, G. 2016. Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. *Agronomy for Sustainable Development*. 36(27):1-9. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0364-z>

9. GABA, S.; LESCOURET, F.; BOUDSOCQ, S.; ENJALBERT, J.; HINSINGER, P.; JOURNET, E.-P.; NAVAS, M.-L.; WERY, J.; LOUARN, G.; MALÉZIEUX, E.; PELZER, E.; PRUDENT, M.; OZIER-LAFONTAINE, H. 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development*. 35:607-623.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>
10. GRUNEWALD, K.; BASTIAN, O.; MANNSFELD, K. 2015. Development and Fundamentals of the ES Approach. En: Grunewald, K.; Bastian, O. (eds.) *Ecosystem Services - concept, methods and case studies*. Springer (Germany). p.13-34.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-44143-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44143-5_2)
11. HAMMER, R.G.; SENTELHAS, P.C.; MARIANO, J.C.Q. 2019. Sugarcane yield prediction through data mining and crop simulation models. *Sugar Tech*. 22:216-225.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-019-00776-z>
12. JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. 2013. *An Introduction to Statistical. With Applications in R*. Springer (New York). 426p.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
13. KAUP, F. 2015. The sugarcane complex in Brazil. The role of innovation in a dynamic sector on its path towards sustainability. *Contributions to Economics*. Springer (Switzerland). 280p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16583-7>
14. KEITH, A.M.; SCHMIDT, O.; MCMAHON, B.J. 2016. Soil stewardship as a nexus between Ecosystem Services and One Health. *Ecosystem Services*. 17:40-42.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.008>
15. KUMAR VERMA, A.; KUMAR GARG, P.; HARI PRASAD, K. S.; KUMAR DADHWAL, V.; KUMAR DUBEY, S.; KUMAR, A. 2020. Sugarcane yield forecasting model based on weather parameters. *Sugar Tech*. 23:158-166.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-020-00900-4>
16. LIQUETE, C.; UDIAS, A.; CONTE, G.; GRIZZETTI, B.; MASI, F. 2016. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits. *Ecosystem Services*. 22:392-401.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.011>
17. MARTÍNEZ PÉREZ, C.M.; DE LEÓN BENÍTEZ, J.B. 2012. Influencia de la calidad de la materia prima en el proceso tecnológico, calidad del producto final, y el rendimiento industrial en una fábrica de azúcar. *Revista Centro Azúcar*. 39(3):28-34.
18. NASHIRUDDIN, N.I.; FADZIYANA MANSOR, A.; RAHMAN, R.A.; ILIAS, R.M.D.; WAN YUSSOF, H. 2020. Process parameter optimization of pretreated pineapple leaves fiber for enhancement of sugar recovery. *Industrial Crops and Products*. 152:112514.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112514>
19. NATARAJAN, R.; SUBRAMANIAN, J.; PAPAGEORGIOU, E. I. 2016. Hybrid learning of fuzzy cognitive maps for sugarcane yield classification. *Computers and Electronics in Agriculture*. 127:147-157.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.016>
20. NAVARRO HERNÁNDEZ, H.; ROSTGAARD BELTRÁN, L. 2014. Impacto de la materia extraña en la calidad de los jugos de caña y en los indicadores de eficiencia de un central azucarero. *Revista Centro Azúcar*. 41:44-54.
21. NWANGANGA, F.; CHAPPLE, M. 2020. *Practical Machine Learning in R*. John Wiley and Sons (Indiana). 464p.  
<https://doi.org/10.1002/9781119591542>
22. PÉREZ IGLESIAS, H.; SANTANA AGUILAR, I.; RODRÍGUEZ DELGADO, I. 2015. Manejo sostenible de tierras en la producción de caña de azúcar. Ediciones UTMACH (Ecuador). 188p. Disponible desde Internet en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/6649/1/16%20MANEJO%20SOSTENIBLE%20DE%20LA%20TIERRA%20EN%20LA%20PRODUCCION%20DE%20CA%20C3%91A%20DE%20AZUCAR%20VOL%20II.pdf>
23. R CORE TEAM. 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
24. RAHMAN, M.M.; ROBSON, A.J. 2016. A novel approach for sugarcane yield prediction using landsat time series imagery: A case study on bundaberg region. *Advances in Remote Sensing*. 5(2):93-102.  
<http://dx.doi.org/10.4236/ars.2016.52008>
25. RAMASUBRAMANIAN, K.; SINGH, A. 2019. *Machine learning Using R: With time series and industry-based use cases in R*. Second Edition. Springer. New York. 724p.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4215-5>
26. RIBAS GARCÍA, M.; CONSUEGRA DEL REY, R.; ALFONSO ALFONSO, M. 2016. Análisis de los factores que más inciden sobre el rendimiento industrial azucarero. *Revista Centro Azúcar*. 43(1):51-60.
27. ROY, M.M.; CHANDRA, A. 2020. Optimizing sugar recovery in India: Need for an integrated approach. *Acta Scientific Agriculture*. 4(3):1-6.  
<https://doi.org/10.31080/ASAG.2020.04.0806>

28. SHAHZAD, S.; SHOKAT, S.; FIAZ, N.; HAMEED, A. 2017. Impact of yield and quality-related traits of sugarcane on sugar recovery. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 20:1-7. <https://doi.org/10.1007/s12892-016-0048-2>
29. SMITH, R.I.; DICK, J.; SCOTT, E.M. 2011. The role of statistics in the analysis of ecosystem services. *Environmetrics*. 22(5):608-617. <https://doi.org/10.1002/env.1107>
30. SUNDERLAND, T.; BUTTERWORTH, T. 2016. Meeting local economic decision-maker's demand for environmental evidence: The local environment and economic development (LEED) toolkit. *Ecosystem Services*. 17:197-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.007>
31. TARAFDAR, A.; KAUR, B.P.; NEMA, P.K.; BABAR, O.A.; KUMAR, D. 2020. Using a combined neural network - genetic algorithm approach for predicting the complex rheological characteristics of microfluidized sugarcane juice. *LWT*. 123:109058. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109058>
32. VANG RASMUSSEN, L.; MERTZ, O.; CHRISTENSEN, A. E.; DANIELSEN, F.; DAWSON, N.; XAYDONGVANH, P. 2016. A combination of methods needed to assess the actual use of provisioning ecosystem services. *Ecosystem Services*. 17:75-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.005>
33. VILLASANTE, S.; LOPES, P.F.M.; COLL, M. 2016. The role of marine ecosystem services for human well-being: Disentangling synergies and trade-offs at multiple scales. *Ecosystem Services*. 17:1-4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.022>
34. WAWERU WANGAI, P.; BURKHARD, B.; MULLER, F. 2016. A review of studies on ecosystem services in Africa. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 5:225-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.08.005>
35. WILLCOCK, S.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; HOOFTMAN, D.A.P.; BAGSTAD, K.J.; BALBI, S.; MARZO, A.; PRATO, C.; SCIANDRELLO, S.; SIGNORELLO, G.; VOIGT, B.; VILLA, F.; BULLOCK, J.M.; ATHANASIADIS, I.N. 2018. Machine learning for ecosystem services. *Ecosystem Services*. 33:165-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.04.004>
36. ZIMMERMAN, D.L. 2020. *Linear model theory. With examples and exercises*. Springer. Switzerland. 525p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52063-2>



# Cuantificación de compuestos con potencial bioactivo en *Citrullus lanatus*, *Luffa cylindrica* y *Sicana odorifera*

## Quantification of potencial bioactive compounds in *Citrullus lanatus*, *Luffa cylindrica* and *Sicana odorifera*

Angie P. León-Cristancho<sup>1</sup> ; Karol A. Roa-Higuera<sup>1</sup> ; Nixon Meneses-Marentes<sup>1</sup> ; Martha Tarazona-Díaz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, D.C., Colombia; email: angiep.leonc@utadeo.edu.co; karola.roahiguera@utadeo.edu.co; nixon.menesesm@utadeo.edu.co

<sup>2</sup>Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Programa de Ingeniería de Alimentos. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: marthap.tarazonad@utadeo.edu.co

\*autor de correspondencia: marthap.tarazonad@utadeo.edu.co

**Cómo citar:** León-Cristancho, A.P.; Roa-Higuera, K.A.; Meneses-Marentes, N.; Tarazona-Díaz, M. 2022. Cuantificación de compuestos con potencial bioactivo en *Citrullus lanatus*, *Luffa cylindrica* y *Sicana odorifera*. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2123. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2123>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** octubre 10 de 2021

**Aceptado:** noviembre 15 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

La sandía vanessa, la luffa y la cassabanana son cucurbitáceas que poseen compuestos con potencial bioactivo, esto es, presencia de compuestos que ejercen efectos benéficos para la salud. En Colombia, estas frutas son desaprovechadas, debido a su escasa popularidad; dar a conocer la información de sus compuestos nutricionales incentiva su aprovechamiento y consumo. El objetivo del presente estudio fue realizar la caracterización fisicoquímica y evaluar el efecto de la liofilización y la extracción asistida por ultrasonido sobre el contenido de vitamina C, polifenoles totales y capacidad antioxidante de las partes de cada fruto. Los desechos generados entre cortezas y semillas son de 28,3 % (sandía), 68,76 % (luffa) y 25,39 % (cassabanana); estos, a su vez, presentaron contenidos de polifenoles totales y capacidad antioxidante mayores que en la pulpa. El tratamiento de liofilización mejoró la extracción % en capacidad antioxidante, vitamina C y polifenoles totales, comparado con las muestras frescas. Por otro lado, tanto la corteza como la pulpa de luffa son una buena fuente de compuestos con capacidad antioxidante, mientras que la sandía y la cassabanana

alcanzaron una buena aceptación sensorial, lo cual, se atribuye al contenido de sólidos solubles y el alto contenido de agua, que las hace frutas dulces y refrescantes.

Palabras clave: Antioxidante; Compuesto bioactivo; Cucurbitáceas; Liofilización; Polifenoles totales.

### ABSTRACT

Vanessa watermelon, luffa and cassabanana are cucurbits that have compounds with bioactive potential, that is, compounds that have beneficial effects on health. In Colombia, these fruits are underutilized due to their low popularity; making known the information on their nutritional compounds encourages their use and consumption. The objective of this study was to perform the physicochemical characterization and evaluate the effect of freeze-drying and ultrasound-assisted extraction on the vitamin C content, total polyphenols and antioxidant capacity of the parts of each fruit. The wastes generated between rinds and seeds are 28.3 % (watermelon), 68.76 % (luffa) and 25.39 % (cassabanana),

these in turn presented higher total polyphenol contents and antioxidant capacity than in the pulp. The freeze-drying treatment improved the extraction % in antioxidant capacity, vitamin C and total polyphenols compared to fresh samples. On the other hand, both rind and pulp of luffa are a good source of compounds with antioxidant capacity, while watermelon and cassabanana reached a good sensory acceptance, which is attributed to the soluble solids content and the high-water content, which makes them sweet and refreshing fruits.

Keywords: Antioxidant; Bioactive compound; Cucurbitaceae; Lyophilization; Total polyphenols.

## INTRODUCCIÓN

La sandía vanessa (*Citrullus lanatus*), la cassabanana (*Sicana odorifera*) y la luffa (*Luffa cylindrica*), también conocida como estropajo, son frutas de la familia de las cucurbitáceas. La importancia de esta familia, se ve reflejada en ámbitos económicos, nutricionales y culturales (Schaffer & Paris, 2016). En Colombia, la mayor producción de sandía para el 2018 fue en el departamento del Meta, donde la cifra ascendió a 1.284,11 toneladas y cuyos cultivos cubrían un área de 2.384,09 hectáreas. Para el mismo año, se reportó una producción de 86,65 toneladas de luffa, siendo cultivadas 19,9 hectáreas en los departamentos de Tolima, Risaralda y Valle del cauca (Minagricultura, 2018); no obstante, para la cassabanana, no se encuentran reportes oficiales de producción. Tanto la sandía como la cassabanana son de consumo esporádico en Colombia, mientras que la luffa es usada como materia prima, para exportación y fabricación de productos dermatológicos y textiles, como material para tratamiento de aguas, bioadsorbente, fuente de fibras, sustrato para la germinación y crecimiento de plantas; sin embargo, no es conocido su uso en alimentación humana.

En general, las frutas se caracterizan por su potencial bioactivo, que hace referencia a la presencia de compuestos que ejercen efectos benéficos para la salud, como es el caso de los antiinflamatorios, anticancerígenos y antioxidantes (Kris-Etherton *et al.* 2004); estos últimos, albergan una importante fuente de compuestos inherentes a su pulpa, corteza y semilla, cuya principal función es retrasar el daño oxidativo y prevenir los radicales libres formados, como consecuencia de las condiciones ambientales (Urquiza-Martínez & Fenton Navarro, 2016). Ozuna & León-Galván (2017) mencionan la falta de conocimiento acerca del aprovechamiento de péptidos bioactivos en residuos, como las semillas de cucurbitáceas, las cuales, podrían sustituir antioxidantes sintéticos, causantes de posibles efectos desfavorables para la salud. Para el 2017, solamente en la central de mercado Corabastos de Bogotá, D.C., se generaron, en promedio, residuos mensuales de 1.050 toneladas de verduras y 294 toneladas de frutas (Peñaranda Gonzalez *et al.* 2017); por consiguiente, la obtención de compuestos con potencial bioactivo a partir de las diferentes partes de las frutas, podrían convertirlos en materias primas para la obtención de productos con alto valor agregado.

Para la extracción de compuestos con potencial bioactivo, a partir de matrices vegetales, existen técnicas, como la extracción asistida

por ultrasonido (EAU). La EAU causa un fenómeno denominado cavitación, en donde se genera una corriente de burbujas que implosionan, provocando la ruptura de tejidos y segregando el contenido celular. Tal tecnología logra altos rendimientos y tasas de extracción de compuestos bioactivos (Wen *et al.* 2018). Por otro lado, Ledesma-Escobar *et al.* (2016) han evaluado el efecto de pretratamientos como la liofilización, previo a la EAU en limón, mencionando que los rendimientos de extracción de algunos polifenoles son mayores, utilizando muestras liofilizadas; por consiguiente, el uso de la EAU, combinada con la liofilización, podrían maximizar la extracción de compuestos con potencial bioactivo, en las tres cucurbitáceas.

Por todo lo anterior, en este trabajo, se realizó la caracterización fisicoquímica y sensorial de la sandía vanessa, la luffa y la cassabanana. Además, se estudió el efecto de la liofilización y la EAU en el contenido de compuestos con capacidad antioxidante, polifenoles totales y contenido de vitamina C en todas las partes de las frutas, identificando el potencial de los residuos para la obtención de compuestos de alto valor.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Material Vegetal.** Veinte kilogramos de sandía vanessa fue adquirida en un mercado de Villavicencio, Meta. Cinco kilogramos de luffa y quince kilogramos de Cassabanana fueron adquiridas en un mercado local de Bogotá, proveniente de Huila y Cundinamarca, respectivamente. Posteriormente, fueron trasladadas a la Universidad Jorge Tadeo Lozano (UJTL), donde se almacenaron a 4 °C durante 48 horas, hasta su caracterización y procesamiento.

**Caracterización fisicoquímica de la materia prima y análisis sensorial.** Se evaluaron los parámetros de peso (balanza, Mettler Toledo, Switzerland) por triplicado y los diámetros ecuatorial y polar de cada fruto, con un calibrador, realizando cinco repeticiones. Se determinó la esfericidad ( $\Phi$ ) como la razón de los diámetros, teniendo en cuenta lo planteado por Sahin & Summu (2006).

También, se determinó el color en corteza y pulpa, 15 veces con el colorímetro triestímulo (Konica minolta, Japón). Empleando el sistema de color CIE  $L^*a^*b^*$ , se calculó el índice de color (IC), usando la ecuación 1, descrita por Vignoni *et al.* (2006), así como el croma (ecuación 2) y el ángulo Hue (ecuación 3), respectivamente (Sahin & Summu, 2006).

$$IC=1000 \frac{a^*}{L^* b^*} \quad \text{ecuación 1}$$

$$C=\sqrt{(a^*)^2+(b^*)^2} \quad \text{ecuación 2}$$

$$^{\circ}\text{Hue}=\tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{ecuación 3}$$

Se realizó prueba sensorial a la pulpa de sandía vanessa y cassabanana, aplicándose a un panel informal de 60 personas, siguiendo una escala hedónica, donde 1 fue el valor mínimo y 9, el valor máximo que se asignaba a cada atributo; teniendo en cuenta parámetros, como apariencia, aroma, sabor y textura, de acuerdo a la guía

técnica colombiana GTC, 293:2018 (Icontec, 2018), la cual, se refiere a la realización de pruebas hedónicas con consumidores en un área controlada.

Se determinó el contenido de humedad (anizador de humedad Mettler Toledo HB43-S Halógeno, Suiza); contenido de cenizas (mufla Terrígeno, Colombia), a 550 °C durante 5 horas; pH (potenciómetro Mettler Toledo Seven Easy- S20K, China); sólidos solubles totales (SST), expresados como °Brix, utilizando un refractómetro (Atago A521636, Japón) y acidez titulable (AT) expresada en % ácido málico, titulando con NaOH 0,01N, previamente estandarizado con un patrón primario (KHP), realizando 10 lecturas por cada parte y tipo de fruta. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

**Pretratamientos de la materia prima.** Se separó cada parte de la fruta (corteza, semilla y pulpa) en trozos de 1 cm de espesor. El 50 % de muestra se congeló a -30 °C, para su posterior extracción y el porcentaje restante fue liofilizado, a -30 °C (Drycol, Bogotá, Colombia), en condiciones de vacío, 40 mmHg. Las muestras fueron molidas y almacenadas en desecador para su posterior extracción.

**Extracción convencional y asistida con ultrasonido.** Se efectuó la extracción convencional por maceración, según lo descrito por Horvitz *et al.* (2017), modificada a condiciones de laboratorio, en donde se mezclaron 2,5 g de muestra (congelada o liofilizada), con 50 mL de agua destilada y se agitó en un shaker (Heidolph, Alemania), durante 30 minutos, a 100 revoluciones por minuto (rpm), a 20 °C; posteriormente, se centrifugó (centrifuga Hettich, Alemania), a 6000 rpm durante 15 minutos, a 20 °C. Finalmente, se extrajo el sobrenadante y se repitió el procedimiento con el sedimento.

Por otra parte, se llevó a cabo la EAU (Hielscher, Alemania), conforme a lo expuesto por Başlar & Ertugay (2013), modificado a condiciones de laboratorio, en donde se agregaron 2,5 g de muestra y 50 mL de agua destilada, en un vaso precipitado, los cuales, se sometieron a sonicación, con un sonotrodo tipo H3, ciclo 1 y amplitud 50 %, durante 30 minutos, a 20 °C. En seguida, se colectó la muestra y se centrifugó a 6000 rpm, durante 15 minutos, a 20 °C; se recaudó el sobrenadante y se repitió el procedimiento con el sedimento. Todos los extractos obtenidos, se almacenaron en recipientes aislados de la luz, a 4 °C, registrando su volumen final.

**Métodos de cuantificación.** En los extractos, la cuantificación de compuestos con potencial bioactivo, se realizó por triplicado en tubos Eppendorf de 1,5 mL, aislados de la luz, como sigue:

**Capacidad antioxidante por el método de reducción de DPPH:** Se tomaron 75 µL de extracto y se trataron, según lo descrito por Brand-Williams *et al.* (1995), incubándose por 1 hora, a 37 °C. Posteriormente, se midió la absorbancia comparando el resultado con una curva patrón en µM Trolox (TE) ( $R^2=0,9983$ ), para determinar la concentración, en términos de µmol TE/100 g fruta.

**Capacidad antioxidante por el método de reducción de hierro (FRAP):** Con base en el método de Benzie & Strain (1996), se trataron 30 µL de extracto, incubándose a 37 °C, por 1 hora y se midió la absorbancia a 593 nm; finalmente, se comparó con una curva de calibración ( $R^2=0,9988$ ) de TE, cuantificando la concentración, en términos de µmol TE/100 g FF.

**Determinación del contenido de vitamina C por el método colorimétrico 2-Nitroanilina:** Esta prueba, se realizó siguiendo la metodología propuesta por Bernal de Ramírez (1998), tomando muestras de 100 µL de extracto, midiéndose la absorbancia 540 nm. El resultado, se comparó con una curva patrón de ácido ascórbico (AA) ( $R^2=0,9988$ ), determinando la concentración, como mg AA/100 g FF.

**Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu:** A partir de 100 µL de extracto y siguiendo la cuantificación sugerida por Ainsworth & Gillespie (2007), se estableció la absorbancia a 765 nm, comparándose con una curva patrón de ácido gálico (AG), en µM ( $R^2=0,9965$ ), para determinar la concentración, como µmol AG/100 g FF.

**Análisis estadístico.** Para evaluar el efecto de la liofilización y el tipo de extracción en la obtención de compuestos bioactivos, se empleó un diseño experimental bifactorial con replicación, tratando los datos en el software SigmaPlot (versión 12, SYSTAT Software). Se leyeron tres muestras de extracto por parte y tipo de tratamiento, obteniéndose, a su vez, tres repeticiones de absorbancia por muestra en el espectrofotómetro, para un total de 9 datos por combinación parte-tratamiento. Para el análisis, se emplearon dos ANOVA bidireccionales ( $p < 0,05$ ); el primero, para evaluar el efecto del pretratamiento (fresco y liofilizado) y, el segundo, para evaluar el efecto del tipo de extracción. Mediante la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ), se establecieron las diferencias significativas entre las posibles combinaciones de los factores evaluados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización fisicoquímica

**Sandía vanessa:** Como se observa en la tabla 1, los frutos de sandía vanessa presentan una forma esférica ( $\approx 1$ ), con un peso superior a los 2 kg, cuyos residuos ascienden a más del 25 %. Es una fruta con alto contenido de humedad, similar a lo reportado por Tarazona-Díaz & Aguayo (2013), lo que la hace susceptible al crecimiento microbiano. Los SST en la corteza fueron similares a los reportados por Tarazona-Díaz *et al.* (2011), quienes determinaron 4,02 °Brix, para corteza de sandía Azabache; sin embargo, los SST en pulpa y la AT de esta variedad (9,6 °Brix; 0,09 % ácido málico) fueron superiores a lo reportado en el presente estudio. Por otra parte, se encontró que los valores de humedad, pH y SST son mayores en la pulpa que en la corteza, presentando la corteza mayor AT y cenizas. El índice de color en la pulpa está entre el naranja intenso al rojo profundo (Vignoni *et al.* 2006); los valores de ángulo Hue fueron similares a los reportados por Tarazona-Díaz *et al.* (2011), en pulpa de sandía variedad Fashion y motril.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la sandía vanessa, cassabanana y luffa.

	sandía vanessa		cassabanana			luffa		
<b>Peso (kg)</b>	2,26±0,17		1,81±0,92			0,81±0,75		
<b>Diámetro Ecuatorial (cm)</b>	131,02±9,16		8,25±0,472			60,33±10,14		
<b>Diámetro Polar (cm)</b>	173,59±7,13		33,59±2,97			327,2±31,32		
<b>Esfericidad (<math>\Phi</math>)</b>	0,94±0,07		0,25±0,03			0,18±0,02		
	pulpa	corteza	pulpa	corteza	semilla	pulpa	corteza	semilla
<b>% En la fruta</b>	71,7	28,3	74,61	21,92	3,47	31,24	53,13	15,63
<b>%Humedad</b>	90,94±0,86	88,55±2,57	85,42±0,99	74,23±3,42	35,28±2,29	90,42±1,82	89,15±1,29	79,97±0,18
<b>pH</b>	5,77±0,06	5,73±0,06	6,20±0,0	6,70±0,0	6,30±0,10	5,90±0,0	6,13±0,06	6,50±0,0
<b>SST (°Brix)</b>	7,9±0,1	4,0±0,2	7,8±0,4	5,7±3,2	0,1±0,1	10,8±0,1	9,5±0,1	8,4±0,3
<b>AT (% ácido málico)</b>	0,01±0,001	0,02±0,001	0,11±0,01	0,05±0,01	0,01±0,001	0,01 ±0,002	0,03±0,02	0,02±0,002
<b>% Cenizas</b>	0,26±0,02	0,69±0,02	0,93±0,05	1,20±0,11	2,44±0,11	0,51±0,06	0,77±0,21	0,97±0,12
<b>L*</b>	69,87±0,75	67,77±0,68	73,32±0,94	103,76±1,25	-	70,39±11,36	106, 86±1,29	-
<b>a*</b>	17,87±1,47	7,51±0,31	-0,48±1,39	12,12±3,44	-	-7,66±3,14	-2,13±0,22	-
<b>b*</b>	9,60±0,55	5,26±0,85	51,40±1,81	-5,06±2,00	-	25,12±7,70	1,15±1,14	-
<b>IC</b>	27,25±3,12	25,07±2,44	-0,13±0,37	-28,95±20,85	-	-4,40±1,41	-13,96±16,37	-
<b>Croma</b>	20,41±1,42	9,42±0,67	51,47±1,78	13,44±2,41	-	26,31±8,14	3,21±0,39	-
<b>°Hue</b>	29,08±1,72	33,3±3,73	130,51±21,92	359,56±0,24	-	178,72±0,07	179,91±0,40	-

SST: sólidos solubles totales; AT: acidez titulable

**Cassabanana:** La cassabanana presentó una forma alargada y poco ovalada; los diámetros ecuatorial y polar son similares a los reportados por De Paula Filho *et al.* (2015). En términos de las partes, la corteza y la semilla componen más del 25 % en peso, fracción actualmente desechada. Por otro lado, los SST y las cenizas en pulpa fueron superiores a lo reportado por De Paula Filho *et al.* (2015), quienes encontraron elementos, como K, Mg y Ca, considerando la cassabanana, como una fuente potencial de minerales. Los colores de la corteza varían del rojo anaranjado a púrpura oscuro, mientras que la pulpa abarca colores cercanos al amarillo verdoso (Vignoni *et al.* 2006) (Tabla 1).

**Luffa:** La luffa, se caracterizó por su forma alargada, representado por un valor de esfericidad alejado a la unidad. El 65 % en peso del fruto equivale a corteza y semilla. Es de resaltar que la utilización de este fruto es casi nula, por lo que se suele desechar completamente. Por ello, el propósito de evaluar esta curcubitácea es dar a conocer la composición y la posible utilización de esta fruta, en la obtención de extractos útiles en la industria alimentaria. La luffa presentó un alto contenido de humedad, similar a lo reportado en diferentes tipos de luffa (Kandoliya *et al.* 2016). La pulpa presentó mayor valor de SST, menor pH y AT que la corteza y la semilla, presentando, esta última, mayor contenido de cenizas.

El índice de color (IC) en pulpa de luffa fue más cercano al verde amarillento, con una mayor intensidad de color (croma), mientras que el IC de la corteza fue próximo al verde profundo (Vignoni *et al.* 2006).

En las tres cucurbitáceas, se encontró que los SST fueron mayores en la pulpa que en la corteza, debido a cambios composicionales, como la conversión de almidón a azúcar y cambios en los ácidos orgánicos, ocasionados durante la precosecha y postcosecha de la fruta.

**Análisis sensorial.** La prueba sensorial fue dirigida a medir la percepción total de agrado del producto por parte de los 60 consumidores o catadores (GTC, 293, 2018). Se utilizó una escala hedónica de 1 a 7, donde, 1 = me disgusta mucho; 2 = me disgusta moderadamente; 3 = Me disgusta un poco; 4 = ni me gusta ni me disgusta; 5 = me gusta poco; 6 = me gusta moderadamente; 7 = me gusta mucho. Tomando como límite del consumo en la escala hedónica la calificación de 4 = ni me gusta ni me disgusta.

Tanto la sandía como la cassabanana presentaron buena aceptación sensorial en los atributos evaluados, que estuvieron por encima de 5, siendo los de mayor valor la textura y la apariencia para la sandía, así como el aroma, para la cassabanana (todas estas características

Tabla 2. Aumento porcentual en el contenido de compuestos de interés en muestras liofilizadas con respecto a muestras frescas por tipo de extracción.

		DPPH (%)	FRAP (%)	Vitamina C (%)	Polifenoles (%)
<b>Extracción convencional</b>					
<b>Sandía</b>	Pulpa	98	10	759	183
	Corteza	134	75	100	1749
<b>Luffa</b>	Pulpa	145	184*	480	100
	Corteza	35*	82	28	53*
	Semilla	189	44**	219*	6**
<b>Cassabanana</b>	Pulpa	34	50*	100	4
	Corteza	7	6	38*	9
	Semilla	40*	55*	24	11
<b>Extracción asistida por ultrasonido</b>					
<b>Sandía</b>	Pulpa	13*	12	97	887
	Corteza	114	125	1418	100
<b>Luffa</b>	Pulpa	34	12**	0.01	100
	Corteza	8**	27	16	967
	Semilla	68	30	45	1140
<b>Cassabanana</b>	Pulpa	51	23	18	789
	Corteza	1	11*	31**	824
	Semilla	20	37	444**	1662

\*Indica mejores resultados usando el pretratamiento en fresco.

\*\*No hay diferencia significativa entre los pretratamientos.

con un valor de  $7 \pm 2$ ). La cassabanana es una fruta de baja popularidad y, por lo tanto, su consumo es inusual; por ello, es importante dar a conocer su composición y sus propiedades, para aumentar su ingesta. Adicionalmente, el sabor de ambas frutas tuvo una evaluación de  $6 \pm 2$ .

**Efecto de la liofilización en la extracción de compuestos bioactivos.** La tabla 2 muestra el aumento porcentual en el contenido de compuestos de interés en muestras liofilizadas con respecto a muestras frescas, por tipo de extracción. Se realizaron muestras frescas con ultrasonido y se determinó antioxidantes, polifenoles y vitamina C; estos resultados, se compararon con muestras liofilizadas con ultrasonido y se determinó el aumento porcentual, en los valores de los compuestos bioactivos. De igual manera, se realizó con muestras frescas con tratamiento convencional y se comparó con las muestras liofilizadas con el tratamiento convencional.

Como se presenta en la tabla 2, la liofilización mejoró la obtención de los compuestos con potencial bioactivo en casi todas las partes, bajo extracción convencional y EAU. Tal aumento, se atribuye a la formación de poros en la matriz vegetal durante la liofilización, lo que permitió una mayor difusión de los solutos de interés; este efecto de la liofilización en la extracción de compuestos ya había sido documentado por Unterlander *et al.* (2017), en la extracción de proteínas solubles y enzimas a partir de microalgas.

Adicionalmente, la liofilización actúa mediante sublimación, utilizando vacío a bajas temperaturas, lo cual, reduce la pérdida

de compuestos volátiles o termosensibles, conservando su funcionalidad biológica y concentrando los compuestos de interés. Por consiguiente, se recomienda el uso de la liofilización en las muestras de sandía, luffa y cassabanana, como tratamiento previo a la extracción de compuestos bioactivos.

**Cuantificación de compuestos bioactivos en muestras liofilizadas mediante extracción convencional y EAU.** En general, las cuantificaciones realizadas no mostraron una tendencia clara frente al tipo de extracción. Por un lado, el 31,2 % de los resultados evidenciaron mejoras en la obtención de compuestos de interés, a través de la extracción convencional, mientras que el 34,4 %, respaldan el uso de EAU. Adicionalmente, el 34,4 % de los resultados no evidenciaron cambios significativos en la concentración, según el tipo de extracción; tales discrepancias pueden estar influenciadas por la naturaleza de los tejidos (Mandal *et al.* 2015) y del compuesto a extraer.

En el caso de la EAU, el uso de ultrasonido altera propiedades fisicoquímicas, como los SST y el pH (Porras *et al.* 2011), que se refleja en las cuantificaciones realizadas, puesto que no en todos los casos este tipo de extracción resulta favorable, tal como lo demuestra Flores (2017), en su investigación, donde la extracción convencional tuvo mejores resultados en antioxidantes, a partir de bayas de sauco. Por otra parte, las condiciones de extracción, como frecuencia, amplitud, pH, temperatura y tiempo de ciclo, pueden cambiar según el tipo de tejido y analito a evaluar (Campo-Vera *et al.* 2018), lo que, en este estudio, favorece la extracción de algunos compuestos y la degradación de otros.

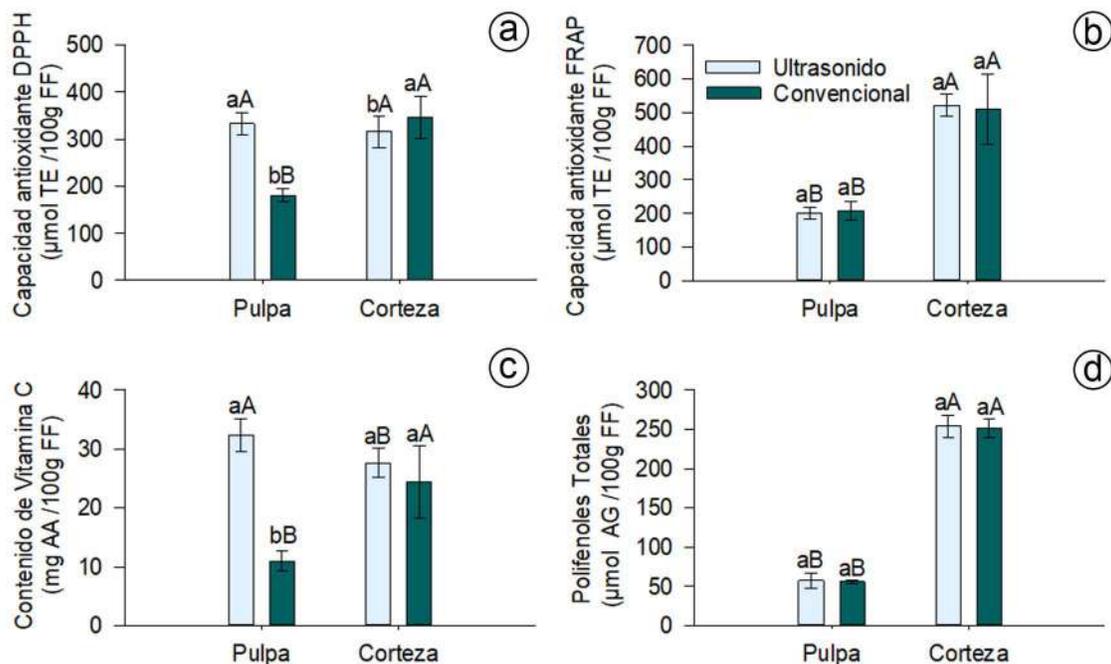


Figura 1. Cuantificación de compuestos bioactivos en las diferentes partes de sandía vanessa. a) Capacidad antioxidante método DPPH; b) Capacidad antioxidante método FRAP; c) Contenido de vitamina C; d) Polifenoles totales. Letras minúsculas comparan dentro de la misma parte las extracciones convencional y ultrasonido. Letras mayúsculas comparan entre las diferentes partes de una fruta un mismo tipo de extracción. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas y letras distintas indican diferencias significativas entre las comparaciones, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Con respecto a las partes de cada fruto, el 50 % de las comparaciones demuestran que la corteza es la fracción con mayor cantidad de compuestos con potencial bioactivo, seguido por la semilla, con un 25 %. Por lo cual, los residuos de sandía, luffa y cassabanana pueden ser aprovechados para la generación de productos con valor agregado. Los resultados para cada fruta en específico, se presentan a continuación.

**Sandía Vanessa:** La capacidad antioxidante medida por el método DPPH evidenció que el uso de la EAU mejora la obtención de compuestos en la pulpa (Figura 1a); este valor es superior a lo reportado por Valle-Vargas *et al.* (2020), para pulpa de sandía variedad Crimson Sweet. Por otra parte, en la corteza, la extracción convencional tuvo un mejor comportamiento, mostrando resultados similares a los registrados para corteza de sandía Crimson sweet, Jubilee y Santa Amelia (Valle-Vargas *et al.* 2020).

El tipo de extracción no afectó la capacidad antioxidante, determinada por el ensayo FRAP (Figura 1b); sin embargo, en esta prueba, la corteza presentó una concentración mayor comparada con la pulpa. Los valores obtenidos en la pulpa son similares a lo reportado en pomelo y mayor a lo reportado en guatila (Ruiz-Torralba *et al.* 2018).

Aunque las pruebas antes mencionadas miden capacidad antioxidante, ambas presentaron comportamientos distintos, ya que actúan con diferentes mecanismos de reacción; el ensayo FRAP, se basa en la reducción de  $Fe^{+3}$  a  $Fe^{+2}$ , en condiciones ácidas (Benzie & Strain, 1996), mientras que DPPH, se basa en la aceptación de

hidrógenos (reducción de DPPH a  $DPPH^{\cdot-}$ ) (Brand-Williams *et al.* 1995). Además, cabe resaltar que los rendimientos y la velocidad de reacción varían dependiendo de los compuestos antioxidantes y su relación muestra/reactivo (Fatiha & Abdelkader, 2019). Por consiguiente, es posible que los compuestos extraídos en la pulpa de sandía por medio de EAU sean de mayor detección en el ensayo DPPH que en el FRAP.

La concentración de vitamina C en las partes de sandía, se vio afectada por el tipo de extracción, siendo la EAU la que reportó los mejores resultados. Por otro lado, la pulpa fue la parte con mayor contenido de vitamina C, superando lo registrado por la USDA, para esta fruta (USDA, 2020) (Figura 1c).

Conforme a las figuras 1b y 1d, la cuantificación de polifenoles totales tuvo un comportamiento similar al método de FRAP: no se encontraron diferencias significativas entre el tipo de extracción para ninguna de las partes y la corteza, se destacó como la parte con mayor contenido de compuestos bioactivos.

En la prueba de polifenoles, los valores obtenidos en la corteza son superiores a lo reportado por Valle-Vargas *et al.* (2020), para corteza variedad Santa Amelia, mientras que los resultados de pulpa de esta variedad, se asemejan a la pulpa de sandía del presente estudio.

**Luffa cylindrica:** Como se observa en la figura 2a, la extracción convencional favorece la obtención de compuestos con capacidad antioxidante, medidos por ensayo DPPH. En esta prueba, la pulpa y la corteza presentaron mayores concentraciones, siendo estos

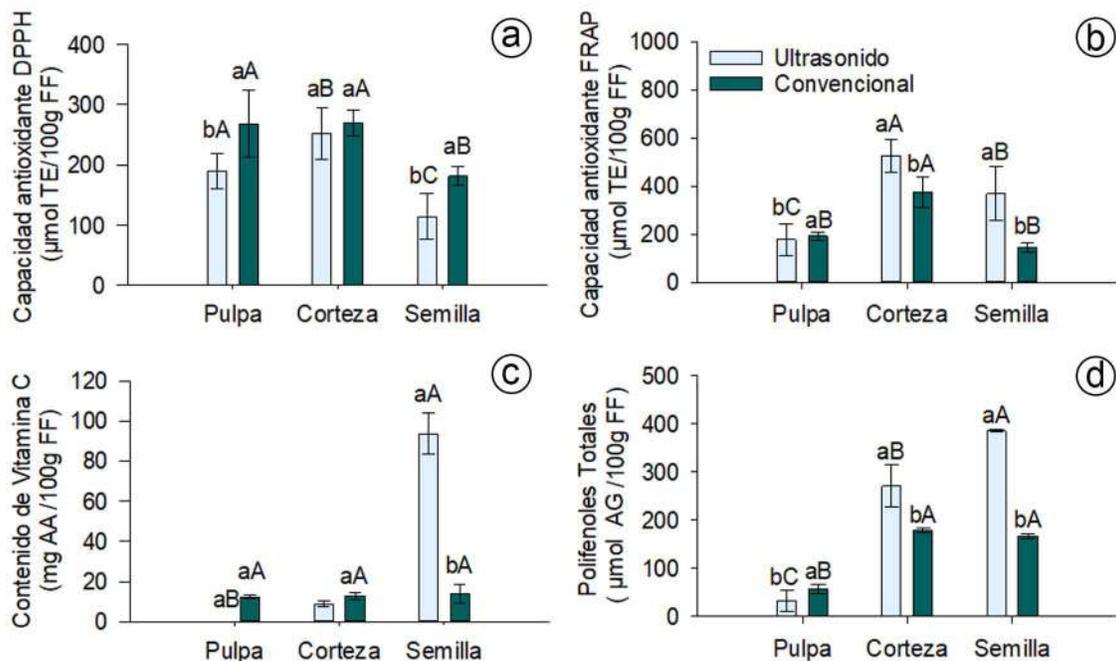


Figura 2. Cuantificación de compuestos bioactivos en las diferentes partes de luffa. a) Capacidad antioxidante método DPPH; b) Capacidad antioxidante método FRAP; c) Contenido de vitamina C; d) Polifenoles totales. Letras minúsculas comparan dentro de la misma parte las extracciones convencional y ultrasonido. Letras mayúsculas comparan entre las diferentes partes de una fruta un mismo tipo de extracción. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas y letras distintas indican diferencias significativas entre las comparaciones, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

valores superiores a lo reportado por Ruiz-Torralba *et al.* (2018), para cereza y papaya. Por el contrario, para el ensayo de FRAP, el uso de la EAU expresó un mejor comportamiento (Figura 2b), en la corteza y la semilla de luffa. Tales diferencias entre cuantificaciones de capacidad antioxidante, se pueden explicar por los diversos mecanismos de reacción en cada uno de los ensayos.

Como se observa en la figura 2c, solo la semilla de luffa presentó diferencias significativas en el contenido de vitamina C con respecto al tipo de extracción; tal resultado fue mayor a lo reportado por Kandoliya *et al.* (2016), para la pulpa de *Luffa acutangula* cv. Pusa Nasdar.

Como se aprecia en la figura 2 d, hay una mayor obtención de polifenoles totales en corteza y en semilla de luffa con la utilización de la EAU (comportamiento similar al evidenciado para capacidad antioxidante por método FRAP); por el contrario, la pulpa de luffa presentó mejores resultados con extracción convencional. El contenido de polifenoles totales fue mayor para la semilla; sin embargo, los datos obtenidos para esta son menores a lo reportado por Mishra *et al.* (2018), en semilla de *Luffa cylindrica*.

**Cassabanana:** La capacidad antioxidante, medida por los ensayos DPPH y FRAP (Figura 3a y 3b), evidenciaron que el uso de la EAU mejoró la obtención de compuestos en la semilla; además, la corteza fue la parte que presentó mayor capacidad antioxidante. La extracción convencional presentó un mejor comportamiento conforme al ensayo FRAP, donde los resultados fueron inferiores a los encontrados para mora y arándano (Ruiz-Torralba *et al.* 2018).

Por otro lado, los resultados para este fruto superaron lo determinado para otras cucurbitáceas, como el melón Cantaloup, en el ensayo DPPH (Ruiz-Torralba *et al.* 2018).

La extracción convencional favoreció el contenido de vitamina C en pulpa y en semilla de cassabanana (Figura 3c), siendo la semilla la parte, con mayor contenido de AA. Los resultados en pulpa son mayores a los reportados por De Paula Filho *et al.* (2015), para la *Sicana odorifera*.

De manera similar a lo expuesto por el ensayo FRAP (Figura 3b), el contenido de polifenoles totales (Figura 3d) evidenció una mejora en la semilla, mediante la EAU, mientras que la corteza (la parte con mayor contenido de polifenoles totales) tuvo un mejor resultado, bajo extracción convencional. Contreras-Calderón *et al.* (2011) reportaron para la corteza, la semilla y la pulpa de cassabanana valores inferiores a los del presente estudio; esta diferencia, se atribuye al estado de madurez del fruto. En cuanto al contenido de polifenoles totales en corteza, Ordoñez *et al.* (2019) también mencionan haber encontrado mayores concentraciones de sustancias químicas en la corteza de frutas, como cacao, tuna, uva y uvilla.

Al comparar los tres materiales estudiados, se evidenció que la pulpa de sandía vanessa tiene mayor capacidad antioxidante (DPPH) que la Luffa y la cassabanana, con valores de  $332,82 \pm 23,08 \mu\text{mol TE}/100 \text{g FF}$ . Estos datos demuestran la importancia del consumo de pulpa de sandía, como fuente antioxidante.

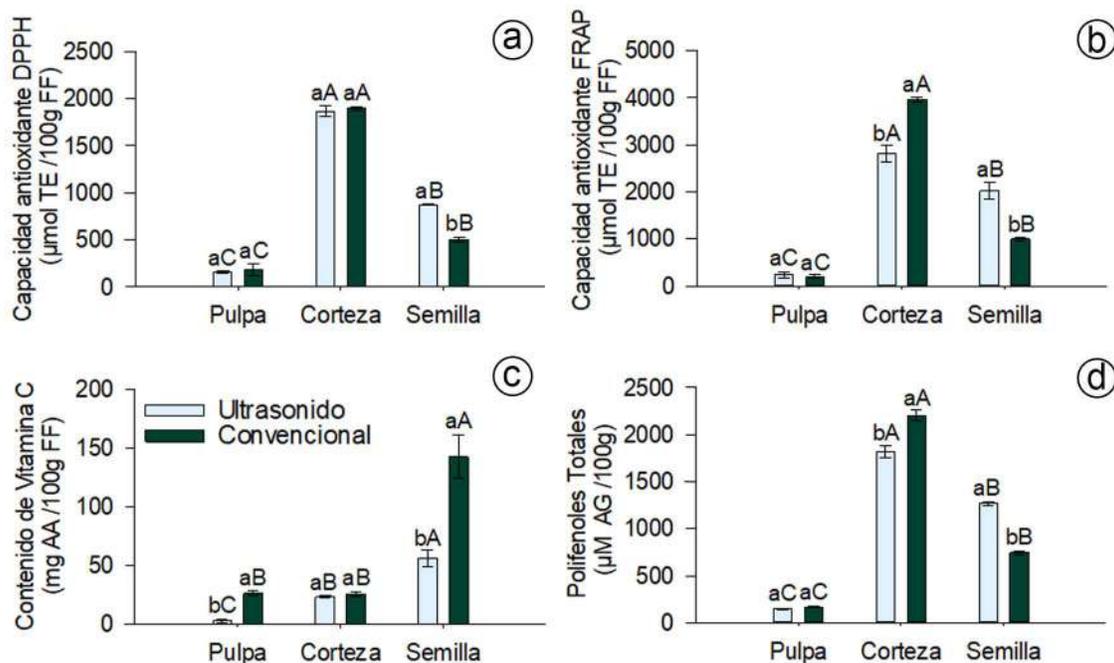


Figura 3. Cuantificación de compuestos bioactivos en las diferentes partes de cassabanana. A) Capacidad antioxidante método DPPH; B) Capacidad antioxidante método FRAP. C. Contenido de vitamina C; D) Polifenoles totales. Letras minúsculas comparan dentro de la misma parte las extracciones convencional y ultrasonido. Letras mayúsculas comparan entre las diferentes partes de una fruta un mismo tipo de extracción. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas y letras distintas indican diferencias significativas entre las comparaciones, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Mientras que en la corteza la cassabanana aporta mayor valor de antioxidantes (DPPH), con  $1866,95 \pm 18,25$   $\mu\text{mol TE}/100$  g FF, sin presentar diferencias significativas entre el tratamiento con ultrasonido y el convencional; también presentó mayor valor con el método FRAP ( $3964,98 \pm 45,66$   $\mu\text{mol TE}/100$  g FF). En cuanto a las semillas, la cassabanana igualmente presentó un alto contenido de antioxidantes por el método DPPH ( $873,05 \pm 7,24$   $\mu\text{mol TE}/100$  g FF) y FRAP ( $2023,29 \pm 168,81$   $\mu\text{mol TE}/100$  g FF). Además de ello, la cassabanana aportó el mayor contenido de polifenoles ( $169,59 \pm 9,97$   $\mu\text{mol AG}/100$  g FF) que las demás cucurbitáceas estudiadas, como la Luffa y la sandía vanessa. Esto demuestra que el consumo de cassabanana puede tener beneficios en la salud de los consumidores, debido a que los polifenoles también son antioxidantes, atrapan los radicales libres, evitando que se adhieran a las moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) y las dañen.

Este estudio permitió caracterizar cucurbitáceas, como la sandía variedad vanessa, la luffa y la cassabana, de las cuales, no se tenía información disponible en cuanto a su valor nutricional, como antioxidantes, polifenoles y vitamina C. Se concluye que la pulpa de sandía es fuente de antioxidantes y la cassabanana fuente de polifenoles a la dieta. Además, tanto las semillas como la corteza de la cassabanana son una fuente importante de antioxidantes y polifenoles, lo cual, se podría utilizar como extractos bioactivos en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. El tratamiento de liofilización mejoró la extracción % en capacidad antioxidante, vitamina C y polifenoles totales, comparado con las muestras frescas.

**Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

## REFERENCIAS

1. AINSWORTH, E.A.; GILLESPIE, K.M. 2007. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using folin-ciocalteu reagent. *Nature protocols*. 2(4):875-877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
2. BAŞLAR, M.; ERTUGAY, M.F. 2013. The effect of ultrasound and photosonication treatment on polyphenoloxidase (PPO) activity, total phenolic component and colour of apple juice. *Internal Journal of Food Science and Technology*. 48(4):886-892. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12015>
3. BENZIE, I.F.F.; STRAIN, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": the FRAP. *Analytical Biochemistry*. 239(1):70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
4. BERNAL DE RAMÍREZ, I. 1998. Frutas y hortalizas y sus productos. En: *Análisis de alimentos* (3rd ed.). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Bogotá). p.69-124.
5. BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M.E.; BERSET, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28(1):25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
6. CAMPO-VERA, Y.; GÉLVEZ-ORDOÑEZ, V.M.; AYALA-APONTE, A. 2018. Ultrasonido en el procesamiento (homogeneización, extracción y secado) de alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 16(1):102-113. <http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.628>
7. CONTRERAS-CALDERÓN, J.; CALDERÓN-JAIMES, L.; GUERRA-HERNÁNDEZ, E.; GARCÍA-VILLANOVA B. 2011. Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. *Food Research International*. 44(7):2047-2053. <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.003>
8. DE PAULA FILHO, G.X.; BARREIRA, T.; PINHEIRO, S.; DE MORAIS CARDOSO, L.; DUARTE, H.; PINHEIRO-SAN'ANA, H.M. 2015. "Melão croá" (*Sicana sphaerica* Vell.) and "maracujina" (*Sicana odorifera* Naud.): Chemical composition, carotenoids, vitamins and minerals in native fruits from the Brazilian Atlantic forest. *Fruits*. 70(6):341-349. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015035>
9. FATIHA, M.; ABDELKADER, T. 2019. Study of antioxidant activity of pyrimidinium betaines by DPPH radical scavenging method. *Journal Analytical & Pharmaceutical Research*. 8(2):33-36. <http://doi.org/10.15406/japlr.2019.08.00308>
10. FLORES, E. 2017. Extracción de antioxidantes de las bayas de sauco (*Sambucus nigra* L. subsp. *peruviana*) con ultrasonido, microondas, enzimas y maceración para la obtención de zumos funcionales. *Información tecnológica*. 28(1):121-132. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100012>
11. HORVITZ, S.; CHANAGUANO, D.; AROZARENA, I. 2017. Andean Blackberries (*Rubus glaucus* Benth) quality as affected by harvest maturity and storage conditions. *Scientia Horticulturae*. 226:293-301. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.002>
12. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, ICONTEC. 2018. Guía Técnica Colombiana GTC 293:2018. Análisis sensorial. Metodología. Guía general para la realización de pruebas hedónicas con consumidores en un área controlada. 49p.

13. KANDOLIYA, U.K.; MARVIYA, G.V.; BODAR, N.P.; BHADJA, N.V.; GOLAKIYA, B. 2016. Nutritional and antioxidant components of Ridge Gourd (*Luffa acutangula* L. Roxb). fruits of promising genotypes and varieties. Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences. 3(5):397-401.  
<http://doi.org/10.21276/sjavs.2016.3.5.9>
14. KRIS-ETHERTON, P.M.; LEFEVRE, M.; BEECHER, G.R.; GROSS, M.D.; KEEN, C.L.; ETHERTON, T.D. 2004. Bioactive compounds in nutrition y health research methodologies for establishing biological function: The antioxidant y anti-inflammatory effects of flavonoids on atherosclerosis. Annual Review of Nutrition. 24:511-538.  
<http://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073237>
15. LEDESMA-ESCOBAR, C.A.; PRIEGO-CAPOTE, F.; LUQUE DE CASTRO, M.D. 2016. Effect of sample pretreatment on the extraction of lemon (*Citrus limon*) components. Talanta. 153:386-391.  
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.024>
16. MANDAL, S.C.; MANDAL, V.; DAS, A.K. 2015. Chapter 6-Classification of extraction methods. En: Essentials of botanical extraction. Academic Press (Londres). p.83-136.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802325-9.00006-9>
17. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MINAGRICULTURA. 2018. Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano. Disponible desde Internet en:  
<https://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx> (con acceso el 27/09/2019)
18. MISHRA, S.K.; YADAV, B.; UPADHYAY, P.; KUMAR, P.; SINGH, C.; DIXIT, J.; TIWARI, K.N. 2018. LC-ESI MS/MS profiling, antioxidant and anti epileptic activity of *Luffa cylindrica* (L.) Roem extract. Journal of Pharmacology and Toxicology. 13(1):1-18.  
<https://doi.org/10.3923/jpt.2018.1.18>
19. ORDOÑEZ, E.S.; LEON-AREVALO, A.; RIVERA-ROJAS, H.; VARGAS, E. 2019. Cuantificación de polifenoles totales y capacidad antioxidante en cáscara y semilla de cacao (*Theobroma cacao* L.), tuna (*Opuntia ficus indica* Mill), uva (*Vitis vinifera*) y uvilla (*Pourouma cecropiifolia*). Scientia Agropecuaria. 10(2):175-183.  
<https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.02>
20. OZUNA, C.; LEÓN-GALVÁN, M.F. 2017. Cucurbitaceae seed protein hydrolysates as a potential source of bioactive peptides with functional properties. BioMed Research International. 1-16.  
<https://doi.org/10.1155/2017/2121878>
21. PEÑARANDA GONZALEZ, L.V.; MONTENEGRO GÓMEZ, S.P.; GIRALDO ABAD, P.A. 2017. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. Revista de investigación agraria y ambiental. 8(2):141-150.
22. PORRAS, O.O.; GONZÁLEZ, G.; CASTELLANOS, A.; BALLESTEROS, J.; PACHECO, M. 2011. Efecto de la aplicación de ondas de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y microbiológicas de pulpa de mango (*Mangifera indica* L.) variedad común. Revista Alimentos Hoy. 20(23):53-78.
23. RUIZ-TORRALBA, A.; GUERRA-HERNÁNDEZ, E.J.; GARCÍA-VILLANOVA, B. 2018. Antioxidant capacity, polyphenol content and contribution to dietary intake of 52 fruits sold in Spain. CyTA – Journal of Food. 16(1):1131-1138.  
<https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1517828>
24. SAHIN, S.; SUMMU, S.G. 2006. Size, Shape, Volume, and Related Physical Attributes. En: Physical Properties of Foods. Ed. Springer. p.1-37.  
<https://doi.org/10.1007/0-387-30808-3>
25. SCHAFFER, A.A.; PARIS, H.S. 2016. Melons, Squashes, and Gourds. Reference Module in Food Science. 1:1-9.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.03426-0>
26. TARAZONA-DÍAZ, M.P.; AGUAYO, E. 2013. Assessment of by-products from fresh-cut products for reuse as bioactive compounds. Food Science and Technology Internal. 19(5):439-446.  
<https://doi.org/10.1177/1082013212455346>
27. TARAZONA-DÍAZ, M.P.; VIEGAS, J.; MOLDAO-MARTINS, M.; AGUAYO, E. 2011. Bioactive compounds from flesh and by-product of fresh-cut watermelon cultivars. Journal of the Science of Food and Agriculture. 91(5):805-812.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.4250>
28. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA. 2020. FoodData Central. Disponible desde Internet en: <https://fdc.nal.usda.gov/> (con acceso el 26/06/2020).
29. UNTERLANDER, N.; CHAMPAGNE, P.; PLAXTON, W.C. 2017. Lyophilization pretreatment facilitates extraction of soluble proteins and active enzymes from the oil-accumulating microalga *Chlorella vulgaris*. Algal Research. 25:439-444.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.06.010>
30. URQUIZA-MARTÍNEZ, M.V.; FENTON NAVARRO, B. 2016. Antioxidant Capacity of Food. Free Radicals and Antioxidants. 6(1):1-12.  
<http://doi.org/10.5530/fra.2016.1.1>

31. VALLE-VARGAS, M.F.; DURÁN-BARÓN, R.; QUINTERO-GAMERO, G.; VALERA, R. 2020. Caracterización fisicoquímica, químico proximal, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de pulpa y corteza de sandía (*Citrullus lanatus*). Información Tecnológica. 31(1):21-28. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100021>
32. VIGNONI, L.A.; CÉSARI, R.M.; FORTE, M.; MIRÁBILE, M.L. 2006. Determinación de índice de color en ajo picado. Información Tecnológica. 17(6):63-67. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000600011>
33. WEN, C.; ZHANG, J.; ZHANG, H.; DZAH, C.S.; ZANDILE, M.; DUAN, Y.; MA, H.; LUO, X. 2018. Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops - A review. Ultrasonics Sonochemistry. 48:538-549. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>



# Adopción de tecnología y agroempresas asociativas rurales: un análisis desde el capital social territorial

## Technology adoption and rural associative agribusiness: An analysis from territorial social capital

Carlos Julián Ramírez-Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Caldas, Departamento de Desarrollo Rural. Manizales - Caldas, Colombia; e-mail: carlosj.ramirez@ucaldas.edu.co

**Cómo citar:** Ramírez-Gómez, C.J. 2022. Adopción de tecnología y agroempresas asociativas rurales: un análisis desde el capital social territorial. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 25(2):e2219. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2219>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** marzo 1 de 2022

**Aceptado:** noviembre 24 de 2022

**Editado por:** Adriana Posada Arrubla

### RESUMEN

La asociatividad agroempresarial rural se considera una estrategia para la competitividad sectorial. Para ello, estas organizaciones deben adoptar diversas prácticas, tanto tecnológicas como no tecnológicas. En este proceso de adopción, diversos estudios han demostrado los efectos del capital social, como un conjunto de relaciones que tienen un carácter territorial localizado. El objetivo del estudio fue analizar comparativamente la adopción de tecnología en agroempresas asociativas rurales en dos municipios, desde un enfoque del capital social territorial, generado a través de las redes de confianza. Se abordaron dos agroempresas asociativas, ubicadas en los municipios rurales de Sonsón y San Vicente, en el departamento de Antioquia (Colombia), desde la cadena productiva de aguacate Hass. Se realizaron 94 entrevistas semiestructuradas con productores. La participación en eventos y la observación complementaron la información recolectada. Se calculó el índice de adopción de tecnología y se empleó el análisis de redes sociales, para estimar el capital social. La prueba de correlación de Spearman permitió analizar la adopción y las redes de confianza, a nivel territorial. Las agroempresas presentaron diferentes porcentajes de adopción y las categorías de organización y de administración presentaron los más bajos porcentajes. Solamente la agroempresa del municipio de Sonsón logró correlación estadística con las redes de confianza. Ello, destaca el rol que tienen vínculos localizados en el espacio geográfico.

**Palabras clave:** Adopción tecnológica; Agroempresa; Asociaciones rurales; Redes de confianza; Redes sociales comunitarias.

### ABSTRACT

Rural agribusiness associativity is considered a strategy for competitiveness. These organizations must adopt various practices, both technological and non-technological. In this adoption process multiple studies have demonstrated social capital effects as a set of relationships that have a localized territorial character. The purpose of the study was to comparatively analyze the adoption of technology in rural associative agribusinesses in two municipalities from a territorial social capital approach generated through trust networks. Two rural associative agribusinesses located in rural municipalities of Sonsón and San Vicente, in the Department of Antioquia (Colombia), were approached from the Hass avocado production chain. 94 semi-structured interviews with producers were conducted. Participation in events and observation complemented the information collected. The technology adoption index was calculated, and social network analysis was used to estimate social capital. Spearman's correlation test allowed to analyze adoption, and trust networks at the territorial level. The agricultural companies presented different adoption percentages and the organization and administration categories presented the lowest percentages. Only the rural agribusiness association in Sonsón municipality achieved a statistical correlation with trust networks. These highlights the role of located links in geographic space.

**Keywords:** Agrobusiness; Community social Networks; Rural associations; Technological adoption; Trusted networks.

## INTRODUCCIÓN

La internacionalización de las economías de América Latina viene generando mayores retos para el sector agropecuario Colombiano. Uno de los principales desafíos del sector tiene relación con el fomento de agroempresas asociativas rurales, permitiendo movilizar las capacidades desde los territorios, en las cuales, estas organizaciones están insertas (OCDE, 2014). La asociatividad agroempresarial rural, se puede definir como un proceso de trabajo colectivo de los productores organizados, en busca de objetivos comunes, definidos de manera conjunta, a partir del desarrollo de principios y de valores, como confianza, compromiso, participación, liderazgo y comunicación (Amézaga *et al.* 2013), para la obtención de resultados que, de forma individual, son más difíciles de alcanzar, en aspectos productivos, organizativos y comerciales, haciendo un uso más eficiente de los recursos naturales, humanos, sociales, físicos y financieros disponibles (Ilabaca Ugarte *et al.* 2011).

La asociatividad agroempresarial rural, como un modelo que busca impulsar la actividad económica de los productores, también depende de la adopción de diversas prácticas asociativas, tanto tecnológicas como no tecnológicas, que permitan mejorar la productividad, la gestión socio-organizativa y empresarial, desarrollando capacidades de las organizaciones e impulsando la competitividad desde los territorios (Solarte Lindo, 2011; Rodríguez-Espinosa *et al.* 2018). La adopción de tecnología agrícola ha sido abordada desde diversos enfoques, dado que depende de un amplio rango de características personales, sociales, culturales, factores económicos y las características de la innovación (Pannell *et al.* 2006). También, se han asociado aspectos socio-psicológicos, como intenciones, actitudes, presión social de los productores (Martínez-García *et al.* 2016), el rol de la interacción social (Monge Pérez & Hartwich, 2008), el impacto de la comunicación interpersonal (Unay Gailhard *et al.* 2015) y los efectos de las redes sociales comunitarias (Gonzalez Gamboa *et al.* 2010).

Con relación a la presente investigación, otros estudios destacan la asociación de la adopción de tecnología con la confianza que los productores presentan hacia otras personas, en enfoques participativos de interacción (Takahashi *et al.* 2015), también llamados los efectos del capital social en la agricultura (Micheels & Nolan, 2016). El capital social es un concepto descrito con amplio rango de aplicaciones en la investigación agrícola, que puede ser definido como una matriz o red de relacionamientos sociales (Wilson, 2000). Esta noción del capital social, en el marco de la adopción de tecnología agrícola, ha venido cobrando mayor importancia, tras la búsqueda de comprender la incidencia de ciertos tipos de relacionamientos dentro la interacción territorial, entre productores y diversos actores públicos y privados, que intervienen las organizaciones; por ende, algunos abordajes plantean este tipo de análisis, desde la configuración de vínculos de redes (Clark, 2011).

Además, estas interacciones configuran un capital social que puede ser abordado desde las redes de confianza técnica (prestigio y capacidades técnicas), estratégica (obtención de beneficios mutuos o personales) y normativa (normas y valores compartidos) (Luna &

Velasco, 2005); sin embargo, existe dos aspectos que constituyen aún ciertas brechas en el conocimiento, generando oportunidades de investigación. El primero de ellos es relacionado con el análisis de la adopción de tecnología en agroempresas asociativas rurales. El segundo aspecto tiene relación con el vínculo del capital social ligado al territorio y en relación con la adopción tecnológica de las agroempresas asociativas, es decir, desde un enfoque que representa una visión territorial del capital social, a partir de contextos geográficos particulares, que permitan contribuir a comprender las dinámicas de innovación en lugares específicos (Foronda-Robles & Galindo-Pérez-de-Azpillaga, 2012).

En tal sentido, el objetivo de este estudio es analizar comparativamente la adopción de tecnología en agroempresas asociativas rurales en dos municipios, desde un enfoque del capital social territorial, abordado a través de las redes de confianza.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Marco analítico.** En esta investigación planteamos un marco analítico centrado en la interrelación de los conceptos de agroempresa asociativa rural, adopción de tecnología y capital social territorial (Figura 1). El concepto de confianza, desde la perspectiva de redes, ha sido abordado previamente con un enfoque a las organizaciones asociativas (Flores-Trejo *et al.* 2016), así como el rol de la participación de organizaciones de productores sobre la confianza (Camacho *et al.* 2012) e, incluso, el enfoque de las redes de confianza técnica, interpersonal y estratégica y sus resultados de innovación y adopción de tecnología en empresas individuales no asociativas (Vargas Canales *et al.* 2015).

En este estudio planteamos que las redes de confianza constituyen una importante contribución al capital social, cuando se identifica que las dinámicas interactivas entre productores organizados y diversos actores público-privados, tanto locales como externos, pueden tener efectos y respuestas localizadas y diferenciadas en el espacio geográfico, con relación a la adopción de tecnología y prácticas, por parte de agroempresas asociativas rurales. Por lo tanto, planteamos que la confianza estratégica es importante considerarla en el proceso territorial de la adopción de tecnología por parte de agroempresas asociativas, dado que se ha podido comprobar que las capacidades de adopción de tecnología de diversos productores se pueden ver aumentadas, así como el aceleramiento de la difusión agrícola, a partir una diversidad de incentivos, como subsidios, provisión de bienes y servicios, entre otros, en los cuales, desde luego, los productores se interesan (Monge *et al.* 2008; Robalino, 2000). Asimismo, las redes de confianza normativa son importantes porque el aprendizaje de los agricultores es un proceso principalmente social, que requiere de una comunicación entre ellos, así como con otros actores y que se ve favorecida por una comunicación interpersonal asertiva, que permita flujos de información (Unay Gailhard *et al.* 2015), a partir de vínculos que permitan fortalecer ciertas relaciones territoriales, donde se logren ciertos valores compartidos, aunque no necesariamente involucre vínculos de amistad (Vargas Canales *et al.* 2015).

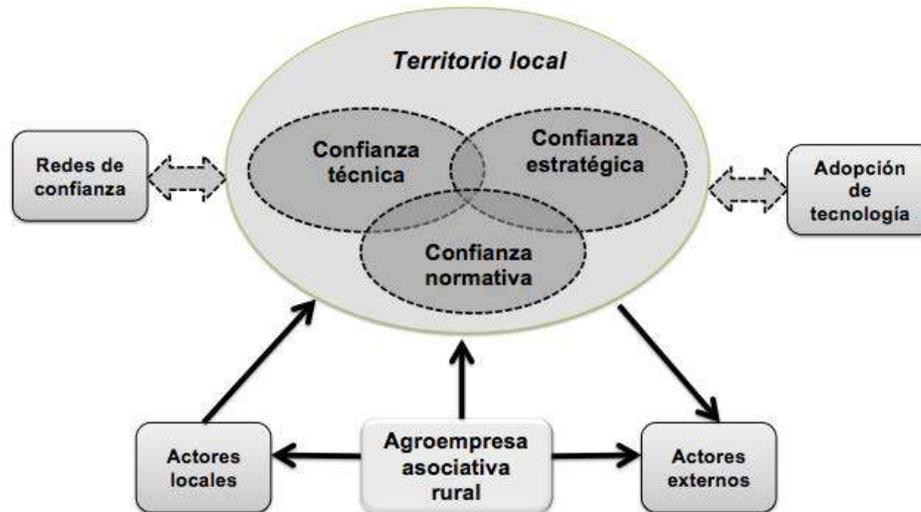


Figura 1. Esquema analítico interrelacionado.

Finalmente, desde la confianza técnica, existen estudios que asocian el nivel de reputación profesional, la credibilidad y las habilidades de los agentes de extensión, con la confianza que los productores pueden desarrollar en ellos, logrando ser influidos en las decisiones de adopción de tecnología agrícola (Takahashi *et al.* 2015). Este aspecto es importante en la perspectiva del capital social territorial, por el rol que tienen múltiples actores públicos y privados, que asesoran y difunden tecnología agrícola en los territorios rurales (Eastwood *et al.* 2017).

**Área de estudio.** Este estudio, se basó en evidencia empírica basada en el enfoque de estudio de caso (Cazau, 2006), tomando los municipios rurales de Sonsón y San Vicente, ubicados en la subregión Oriente, correspondiente al departamento de Antioquia (Colombia). Ambos territorios fueron abordados como estudios de caso, delimitados por el subsector productivo de aguacate Hass para exportación. En ambos municipios rurales, se viene generando una dinámica productiva creciente de aguacate hass, dadas las condiciones agroecológicas favorables para el cultivo. Además, en los territorios hacen presencia diferentes empresas comercializadoras internacionales, así como actores públicos y privados, que vienen desarrollando acciones de intervención, con dos asociaciones de agricultores en cada municipio, con el propósito de insertar la producción local en mercados internacionales.

**Recolección de datos.** El estudio, se realizó con 94 agricultores, quienes vienen formando parte de dos agroempresas asociativas que, desde pequeñas producciones, se encuentran en diversos procesos de capacitación desde hace un año y quienes, a partir de la intervención de diversas entidades, se han comprometido con la adopción de tecnologías y prácticas en el cultivo de aguacate variedad hass, con fines de exportación. La información fue recolectada entre febrero y abril del 2019. En el municipio de San Vicente, se abordaron 45 agricultores y en Sonsón, 49. Adicionalmente, la recolección de información fue complementada con la participación en eventos de capacitación a agricultores en cada municipio, como reuniones, escuelas de campo y días de campo. La participación, como observador,

es una manera sistemática de observar un fenómeno determinado, a medida que se lleva a cabo (Kumar, 2005). Se adelantaron entrevistas individuales, con una duración de 30 minutos. Los agricultores fueron abordados sobre los siguientes dominios: (i) adopción de tecnologías y prácticas tecnológicas en el cultivo de aguacate Hass y (ii) redes de confianza. En la sección de adopción de tecnología, se indagó con los agricultores, pertenecientes a cada organización, a partir de un listado de 37 tecnologías y prácticas tecnológicas, que fueron identificadas y validadas con tres profesionales expertos en el cultivo. Estas tecnologías fueron agrupadas en 7 categorías (Tabla 1): fertilización de cultivo, manejo fitosanitario, prácticas de conservación, prácticas culturales de manejo de cultivo, administración, organización, cosecha y postcosecha (Muñoz Rodríguez *et al.* 2007). Para cada tecnología y práctica tecnológica, se planteó la opción de respuesta bivariada (sí o no), en torno a su adopción.

El índice de adopción de tecnología (INAT), se calculó para cada productor, generando un índice agregado de la capacidad innovadora de la agroempresa asociativa, donde  $INAT_k$  corresponde al índice de adopción de tecnología en la categoría "k", la cual, se compone de un número determinado de tecnologías y prácticas; además, "K" corresponde al número de categorías que, en este caso, son siete (Muñoz Rodríguez *et al.* 2007).

$$INAT = \frac{\sum_{k=1}^K INAT_k}{K} * 100$$

Para la sección de redes de confianza, se adelantó previamente una entrevista semiestructurada, con un informante clave en cada municipio rural, perteneciente a la institucionalidad pública. Ello, permitió determinar las localidades más representativas en la producción para el abordaje de los productores. Adicionalmente, la entrevista permitió establecer para cada municipio rural un listado de actores públicos y privados, que han venido desarrollando diversas intervenciones a las agroempresas asociativas, a partir de capacitaciones, asistencia técnica, gestión de recursos, desarrollo de proyectos, fortalecimiento agroempresarial, comercialización, certificación de predios exportadores, entre otros. Para determinar

Tabla 1. Tecnologías y prácticas analizadas como adoptadas (1) y no adoptadas (0).

Categoría	Tecnologías y prácticas
<b>Nutrición vegetal</b>	1. Fertilización de suelo; 2. Fertilización foliar; 3. Análisis de suelo; 4. Análisis foliar; 5. Plan de fertilización basado en resultados
<b>Manejo Fitosanitario</b>	6. Monitoreo de plagas; 7. Control de plagas; 8. Manejo plagas cuarentenarias; 9. Monitoreo enfermedades; 10. Control de enfermedades; 11. Protocolo de manejo; 12. Control arvenses; 13. Calibración equipos de aspersión; 14. Registro de aplicaciones; 15. Trajes de protección personal; 16. Uso plaguicidas permitidos
<b>Prácticas sostenibles</b>	17. Recolección de envases y empaques; 18. Almacenamiento adecuado de productos; 19. Lugares de mezcla y lavado; 20. Manejo integrado de plagas y enfermedades; 21. Producción abonos orgánicos
<b>Manejo Agronómico</b>	22. Uso semilla certificada; 23. Podas de formación; 24. Podas mantenimiento y sanidad; 25. Resiembras de plantas; 26. Estimulación de floración
<b>Administración</b>	27. Registro de actividades de la finca; 28. Registros de producción y venta; 29. Registro de gastos e ingresos; 30. Registro de predio exportador
<b>Organización</b>	31. compras colectivas de insumos de la finca; 32. Venta colectiva asociativa; 33. Recolección asociativa del producto final
<b>Cosecha y Poscosecha</b>	34. Cosecha con base en maduración; 35. Cosecha con base en tamaño, peso y calidad; 36. Procesos de selección de finca; 37. Tratamientos poscosecha de la fruta

Tabla 2. Mecanismos para la recolección de información a partir de preguntas orientadoras.

VARIABLES DE ANÁLISIS	TIPOS DE PREGUNTAS
Red de confianza técnica	¿En cuáles de estas entidades u organizaciones usted confía por sus conocimientos y capacidades técnicas?
Red de confianza estratégica	¿Cuáles de las siguientes entidades u organizaciones a usted le genera confianza a partir de algún tipo de beneficio que ha obtenido?
Red de confianza normativa	¿Con cuál o cuáles de las siguientes entidades usted mantiene buenas relaciones interpersonales y considera que comparte sus valores, creencias y normas?
Adopción de tecnología	¿Cuáles de las siguientes 37 tecnologías y prácticas tecnológicas, usted incorpora actualmente a nivel de cultivo?

las redes de confianza, se generaron tres preguntas orientadoras diferentes para cada productor y correspondientes a la confianza técnica, estratégica y normativa (Tabla 2).

**Análisis de la información.** La información recolectada fue llevada a una base de datos y posteriormente analizada, mediante la metodología de análisis de redes sociales, empleando el software Ucinet (Borgatti *et al.* 2002). Para las redes de confianza (técnica, estratégica y normativa), se calculó el grado de centralidad de salida del agricultor, el cual, tiene que ver con el número de vínculos que envía el agricultor hacia otros actores (Freeman, 1979). Estos grados de salida corresponden a los vínculos que el productor de cada agroempresa pudo determinar en la entrevista, frente a sus redes de confianza con relación al listado de actores públicos y privados, presentes en cada territorio municipal rural. El grado de centralidad de salida en las redes de confianza de los productores

fueron posteriormente correlacionados con el INAT de cada productor, con el fin de conocer, comparativamente, la relación de asociación entre la confianza y la adopción tecnológica, a nivel de agroempresa asociativa. Para ello, se empleó la prueba estadística de correlación de Spearman, también empleada en diversos estudios, que analizan la confianza y la adopción tecnológica en la agricultura y dado que no se presume la normalidad de los datos (Camacho *et al.* 2012; Martínez-García *et al.* 2016; Sene, 2017).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Dinámica de adopción tecnológica.** El análisis de los resultados permitió identificar dinámicas diferentes para cada territorio municipal rural, tanto a nivel de adopción de tecnología en un nivel agregado y comparativo de dos agroempresas asociativas rurales, así como el capital social territorial, generado a partir de las

redes de confianza (técnica, estratégica y normativa) y sus grados de correlación estadística. Además, frente al de índice de adopción de tecnología, se evidencian diferencias en algunas categorías entre agroempresas, cuando se analizan comparativamente (Figura 2).

El menor nivel de adopción, se presentó en la categoría de organización, con promedios similares de 5 y 4 %. Frente a este aspecto, la evidencia de campo permitió corroborar falencias en la capacidad organizativa de las asociaciones, una participación relativamente escasa e inconstante de sus asociados en las reuniones

y falta de convencimiento de las ventajas de la acción colectiva. Además, estas organizaciones agroempresariales no han podido desarrollar economías de escala en la adquisición de insumos y materias primas, de manera que consigan reducir sus costos de producción. Esta baja adopción de tecnologías y prácticas, a nivel organizacional, debe ser un asunto clave de intervención, si se tiene en cuenta que se ha demostrado el efecto positivo, tanto de la membresía de los productores a este tipo de organizaciones asociativas como su funcionamiento interno, frente a la adopción de tecnología (Wossen *et al.* 2017).

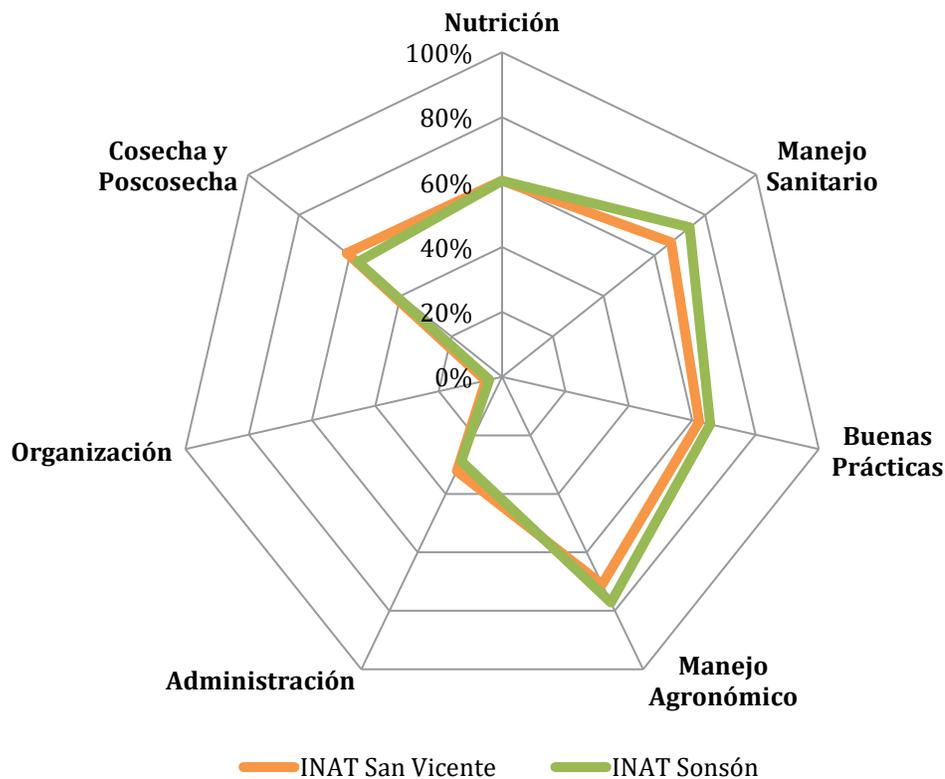


Figura 2. Índice de adopción de tecnología (INAT) en las agroempresas asociativas.

Otra categoría con menores niveles de adopción de tecnología y prácticas es la de administración, donde se alcanzaron promedios similares de 29 y 32 %, en cada municipio. Este resultado implica que diversas prácticas administrativas no están siendo incorporadas por los productores, como el manejo de registros e información de las fincas, productividades, costos, precios, entre otros procesos de trazabilidad requeridos.

Por su parte, la categoría de manejo sanitario presenta promedios diferentes entre municipios rurales, de 67 %, en San Vicente y del 74 %, en Sonsón. Dado que el aguacate variedad Hass tiene fines de exportación, en este caso, se trata de diversas tecnologías y prácticas tecnológicas, que se relacionan con el manejo fitosanitario del cultivo, para el mejoramiento de la calidad, a partir del control de plagas y de enfermedades.

Por otro lado, un ejemplo de resultado homogéneo, se presenta en la categoría de nutrición de cultivo, donde se vienen incorporando tecnologías y prácticas, tales como análisis de suelos y fertilización de cultivo, alcanzando un promedio de adopción del 60 %.

La categoría de buenas prácticas sostenibles alcanzó 65 % en la agroempresa en Sonsón y 62 %, en San Vicente. Esta categoría es de gran importancia, por cuanto incorpora una base importante de las buenas prácticas agrícolas, en las cuales, las fincas productivas deben avanzar hacia su certificación para consolidarse con perfil exportador.

La categoría de manejo agronómico presenta promedios de adopción diferentes, siendo mayor en la agroempresa asociativa del municipio de Sonsón, con 77 %. Esta categoría relaciona tecnologías y prácticas, como: manejo específico de cultivos para mejorar la producción,

estimulación de la floración, podas de los árboles y otras. Es la categoría con mayor nivel de adopción tecnológica alcanzada; sin embargo, uno de los mayores retos implica la adopción de semilla certificada, en cuyo caso, la trazabilidad de este proceso es vital, para adecuar la producción al perfil exportador.

Finalmente, la categoría de cosecha y de poscosecha es de gran importancia, con fines de exportación, pues se debe procurar mantener la calidad del producto que se distribuye a las empresas comercializadoras presentes en el territorio. De esta manera, la recolección, la clasificación, la selección y la preservación del aguacate, a nivel de finca, constituyen tecnologías y prácticas determinantes. Esta categoría alcanzó un índice de adopción del 61 %, en San Vicente y del 56,7 %, en Sonsón, lo que implica que aún se requiere de amplia incorporación tecnológica por parte de

los productores que pertenecen a las agroempresas asociativas, para efectos de alcanzar estándares internacionales.

**Descripción de las redes de confianza: capital social territorial.**

El estudio, también determinó que ambas organizaciones agroempresariales rurales vienen siendo intervenidas por diversos actores públicos y privados (Tabla 3). El listado de los actores, se organizó a partir de las entrevistas y sobre un enfoque de actores, bajo los componentes de empresa, soporte, intermediario, educación y otros referidos por los productores de las agroempresas (Rajalahti *et al.* 2008). Acorde con la tabla 3, los actores que intervienen las agroempresas asociativas varían en cada municipio rural, tanto dentro de cada componente como también en número. Después los productores entrevistados refirieron diferentes vínculos de confianza con los actores del listado.

Tabla 3. Listado de actores que intervienen las agroempresas asociativas territoriales.

Componentes de la cadena	Actores en el municipio de San Vicente	Actores en el municipio de Sonsón
	Actores públicos y privados	Actores públicos y privados
Empresas	CI Green West	Hass Colombia
		CI Green West
	Agroempresa asociativa	CI. WestSole
		Cartama
	Proveedores de insumos	Agroempresa asociativa
Soporte	Ministerio Agricultura	Gobernación
	Secretaría de Agricultura Local	Secretaría de Agricultura Local
Intermediario	Ceam	
	Corpohass	Campo Limpio
	Campo Limpio	Corpoaguacate
	Asohofrucol	Asohofrucol
	Coredi	ICA
	ICA	
Educación	Sena	Agrosavia
		Sena
Referidos	Asistente técnico	Asistente técnico
	Otros productores locales	Otros productores locales
	Otras entidades referidas	

Estas redes de confianza, como estructuras relacionales localizadas, han incidido de manera diferente en los procesos de adopción agrícola en los agricultores que conforman las dos agroempresas asociativas de ambos municipios abordados, como estudios de caso comparativos. Tras analizar, mediante las redes, el grado de centralidad de salida de los productores organizados, es decir, el

vínculo saliente de confianza técnica, estratégica y normativa, en un marco agregado para cada agroempresa asociativa rural, se evidencian diferentes grados de correlación con el índice de adopción de tecnología, al comparar las organizaciones en cada municipio rural (Tabla 4).

Tabla 4. Correlación entre las redes de confianza (técnica, estratégica, normativa) y el índice de adopción de tecnología de las agroempresas asociativas.

Territorios municipales rurales		
Redes de confianza	Municipio de San Vicente	Municipio de Sonsón
	INAT	INAT
Confianza técnica	0,103	0,409**
Confianza estratégica	0,064	0,531**
Confianza normativa	0,055	0,382**

\* Correlación es significativa al 0,05; \*\* Correlación es significativa al 0,01.

La agroempresa asociativa ubicada en el municipio de Sonsón logró correlaciones significativas con la adopción de tecnología (Tabla 4). En el territorio municipal de Sonsón, los agricultores han generado redes de confianza técnica, a partir de vínculos relacionados con la percepción positiva frente a las capacidades técnicas y de conocimiento, hacia diversos actores de la cadena. El desarrollo de diversos días de campo en este municipio rural, con presencia de varios actores, algunos de ellos referenciados en la tabla 3, han permitido mayor identificación de sus capacidades, así como de mayor interacción de los productores con ciertas entidades, generando mayor receptividad hacia recomendaciones y sugerencias técnicas. De esta manera, cuando los actores que intervienen las organizaciones combinan buenas capacidades técnicas de enseñanza y dinámicas inclusivas grupales, que podrían ser percibidas positivamente por los productores, favoreciendo los vínculos de confianza. De hecho, la confianza ha sido considerada como un prerrequisito básico para la aceptación y la adopción de innovaciones y tecnologías, promovidas por diversos actores (Monge *et al.* 2008). Por su parte, la generación de vínculos de confianza estratégica y su asociación con la adopción de tecnología en esta agroempresa, implica una confianza desde diversos tipos de prebendas, de las cuales, los productores se han beneficiado en apoyos, en el otorgamiento de créditos, en la certificación de las fincas para exportación, en la proveeduría de insumos diversos, en la asistencia técnica y acompañamiento directo a nivel de finca y otros tipos de asesoramientos y de servicios; ello implica, que el otorgamiento de recursos, de una manera asertiva y estratégica, puede lograr incidencias, a nivel del cambio tecnológico de los productores y debe ser tenido en cuenta.

Además, un conjunto de valores, como la buena atención, la cordialidad o la credibilidad y la honestidad, respecto al cumplimiento de pago del agricultor, a partir de acuerdos verbales con proveedores de insumos agrícolas, constituyen aspectos que han permitido la generación de redes de confianza normativa, en torno a ciertos valores y construcción de normas, que constituyen este territorio rural. Con relación a este tema, algunos autores, como Giampietri *et al.* (2020), se han referido específicamente a un entorno de confianza percibida y sus efectos en las intenciones de adoptar por el productor. En el municipio de Sonsón hace presencia un mayor número de empresas comercializadoras exportadoras, de las cuales, los productores no tienen percepciones negativas relacionadas con los negocios de compra y de pago del producto. Asimismo, en este municipio hace presencia un mayor

número de actores del componente de educación, que efectúan procesos de capacitación y de transferencia, gozando de un buen reconocimiento personal por parte de productores.

Por ende, acorde con los resultados presentados en la tabla 4, se puede inferir que los agricultores de la agroempresa asociativa rural en el municipio de Sonsón, han logrado capitalizar los vínculos de los diversos tipos de confianza en sus propios resultados de adopción de tecnología, en el marco comparativo, entre territorios municipales rurales. Por su parte, aunque en el municipio de San Vicente hacen presencia diversos actores públicos y privados que, de alguna manera intervienen la agroempresa asociativa rural, los vínculos de redes de confianza de sus productores no se logran asociar con el proceso de adopción de tecnología, a nivel de la agroempresa. En la evidencia de campo, se pudo establecer que en el territorio existen antecedentes percibidos desfavorablemente por parte de los productores, tales como el incumplimiento en pactos y fechas de pago, por parte de ciertas empresas comercializadoras exportadoras.

En concordancia con las teorías del capital social y de las dinámicas de relacionamientos, se confirma el efecto positivo que tienen las redes de confianza técnica, estratégica y normativa en la adopción de diversos componentes tecnológicos en una de las agroempresas asociativas rurales; esto concuerda, con la noción conceptual, según la cual, la adopción de tecnología agrícola se debe analizar desde una visión descentralizada y enmarcada en contextos específicos que varían, a través del espacio geográfico (Pamuk *et al.* 2014). Además, en la evidencia de campo, se puede interpretar que los métodos de enseñanza empleados por algunos actores en el territorio, frente a esquemas de capacitación y de extensión rural de tipo lineal y poco interactivo, no generan una satisfacción propiamente de parte de los productores, lo cual, podría estar afectando los vínculos de confianza técnica. Por lo tanto, este análisis implica la importancia de la construcción de modelos de extensión rural con enfoques apropiados a las realidades locales específicas (Rodríguez-Espinosa *et al.* 2016).

Pese a la existencia de algunos incentivos, como posibilidad de certificación de sus predios exportadores sin costo, acceso a capacitaciones, asistencia técnica directa en la finca por parte de empresas comercializadoras, alguna proveeduría de insumos, entre otros, los productores no han logrado capitalizar los vínculos de confianza estratégica en sus resultados de adopción tecnológica

agregada, a nivel de la agroempresa asociativa. En este territorio municipal, los productores pertenecientes a la agroempresa asociativa rural puedan estar llegando al proceso de adopción de tecnología, probablemente, a través de otro tipo de mecanismos, donde, incluso, se pueden considerar otros canales más informales o indirectos de difusión, en los cuales, puedan confiar más. Ello implica, que pueden buscar resaltarse el rol de otros actores público-privados para buscar desarrollar o fortalecer capacidades de los productores, desde una perspectiva local (Ramírez-Gómez & Rodríguez-Espinosa, 2021).

En este municipio, los productores de esta agroempresa asociativa, resaltan por sus relaciones de vecindad micro localizada, donde configuran algunas relaciones de cooperación con sus pares. Esto significa también, una limitante de este estudio y una oportunidad para profundizar en las redes de confianza específicas entre grupos de productores y redes localizadas, buscando determinar desde qué canales y actores cierta información podría ser transferida en el marco de cada territorio, logrando incentivar mejor el aprendizaje del productor (Buck & Alwang, 2011).

Esta investigación pudo determinar que existe un capital social territorial en cada municipio rural y los resultados de esta investigación permitieron validar una hipótesis general planteada, según la cual, el capital social territorial cuenta con redes de confianza generadas específicamente en cada lugar, incidiendo, de manera particular y diferenciada, en la adopción tecnológica, tanto en productores como en las agroempresas asociativas que conforman. Esta hipótesis inicial del estudio pudo ser validada y concuerda con las tendencias que buscan explicar la incidencia del espacio geográfico en la cuestión de la adopción (Mozzato *et al.* 2018).

Esto concuerda con la noción conceptual, según la cual, la adopción de tecnología agrícola se debe analizar desde una visión descentralizada y enmarcada en contextos específicos que varían, a través del espacio geográfico (Pamuk *et al.* 2014). Además, los resultados guardan relación con la importancia que tiene la confianza, al ser considerada por autores como un prerrequisito básico para la aceptación de innovaciones, promovidas por diversos actores (Monge *et al.* 2008), así como frente a las decisiones de adoptar, según lo referencian algunos autores como Hunecke *et al.* (2017).

El enfoque de la confianza ha sido abordado en otros trabajos en el marco de organizaciones asociativas (Flores-Trejo *et al.* 2016), el rol de la confianza y las normas en organizaciones de productores lecheros (Camacho *et al.* 2012) y en una perspectiva del capital social, a través de redes sociales (Zarazúa-Escobar *et al.* 2011). Adicionalmente, otros estudios abordaron el enfoque de las redes de confianza técnica, interpersonal y estratégica y sus resultados de innovación y adopción de tecnología, en empresas individuales no asociativas (Vargas Canales *et al.* 2015), así como las redes de confianza, que inciden en la articulación de la asociatividad rural (Vázquez-Valencia & Aguilar-Benítez, 2010).

A diferencia de diversos trabajos reportados en la literatura, la presente investigación representa una contribución en torno

al rol de la asociatividad agroempresarial rural, como un actor determinante para la competitividad del sector agropecuario (Rodríguez-Espinosa *et al.* 2018) y en el marco de las redes de confianza técnica, estratégica y normativa, a partir de un capital social, que cuenta con una dinámica territorial.

Desde la perspectiva de confianza técnica existen estudios que asocian el nivel de reputación profesional, la credibilidad y las habilidades de los agentes de extensión, con la confianza que los productores pueden desarrollar en ellos, logrando ser influidos en las decisiones de adopción de tecnología agrícola (Takahashi *et al.* 2015). Este aspecto es importante en la perspectiva del capital social territorial por el rol que tienen múltiples actores públicos y privados, que asesoran y difunden tecnología agrícola en los territorios rurales (Eastwood *et al.* 2017). Por su parte, la confianza estratégica es importante considerarla en el proceso territorial de la adopción de tecnología por parte de agroempresas asociativas, dado que se ha podido comprobar que las capacidades de adopción de tecnología de diversos productores se pueden ver aumentadas, así como el aceleramiento de la difusión agrícola, a partir una diversidad de incentivos, como subsidios, provisión de bienes y servicios, entre otros, en los cuales, desde luego, los productores se interesan (Robalino, 2000; Monge *et al.* 2008). Asimismo, las redes de confianza normativa son importantes porque el aprendizaje de los agricultores es un proceso principalmente social, que requiere de una comunicación entre ellos, así como con otros actores y que se ve favorecida por una comunicación interpersonal asertiva, que permita flujos de información (Unay Gailhard *et al.* 2015), a partir de vínculos que permitan fortalecer ciertas relaciones territoriales, donde se logren ciertos valores compartidos, aunque no necesariamente involucre vínculos de amistad (Vázquez-Valencia & Aguilar-Benítez, 2010).

A partir de esta discusión, queda en evidencia que las acciones tendientes a intervenir y fortalecer las organizaciones asociativas en los territorios rurales deben tener en cuenta la existencia de diferentes vínculos de confianza, que los productores generan hacia los actores públicos y privados y, los cuales, pueden repercutir en el proceso de adopción tecnológica de los productores y de las agroempresas que conforman. Además, dada la existencia de un capital social territorial para cada municipio rural, los diversos vínculos existentes bien se podrían consolidar o revertir, de manera favorable, estableciendo estrategias de intervención, acorde con las realidades y con las dinámicas particulares del lugar y donde se busquen mejores acciones colaborativas entre los diferentes actores, para mejorar la extensión rural (Rodríguez-Espinosa *et al.* 2016).

Esta investigación abordó el estudio de la adopción de tecnología en la agroempresa asociativa rural, desde un enfoque del capital social territorial, analizado a partir de las redes de confianza técnica, estratégica y normativa. Tras el análisis de correlación entre las redes de confianza y la adopción de tecnología, el estudio demostró que, en un marco comparativo, solamente una agroempresa asociativa logró una relación de asociación entre sus redes de confianza y el índice de adopción de tecnología. Ello permite demostrar que, aunque en la literatura se evidencian diversos aspectos que inciden

en el proceso de adopción, las redes de confianza también deben ser consideradas, por diversos actores públicos y privados, como una variable a tener en cuenta a la hora de planificar los procesos de intervención de las organizaciones asociativas en los territorios, con el fin de promover un cambio tecnológico, que permita mayor competitividad.

Esta investigación constituye un aporte diferente de abordaje y análisis frente a la relevancia que tiene la generación de redes de confianza en la adopción tecnológica agrícola, tras comprender el carácter territorial y localizado de los vínculos generados por los mismos productores. Por ello, es importante la articulación de los actores en redes de extensión rural, permitiendo planificar las intervenciones y concatenar las capacidades. Futuras investigaciones podrían profundizar en la fuerza de los lazos que tienen las diferentes redes de confianza, hacia diversos actores que hacen presencia en los territorios, buscando fortalecer las agroempresas asociativas rurales

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloquen en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. Financiación: Universidad Nacional de Colombia.

## REFERENCIAS

1. AMÉZAGA, C.; RODRÍGUEZ, D.; NÚÑEZ, M.; HERRERA, D. 2013. Orientaciones Estratégicas para el Fortalecimiento de la Gestión Asociativa. IICA (San Salvador, El Salvador). 98p. Disponible desde Internet en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjhz\\_3Fotn7AhXli7AFHQuFAMsQFnoECBoQAQ&url=http%3A%2F%2Freplica.iica.int%2Fdocs%2FB3246e%2FB3246e.pdf&usg=AOvVaw3plmQeNlnMprAhVkdRyNS](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjhz_3Fotn7AhXli7AFHQuFAMsQFnoECBoQAQ&url=http%3A%2F%2Freplica.iica.int%2Fdocs%2FB3246e%2FB3246e.pdf&usg=AOvVaw3plmQeNlnMprAhVkdRyNS)
2. BORGATTI, S.P.; EVERETT, M.G.; FREEMAN, L.C. 2002. Ucinet 6 for Windows: Software for Social Network Analysis. User's guide. Harvard, Analytic Technologies Inc. (Massachusetts, USA). 47p.
3. BUCK, S.; ALWANG, J. 2011. Agricultural extension, trust, and learning: results from economic experiments in Ecuador. *Agricultural Economics*. 42(6):685-699. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00547.x>
4. CAMACHO, J.H.; AGUILAR, I.; CERVANTES, F. 2012. Confianza, normas y participación: Análisis de organizaciones de productores lecheros en México. *Archivos de Zootecnia*. 61(234):197-207. <https://doi.org/10.4321/S0004-05922012000200004>
5. CAZAU, P. 2006. Introducción a la investigación en ciencias sociales. (3era. Ed.). Ruidinskín (Buenos Aires). 194p.
6. CLARK, L. 2011. Seeing the social capital in agricultural innovation systems: using SNA to visualise bonding and bridging ties in rural communities. *Knowledge Management for Development Journal*. 6(3):206-218. <https://doi.org/10.1080/19474199.2011.554324>
7. EASTWOOD, C.; KLERKX, L.; NETTLE, R. 2017. Dynamics and distribution of public and private research and extension roles for technological innovation and diffusion: Case studies of the implementation and adaptation of precision farming technologies. *Journal of Rural Studies*. 49:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.11.008>
8. FLORES-TREJO, A.; ALMAGUER-VARGAS, G.; AGUILAR-ÁVILA, J.; RENDÓN-MEDEL, R.; MÁRQUEZ-BERBER, S.R. 2016. Redes sociales y confianza entre productores de rambután en el soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 15:3009-3021.
9. FORONDA-ROBLES, C.; GALINDO-PÉREZ-DE-AZPILLAGA, L. 2012. Argumentación relativa a la confianza territorial. Claves sobre capital social. *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 9(68):41-63. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr9-68.arct>
10. FREEMAN, L.C. 1979. Centrality in social networks. Conceptual clarification. *Social Networks*. 1:215-239.
11. GIAMPIETRI, E.; YU, X.; TRESTINI, S. 2020. The role of trust and perceived barriers on farmer's intention to adopt risk management tools. *Bio-Based and Applied Economics Journal*. 9:1-24. <https://doi.org/10.13128/bae-8416>
12. GONZALEZ GAMBOA, V.; BARKMANN, J.; MARGGRAF, R. 2010. Social network effects on the adoption of agroforestry species: Preliminary results of a study on differences on adoption patterns in Southern Ecuador. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 4:71-82. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.07.484>
13. HUNECKE, C.; ENGLER, A.; JARA-ROJAS, R.; POORTVLIET, P.M. 2017. Understanding the role of social capital in adoption decisions: An application to irrigation technology. *Agricultural Systems*. 153:221-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.002>
14. ILABACA UGARTE, C.; ALLIANCE, R.; GOTTTRET, M.C.; JUNKIN, R.; 2011. Autoevaluación facilitada para la gestión de empresas asociativas rurales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE (Turrialba, Costa Rica). 39p. Disponible desde Internet en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi\\_k9iao9n7AhV-UjABHTmqAacQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F132698025.pdf&usg=AOvVaw0hnPzjMTmxagYJCLHJWJ9I](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi_k9iao9n7AhV-UjABHTmqAacQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F132698025.pdf&usg=AOvVaw0hnPzjMTmxagYJCLHJWJ9I)

15. KUMAR, R. 2005. *Research methodology: A step-by-step guide for beginners*. SAGE (London). 366p.
16. LUNA, M.; VELASCO, J.L. 2005. Confianza y desempeño en las redes sociales. *Revista Mexicana de Sociología*. 67(1):127-162.
17. MARTÍNEZ-GARCÍA, C.G.; ARRIAGA-JORDÁN, C.M.; DORWARD, P.; REHMAN, T.; RAYAS-AMOR, A. 2016. Using a socio-psychological model to identify and understand factors influencing the use and adoption of successful innovation by small-scale dairy farmers of Central Mexico. *Experimental Agriculture*. 54(1):142-159. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000703>
18. MICHEELS, E.T.; NOLAN, J.F. 2016. Examining the effects of absorptive capacity and social capital on the adoption of agricultural innovations: A Canadian Prairie case study. *Agricultural Systems*. 145:127-138. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.03.010>
19. MONGE, M.; HARTWICH, F.; HALGIN, D. 2008. How change agents and social capital influence the adoption of innovations among small farmers: Evidence from social networks in rural Bolivia. *International Food Policy Research Institute*. 76p. Disponible desde Internet en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1qP3pdn7AhU6VTABHSV5AfMQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ifpri.org%2Fpublication%2Fhow-change-agents-and-social-capital-influence-adoption-innovations-among-small-farmers&usg=AOvVaw0EKBkT7SGSKveq4C8Rimcq>
20. MONGE PÉREZ, M.; HARTWICH, F. 2008. Análisis de redes Sociales aplicado al estudio de los procesos de innovación agrícola. *Revista Hispana de Redes Sociales*. 14(2):31.
21. MOZZATO, D.; GATTO, P.; DEFRANCESCO, E.; BOR-TOLINI, L.; PIROTTI, F.; PISANI, E.; SARTORI, L. 2018. The role of factors affecting the adoption of environmentally friendly farming practices: can geographical context and time explain the differences emerging from literature? *Sustainability*. 10(9):3101. <https://doi.org/10.3390/su10093101>
22. MUÑOZ RODRÍGUEZ, M.; AGUILAR AVILA, J.; RENDÓN MEDEL, R.; ALTAMIRANO CÁRDENAS, J.R. 2007. Análisis de la dinámica de innovación en cadenas agroalimentarias. Universidad Autónoma Chapingo - CIESTAAM/PIIAI (Chapingo, México). 74p.
23. ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS, OCDE. 2014. *Innovation and modernising the rural economy*. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264205390-en>
24. PAMUK, H.; BULTE, E.; ADEKUNLE, A.A. 2014. Do decentralized innovation systems promote agricultural technology adoption? *Experimental evidence from Africa*. *Food Policy*. 44:227-236. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.09.015>
25. PANNELL, D.J.; MARSHALL, G.R.; BARR, N.; CURTIS, A.; VANCLAY, F.; WILKINSON, R. 2006. Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 46(11):1407-1424. <https://doi.org/10.1071/EA05037>
26. RAJALAHTI, R.; JANSSEN, W.; PEHU, E. 2008. *Agricultural innovation systems: From diagnostics toward operational practices systems*. Agriculture & Rural Development Department, World Bank. 88p.
27. RAMÍREZ-GÓMEZ, C.J.; RODRÍGUEZ-ESPINOSA, H. 2021. Local public-private partnerships to promote innovation in agricultural value chains: the case of cocoa in Colombia. *Revista de Economía e Sociología Rural*. 60(4):1-18.
28. ROBALINO, D.A. 2000. *Social capital, technology diffusion and sustainable growth in the developing world*. RAND Corporation, CA. 286p. Disponible desde Internet en: [https://www.rand.org/pubs/rgs\\_dissertations/RGSD151.html](https://www.rand.org/pubs/rgs_dissertations/RGSD151.html)
29. RODRÍGUEZ-ESPINOSA, H.; RAMÍREZ-GÓMEZ, C.J.; RESTREPO-BETANCUR, L.F. 2016. Nuevas tendencias de la extensión rural para el desarrollo de capacidades de autogestión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 17(1):31-42. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num1\\_art:457](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num1_art:457)
30. RODRÍGUEZ-ESPINOSA, H.; RAMÍREZ GÓMEZ, C. J.; RESTREPO BETANCUR, L.F. 2018. Factores de-terminantes de la sostenibilidad de las agroempresas aso-ciativas rurales. *Revista de Economía e Sociología Rural*. 56(1):107-122. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560107>
31. SENE, O. 2017. Measures of trust and participation in collective actions: evidence from rural Senegal. *African Development Review*. 29(3):498-511. <https://doi.org/10.1111/1467-8268.12285>
32. SOLARTE LINDO, G. 2011. *Asociatividad, empresarización y pactos territoriales: claves del desarrollo de los territorios rurales*. Corporación Latinoamericana Misión Rural (Bogotá, Colombia). 68p. Disponible desde Internet en: [https://www.google.com/urlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiGwsibpNn7AhX8TDABHbwHAvqQFnoECBAQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.misionrural.net%2Fpublicaciones%2Fpactos%2Fempresarizacion\\_pactos.pdf&usg=AOvVaw1FXKZHBC\\_dkvagmsc\\_u5JO](https://www.google.com/urlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiGwsibpNn7AhX8TDABHbwHAvqQFnoECBAQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.misionrural.net%2Fpublicaciones%2Fpactos%2Fempresarizacion_pactos.pdf&usg=AOvVaw1FXKZHBC_dkvagmsc_u5JO)

33. TAKAHASHI, R.; TODO, Y.; DEGEFA, T. 2015. The effects of a participatory approach on the adoption of agricultural technology: Focusing on the social network structure in rural Ethiopia. *Studies in Agricultural Economics*. 117(1):50-56. <http://dx.doi.org/10.7896/j.1504>
34. UNAY GAILHARD, Í.; BAVOROVÁ, M.; PIRSCHER, F. 2015. Adoption of agri-environmental measures by organic farmers: The role of interpersonal communication. *The Journal of Agricultural Education and Extension*. 21(2):127-148. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2014.913985>
35. VARGAS CANALES, J.M.; PALACIOS RANGEL, M.I.; CAMACHO VERA, J.H.; AGUILAR ÁVILA, J.; OCAMPO LEDESMA, J.G. 2015. Factores de innovación en agricultura protegida en la región de Tulancingo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(4):827-840.
36. VÁZQUEZ-VALENCIA, R.A.; AGUILAR-BENÍTEZ, I. 2010. Organizaciones lecheras en los Altos Sur de Jalisco: un análisis de las interacciones productivas. *Región y sociedad*. 22(48):113-144.
37. WILSON, P.N. 2000. Social capital, trust, and the agribusiness of economics. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 25(1):1-13.
38. WOSSEN, T.; ABDOULAYE, T.; ALENE, A.; HAILE, M.G.; FELEKE, S.; OLANREWAJU, A.; MANYONG, V. 2017. Impacts of extension access and cooperative membership on technology adoption and household welfare. *Journal of Rural Studies*. 54:223-233. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.06.022>
39. ZARAZÚA-ESCOBAR, J.A.; ALMAGUER-VARGAS, G.; MÁRQUEZ-BERBER, R. 2011. Redes de innovación en el sistema productivo fresa en Zamora, Michoacán. *Revista Chapingo. Serie horticultura*. 17(1):51-60.



# Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)

## Influence of land use change on soil organic carbon stocks in the Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)

Ingrid Walteros-Torres<sup>1\*</sup> ; Sofía Palacios-Pacheco<sup>1</sup> ; German Eduardo Cely<sup>2</sup> ; Pablo Antonio Serrano<sup>2</sup> ; Diego Moreno-Pérez<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible, GIPSO. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: [ingrid.walteros@uptc.edu.co](mailto:ingrid.walteros@uptc.edu.co); [laurasofia.palacios@uptc.edu.co](mailto:laurasofia.palacios@uptc.edu.co); [diego.morenoperez@uptc.edu.co](mailto:diego.morenoperez@uptc.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: [german.cely@uptc.edu.co](mailto:german.cely@uptc.edu.co); [pablo.serrano@uptc.edu.co](mailto:pablo.serrano@uptc.edu.co)

\*autor de correspondencia: [ingrid.walteros@uptc.edu.co](mailto:ingrid.walteros@uptc.edu.co)

**Cómo citar:** Walteros-Torres, I.; Palacios-Pacheco, S.; Cely, G.E.; Serrano, P.A.; Moreno-Pérez, D. 2022. Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 25(2):e1846. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** abril 13 de 2020

**Aceptado:** julio 21 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Los páramos almacenan grandes reservas de carbono orgánico en el suelo (COS), influenciados por las condiciones climáticas y biogeoquímicas, propias del ecosistema; sin embargo, su progresiva conversión hacia cultivos, ganadería o minería incide directamente en las reservas de COS. Con el fin de determinar el efecto que ejerce el cambio de uso de suelo sobre la variabilidad de las reservas de COS, se realizó un monitoreo de COS entre 2013, 2018 y 2020, en el Parque Natural Regional Cortadera. Se estudiaron parcelas permanentes de muestreo (PPM), ubicadas bajo tres diferentes usos del suelo: conservado, en recuperación e intervenido. Se analizaron muestras de carbono orgánico y densidad aparente, a dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm). Se encontró que la PPM en escenario conservado presentó los contenidos más altos de COS, con valores de 290,37; 199,22 y 257,5 tC ha<sup>-1</sup>, para cada uno de los años en estudio; seguido por la PPM en recuperación, que evidenció valores de COS 215,3 tC ha<sup>-1</sup>, en el 2020, en contraste con la PPM intervenida, que presentó contenidos mínimos de 15,50; 34,01 y 88,06 tC ha<sup>-1</sup>. Se observó que los mayores contenidos de COS se encuentran a la profundidad de 15 a 30 cm. Dichos aspectos,

resaltan la importancia de avanzar en acciones enfocadas a la protección de ecosistemas estratégicos, considerando las constantes amenazas relacionadas con la transformación del paisaje y, con ello, la posibilidad de proveer funciones y servicios asociados a la captura de carbono y la regulación climática.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo; Carbono orgánico; Páramo; Monitoreo ambiental; Servicios ecosistémicos.

### ABSTRACT

The paramos accumulate high stocks of soil organic carbon (SOC), influenced by the climatic and biogeochemical conditions of the ecosystem. However, their progressive conversion to crops, livestock, or mining has a direct impact on the SOC stocks. To determine the effect of land use change on the variability of SOC stocks, monitoring of SOC content was conducted between the years 2013, 2018, and 2020 in the Parque Natural Regional Cortadera. Permanent sampling plots (PPS) located under three different land uses were studied: conserved, recovering, and intervened. To do so, samples of soil organic carbon and bulk density at two depths were

analyzed (0-15 cm and 15-30 cm). The conserved PPS showed the highest SOC contents, with maximum values of 290.37; 199.22, and 257.5 tC ha<sup>-1</sup> for each of the years under study; follow by the recovery PPM that presented COS values of 215.3 tC ha<sup>-1</sup> in 2020, in contrast to the intervened PSP that showed minimum contents of 15.50; 34.01 and 88.06 tC ha<sup>-1</sup>. Furthermore, the highest SOC contents were found at 15-30 cm depth. These factors emphasize the importance of carrying out actions focused on protecting strategic ecosystems such as paramos, taking into account the continuous threats related to the transformation of the landscape and, consequently, the possibility of providing ecosystem functions and services related to carbon capture and climate regulation.

Keywords: Ecosystem services; Environmental Monitoring; Land use change; Organic carbon; Paramo.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos son uno de los recursos claves para la mitigación y la adaptación al cambio climático, ya que constituyen el principal almacén de carbono en ecosistemas terrestres (FAO, 2020) y hacen parte de las cuatro mayores reservas de carbono, además de la atmósfera, los océanos, las existencias de combustibles fósiles y los ecosistemas terrestres (vegetación y suelos) (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017); sin embargo, este recurso puede actuar como fuente o sumidero de gases de efecto invernadero (GEI), dependiendo de su uso y manejo (IGAC, 2018). Se estima que el carbono orgánico del suelo (COS) constituye, aproximadamente, dos tercios de la reserva de carbono del ecosistema terrestre (Zhang *et al.* 2018).

El suelo almacena tres veces más carbono que la biomasa aérea y es un sumidero de carbono relativamente estable, en especial, en el perfil más profundo (Masciandaro *et al.* 2018); no obstante, estos almacenes son susceptibles a las interferencias humanas, principalmente, a actividades que cambia el uso o la cobertura de la tierra (IPCC, 2020). Se cree que, en todo el mundo, las conversiones de bosques primarios a tierras agrícolas están agotando el COS, mientras que la forestación se considera un medio para restaurar estos almacenes (Stockmann *et al.* 2013), donde el tipo de vegetación influye fuertemente en las propiedades del suelo (Sylvester *et al.* 2017).

En los ecosistemas naturales, las tasas de formación y la descomposición de carbono orgánico del suelo (COS), se mantienen en equilibrio constante (Cerri *et al.* 2007), contrario a lo que ocurre en agroecosistemas, donde las prácticas de uso y manejo pueden alterar los ingresos de materia orgánica (MO), influyendo en la capacidad de captura de carbono (Caviglia *et al.* 2016).

De acuerdo con la IPCC (2020), entre el 2007 y 2016, las actividades relativas a la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, representaron alrededor del 13 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el 44 % de las de metano (CH<sub>4</sub>) y el 81 % de las de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), procedentes de las actividades humanas, a nivel mundial, lo que representa el 23 % del total de emisiones antropógenas netas

de GEI. La preocupación por el aumento acelerado de GEI, por causa de actividades antrópicas, es cada vez más evidente, ya que se constituye como la principal causa del calentamiento global (Salvo & Bayer, 2014).

Como se indicó, los suelos son el mayor almacén terrestre de carbono, a nivel global y, por tanto, tienen una influencia directa en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (IDEAM *et al.* 2017). Los modelos globales estiman emisiones netas de CO<sub>2</sub> de 5,2 ± 2,6 GtCO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>, procedentes del uso y el cambio de uso del suelo, durante el periodo comprendido entre 2007-2016. Esas emisiones netas se deben, principalmente, a la deforestación y a emisiones y remociones procedentes de otras actividades del uso del suelo (IPCC, 2020).

Según la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del IDEAM *et al.* (2017), en Colombia, los territorios presentan vulnerabilidades preexistentes que se pueden ver exacerbadas, por causa del cambio climático. Lo anterior condiciona la sostenibilidad de ecosistemas estratégicos, como los páramos, afectando los servicios ecosistémicos que brindan para el bienestar humano, como la regulación y provisión de agua, el almacenamiento de carbono y la biodiversidad (Cárdenas & Tobón, 2017).

Los suelos de páramo tienen la capacidad de acumular grandes cantidades de carbono (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017), debido a las bajas tasas de mineralización y una gran acumulación de materia orgánica, que se da gracias a las bajas temperaturas, especialmente, durante la noche y a las condiciones edáficas, como los altos contenidos de humedad (Curiel Yuste *et al.* 2017); sin embargo, la capacidad del páramo para mantener los altos niveles de carbono en el suelo se ve amenazada, por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas y a los efectos del cambio climático (Thompson *et al.* 2021). Estas actividades están exponiendo el suelo a condiciones de degradación, fundamentalmente, por la compactación, la erosión y el cambio de los almacenes de carbono (Lis-Gutiérrez *et al.* 2019); de esta manera, dichas características pueden convertirlo, tanto en sumidero como en fuente neta CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En este sentido, es fundamental mejorar el conocimiento sobre el papel del páramo como sumidero de carbono, además de entender la influencia que ejerce el cambio de uso del suelo, sobre dichos almacenes. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue realizar un monitoreo del contenido de carbono orgánico en suelos del Parque Natural Regional Cortadera, a partir de una línea base establecida en el 2013 (Forero Ulloa *et al.* 2015) y una fase de monitoreo en 2018 y 2020. Para ello, se estudiaron Parcelas Permanentes de Muestreo (PPM), bajo tres usos de suelo: conservado, en recuperación e intervenido, permitiendo identificar las principales dinámicas de uso del suelo que condicionan el COS almacenado y, así, avanzar hacia una agenda de investigación, que integre medidas de gestión para la sostenibilidad de los ecosistemas de páramo y, con ello, la preservación de los diversos servicios ecosistémicos que brindan, para el bienestar humano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El estudio, se llevó a cabo en el páramo La Cortadera, en el complejo Tota-Bijagual-Mamapacha, ubicado entre los 3.100 y 3.970 m s.n.m. (Morales Rivas *et al.* 2007), en el departamento de Boyacá, Colombia (Figura 1).

Se usó un diseño experimental estratificado al azar y, con base en estudios de levantamiento de suelos y coberturas para la zona, se identificaron tres escenarios de muestreo, de acuerdo con el uso del suelo: conservado, el cual, presenta vegetación de páramo (Vp); en recuperación, que presenta una vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe) e intervenido, con cultivos transitorios

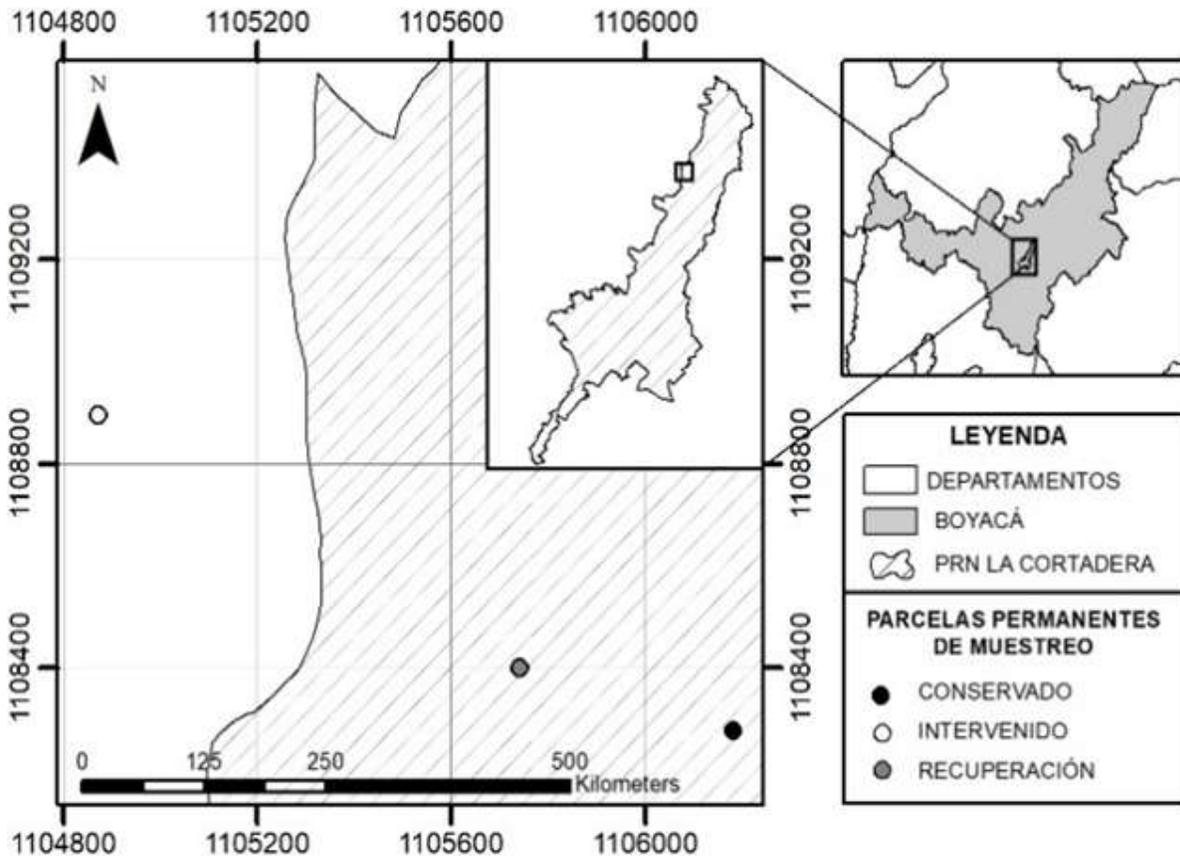


Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas permanentes de muestreo PPM dentro del complejo Tota-Bijagual-Mamapacha, Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá-Colombia.

(Forero Ulloa *et al.* 2015). En cada uno de estos, se establecieron parcelas permanentes de muestreo (PPM), de un metro de ancho por un metro de largo, debido a que proveen datos reales y fácilmente verificables (MacDicken, 1997).

**Muestreo de suelos.** Se realizaron tres muestreos de suelo: el primero, en el 2013 (Forero Ulloa *et al.* 2015), con el objetivo de establecer la línea base del COS; el segundo, en el 2018 y, el tercero, en el 2020, para conocer la dinámica del carbono, teniendo en cuenta variables temporales y de cambio de uso del suelo (monitoreo). En cada PPM, se hicieron cajuelas de 50 cm de ancho por 50 cm de largo y 50 cm de profundo, con el fin de tomar muestras para carbono orgánico (CO) y densidad aparente (pb) (Figura 2). La periodicidad del monitoreo, se definió según las condiciones de uso del suelo al momento de realizar el primer muestreo; de esta manera y teniendo en cuenta que la parcela ubicada en el uso “en recuperación” se encontraba en procesos de restauración asistida, se optó por realizar el siguiente

muestreo cinco años después, con el objetivo de observar la dinámica del COS, frente a un proceso de restauración, considerando que en un proceso de restauración están involucrados diversos aspectos ecológicos, económicos y sociales, que convergen en un momento y un espacio definido (MADS, 2015). Luego del segundo muestreo y considerando la evolución del área de muestreo frente al proceso de restauración, se definió un lapso de dos años, para realizar el tercer muestreo y, de esa manera, llevar a cabo el proceso de monitoreo.

Para CO se tomaron muestras separadas, a las profundidades de 0-15 y 15-30 cm. Las muestras obtenidas en cada uno de los tres puntos se mezclaron, para obtener una muestra compuesta para cada una de las dos profundidades; posteriormente, fueron llevadas a laboratorio, para su determinación por el método de Walkley-Black (oxidación húmeda). Respecto a la pb, se utilizaron cilindros de volumen conocido, tomando una muestra por cada PPM para cada profundidad.

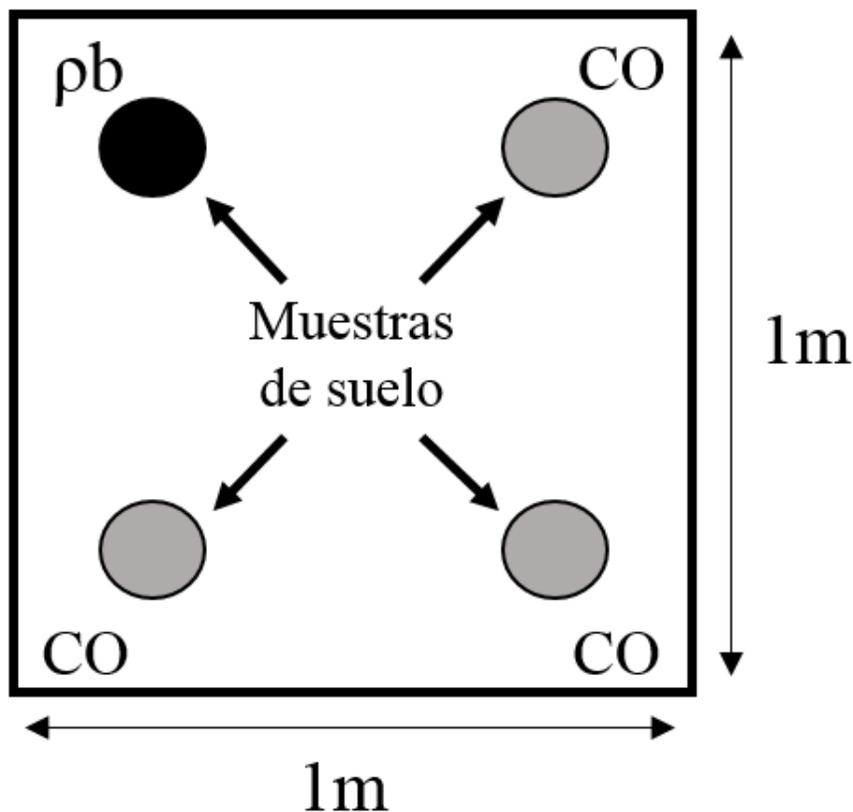


Figura 2. Diseño de toma de muestras para carbono orgánico (CO) y densidad aparente ( $\rho_b$ ), de acuerdo con Rüginitz et al. (2009).

**Carbono orgánico del suelo.** Para la determinación del COS, se utilizó la ecuación propuesta por Calderón *et al.* (2013), para monitoreo de contenidos y flujos de carbono, en gradientes altitudinales altoandinos, la cual, se describe en la ecuación 1.

$$\text{COS} = [\text{CO}] * \rho_b * h \quad \text{ecuación 1}$$

Donde, COS es el contenido de carbono orgánico del suelo ( $\text{tC ha}^{-1}$ ), CO es la concentración de carbono orgánico de suelo (%),  $\rho_b$  es la densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) y h es la profundidad, a la cual, se tomó la muestra (cm).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Contenidos de carbono orgánico del suelo.** La PPM en suelo conservado presentó los valores más altos de COS, con  $290,37 \text{ tC ha}^{-1}$ , para el 2013, seguido por la PPM recuperación, para el 2020 ( $117,4 \text{ tC ha}^{-1}$ ) y para el 2013, con  $106,35 \text{ tC ha}^{-1}$ , para la profundidad de 0-15 cm (Figura 3a). Al respecto Thompson *et al.* (2021) mencionan que el páramo andino se destaca por su alto almacenamiento de carbono en el suelo y su contribución a los servicios ecosistémicos. Los resultados de la investigación contrastan con los de Zúñiga-Escobar *et al.* (2013), quienes reportan un cálculo de COS en ecosistemas no intervenidos de alta montaña, de  $520,9 \text{ t ha}^{-1}$ , en páramo y  $323,6 \text{ t ha}^{-1}$ , en bosque alto andino del parque nacional natural Chingaza, en el departamento de Cundinamarca y, a su vez, de  $373,0 \text{ t ha}^{-1}$ , en páramo y  $254,6 \text{ t ha}^{-1}$ , en bosque alto andino del Parque Nacional Natural Los Nevados, ubicado en el

departamento del Tolima. Estos resultados, se deben a la afirmación de Castañeda-Martín & Montes-Pulido (2017), quienes agregan que los COS dependen de la vegetación natural, donde la protección de la superficie del suelo es determinada por el tipo de cobertura vegetal, por ejemplo, cuando se cuenta con densas coberturas generadas por plantas briofitas y especies arbustivas, las cuales aíslan el suelo de la precipitación e incidencia directa de la radiación solar se puede presentar una mayor cantidad de carbono orgánico, debido a que hay una menor descomposición de la materia orgánica (Zimmermann *et al.* 2010).

Los contenidos de COS en la PPM, bajo uso intervenido, para el 2013 y 2018, presentaron valores muy bajos, con  $15,50$  y  $34,01 \text{ tC ha}^{-1}$ , respectivamente, si se comparan con los datos de Zúñiga-Escobar *et al.* (2013), quienes reportaron en zonas intervenidas de páramo, valores de  $135,1 \text{ tC ha}^{-1}$ . Resultados similares fueron encontrados por Daza Torres *et al.* (2014), quienes realizaron estudios del contenido de carbono sobre suelos, con cuatro usos diferentes, en el páramo de Sumapaz y determinaron que los suelos con agricultura intensiva y lotes en descanso revelaban los valores más bajos de carbono orgánico. Esto, se debe a que, probablemente, la eliminación de la vegetación natural y la alteración del suelo y su transformación hacia actividades, como la agricultura y ganadería, aceleran los procesos de oxidación de la materia orgánica, imposibilitando o disminuyendo la fijación de carbono en el suelo (Don *et al.* 2011). La capacidad del páramo para mantener altos niveles de carbono en el suelo se ve amenazada, por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas (Thompson *et al.* 2021).

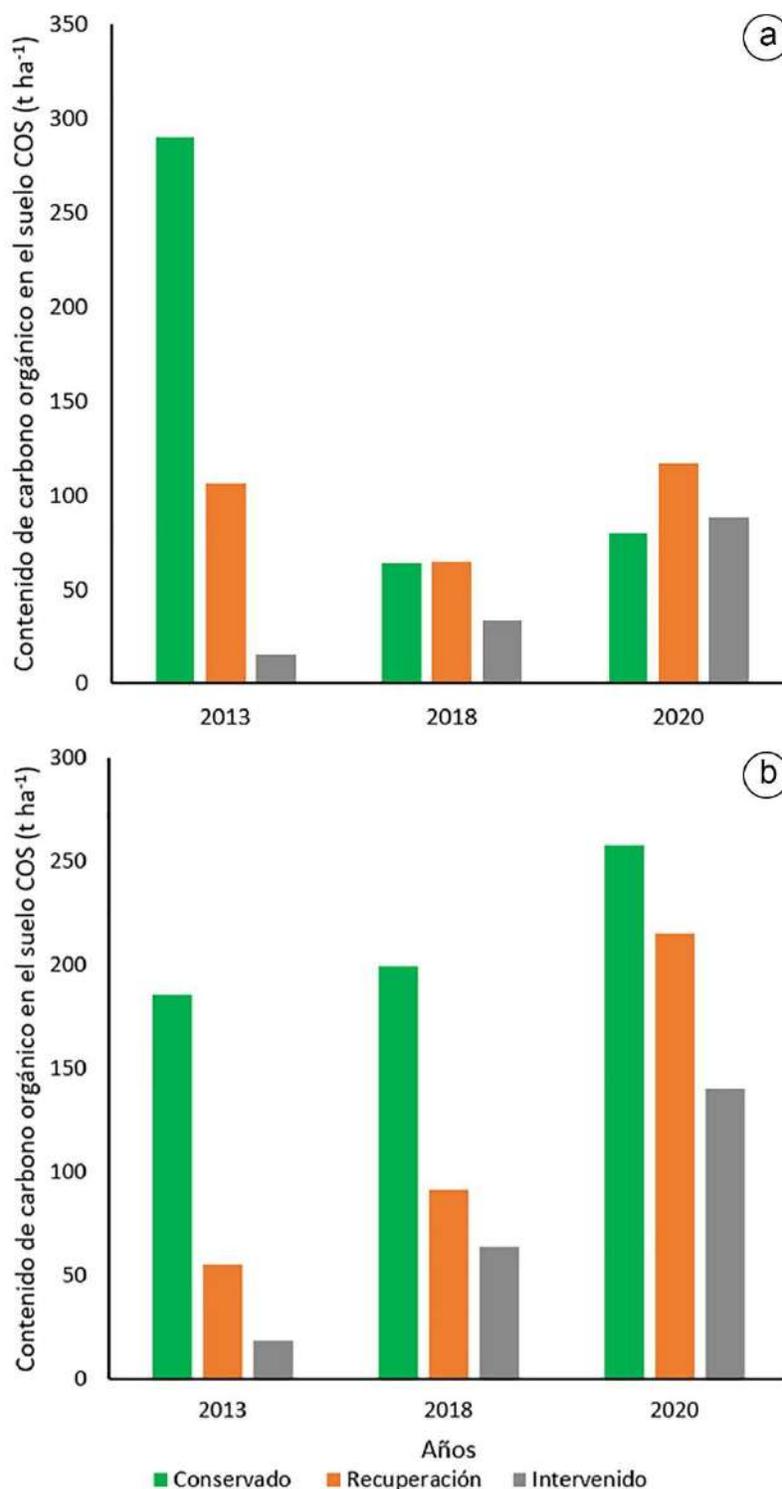


Figura 3. Contenido de carbono orgánico en el suelo COS en  $t\ ha^{-1}$  en las parcelas permanentes de muestreo conservado, en recuperación e intervenido. a) Contenido de COS en la profundidad de 0-15 cm; b) Contenido de COS en la profundidad de 15-30 cm.

Para el 2013, que corresponde a la línea base, los contenidos más altos de COS para cada una de las parcelas, se registraron en la profundidad de 0-15 cm (Figura 3), que concuerda con lo descrito por Carvajal *et al.* (2009), quienes indican que, a medida que aumenta la profundidad del suelo, se disminuye la acumulación de COS; no obstante, en el monitoreo llevado a cabo en el 2018

y 2020, a pesar de presentarse la misma tendencia, que indica que los contenidos más altos se encuentran en suelos conservados, con valores de 199,22 y 257,6  $tC\ ha^{-1}$ , hay una variación influenciada por la profundidad, a la cual, fueron tomadas las muestras, es decir, de 15-30 cm (Figura 3b). Estos datos, se relacionan con la información reportada por Olson & Al-Kaisi (2015),

donde observaron un aumento en los valores de COS a mayor profundidad de muestreo. De igual forma, en una investigación realizada en Ecuador, sobre la eficiencia de la implementación de un programa de pago por servicios ambientales (PSA), sobre las reservas de carbono, los autores resaltan el alto potencial del suelo de páramo, como sumidero, entre 206,1 y 548,6 tC ha<sup>-1</sup>, siendo representativas profundidades de muestreo hasta un máximo 60 cm (Bremer *et al.* 2016).

En general, los valores de COS obtenidos en el Parque Natural Regional Cortadera concuerdan con los reportados por Gutiérrez *et al.* (2020), en donde los valores oscilaron entre 22 y 338 t ha<sup>-1</sup>, con promedio de 164 t ha<sup>-1</sup>, en páramos de Colombia y, específicamente para Boyacá, los valores máximos de COS fueron de 289,07 t ha<sup>-1</sup>, mínimos de 64,79 t ha<sup>-1</sup> y un promedio de 161,4 t ha<sup>-1</sup> (Gutiérrez *et al.* 2020). Asimismo, son altos, comparados con los reportados por Fernández-Pérez *et al.* (2019), en el páramo de Rabanal, en Boyacá, con valores entre 46,7 y 106 tC ha<sup>-1</sup>, para las profundidades de 0-15 y de 15-30 cm, respectivamente y con los obtenidos por Visconti &

De Paz (2017), en España, en donde encontraron valores promedio de 50,48 a 66,56 tC ha<sup>-1</sup>.

**Variación temporal de COS.** Respecto a la variación temporal de los contenidos de COS, entre el 2013-2018-2020, como se observa en la tabla 1, se presenta un marcado descenso de los valores de COS en la PPM conservada. En este punto, se destaca el papel de la densidad aparente ( $\rho_b$ ), como factor multiplicador, pues tal como se presenta en la tabla 1, la  $\rho_b$ , para el uso conservado en el 2013, alcanza valores de 1,39 g cm<sup>-3</sup>, difiriendo de lo hallado, bajo el mismo escenario, en 2018, con una  $\rho_b$  de 0,41 g cm<sup>-3</sup> y 0,33 cm<sup>-3</sup>, para el 2020, en la misma profundidad. La densidad aparente en otros suelos de páramos conservados, se reporta con valores entre 0,62 a 0,8 g cm<sup>-3</sup> (Estupiñán *et al.* 2009; Zúñiga-Escobar *et al.* 2013; Daza Torres *et al.* 2014). Daza Torres *et al.* (2014) mencionan que la baja densidad aparente de estos suelos se da por sus características orgánicas, alta porosidad y la gran cantidad de especies vegetales y sus sistemas radiculares en los primeros centímetros del suelo, lo que les confiere gran capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 1. Descripción de la variación de valores de carbono orgánico CO (%), densidad aparente  $\rho_b$  (g cm<sup>-3</sup>) y carbono orgánico en el suelo COS (tC ha<sup>-1</sup>), en las dos profundidades de estudio (0-15 y 15-30 cm) y para 2013, 2018 y 2020.

	PPM conservada								
	CO (%)			$\rho_b$ (g cm <sup>-3</sup> )			COS (t C ha <sup>-1</sup> )		
Años/ profundidad	2013	2018	2020	2013	2018	2020	2013	2018	2020
0-15 cm	13,96	10,41	16,15	1,39	0,41	0,33	290,37	64,32	79,94
15-30 cm	11,63	10,62	13,21	0,53	0,63	0,65	185,51	199,22	257,6
	PPM en recuperación								
0-15 cm	6,58	4,55	6,69	1,08	0,95	1,17	106,35	65,00	117,4
15-30 cm	3,32	3,37	6,24	0,55	0,90	1,15	55,10	91,34	215,3
	PPM intervenida								
0-15 cm	0,93	2,34	5,7	1,11	0,97	1,03	15,50	34,01	88,06
15-30 cm	0,46	2,18	4,68	1,35	0,97	1,00	18,60	63,46	140,4

Por su parte, Quichimbo *et al.* (2012) afirman que la materia orgánica presente en el suelo influye directamente sobre propiedades físicas, como la estructura, lo que se traduciría en valores más bajos de densidad aparente en suelos en conservación y, con ello, mayor capacidad de mantener las funciones ecológicas del páramo y brindar servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica y la captura de carbono.

Al comparar las concentraciones de carbono orgánico del suelo (%CO) en el PPM conservado (Tabla 1), se observaron diferencias significativas entre los años y en ambas profundidades; esto permite concluir, que es importante incluir estudios enfocados a corregir la ecuación para la determinación de COS, siendo un factor crucial para adelantar este tipo de análisis, ya que permitirá establecer, de manera más adecuada, valores reales y verificables, para cada tipo de uso del suelo. Cabe resaltar que, en algunas ocasiones, no siendo este el caso, se ha evidenciado que la  $\rho_b$  es determinante a la hora de realizar la comparación entre un uso intervenido y otro conservado, lo cual, puede llegar a distorsionar los cálculos de las

reservas de COS. Por su parte Ellert & Bettany (1995) mencionan que las evaluaciones de los cambios inducidos por el manejo en las cantidades de carbono y de otros elementos almacenados en los suelos, son influenciadas por el método utilizado para calcular la concentración del elemento. Las estimaciones convencionales de masas de elementos en horizontes genéticos o profundidades de muestreo fijas (calculado como el producto de la concentración, la densidad aparente y el espesor) resultan en comparaciones desiguales e injustificadas, porque el muestreo de suelo y la identificación de la formación de horizontes en el campo pueden ser indicadores poco fiables de la redistribución del mismo.

De manera general, cada una de las PPM, en la fase monitoreo, presentó una tendencia similar frente a la línea base, manteniéndose valores elevados de COS en ecosistemas en estado de conservación y decreciendo en áreas de páramos, que tienen algún grado de intervención, en este caso, agricultura; sin embargo, si se analiza la parcela bajo un uso intervenido en conjunto (0-15 cm y 15-30 cm), para los tres periodos de estudio, se encuentra que,

independientemente de la densidad aparente, la cual, se presentó como constante, este uso fue el único que tuvo un aumento respecto a la línea base (Tabla 1). Patiño *et al.* (2021) afirman que el pastoreo compacta el suelo y aumenta la densidad aparente, reduciendo la infiltración y la capacidad de retención de agua. La agricultura aumenta la macroporosidad y promueve la pérdida de nutrientes y materia orgánica del suelo. Por último, la forestación con especies exóticas, por ejemplo, con pinos o eucaliptos, disminuye la materia orgánica del suelo y la capacidad de retención de agua, al cambiar la estructura del suelo.

El almacenamiento de COS se ve afectado directa o indirectamente por los humanos, los cambios en el uso de la tierra, la erosión del suelo, el cambio climático, las comunidades de microbios y sus actividades y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Zhu *et al.* 2021). En este sentido, la dinámica del cambio de uso y manejo del suelo aparece como un factor determinante en escenarios de calentamiento global, puesto que el suelo “puede ser una espada de doble filo” como sumidero, a través del almacenamiento de grandes cantidades de carbono orgánico (COS) (De Souza Barros, 2013) y como fuente neta de GEI, debido al desarrollo de prácticas insostenibles de manejo y la mineralización acelerada del COS (De Souza Barros, 2013). Como indica Thompson *et al.* (2021), el páramo andino se destaca por su alto almacenamiento de carbono en el suelo y su contribución a los servicios ecosistémicos; sin embargo, la capacidad del páramo para mantener altos niveles de carbono en el suelo, se ve amenazada por el cambio de uso de la tierra de pastizales y matorrales a usos agrícolas.

Respecto a la influencia de la profundidad de muestreo, se encontró que, en la mayoría de PPM evaluadas, sin importar la condición de uso del suelo, los contenidos de COS tienden a aumentar, a partir de los 15 cm. Estos resultados, se validan con información presentada por Olson & Al-Kaisi (2015), y Cunalata *et al.* (2013), quienes indican que a dicha profundidad los procesos de humificación en el suelo tienden a ser más estables; sin embargo, contrastan con lo reportado por Padbhushan *et al.* (2022), quien afirman que los cambios en las reservas y las propiedades de carbono del suelo, son más pronunciados en los suelos superficiales (0-15 cm) que en los suelos subterráneos (15-30 cm y 30-45 cm).

Con relación a la frecuencia del monitoreo, Calderón *et al.* (2013) proponen cuantificar los reservorios de carbono de un ecosistema cada dos años, pudiendo variar, dependiendo de los intereses científicos y de los recursos económicos disponibles. Además, González-Molina *et al.* (2008) mencionan que, al momento de determinar el cambio temporal del carbono en suelos, se deben considerar las laderas y con miras a disminuir errores, se recomienda estandarizar procesos en laboratorio; además, es recomendable tener un banco de datos del suelo del primer muestreo, con el fin de realizar los mismos procesos metodológicos con el nuevo muestreo.

**Agradecimientos.** Extendemos nuestros agradecimientos a los coinvestigadores de la Universidad de La Salle, especialmente, a los docentes vinculados a la escuela de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. De igual forma, a los demás integrantes del grupo de investigación

GIPSO de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, quienes contribuyeron en esta investigación. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloquen en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. **Financiación:** Proporcionada por Minciencias, la Gobernación de Boyacá dentro de la convocatoria de Boyacá Bio y Corpoboyacá.

## REFERENCIAS

1. BREMER, L.L.; FARLEY, K.A.; CHADWICK, O.A.; HARDEN, C.P. 2016. Changes in carbon storage with land management promoted by payment for ecosystem services. *Environmental Conservation*. 43(4):397-406.
2. CALDERÓN, M.; ROMERO-SALTOS, H.; CUESTA, F.; PINTO, E.; BAEZ, S. 2013. Monitoreo de contenidos y flujos de carbono en gradientes altitudinales. CONDESAN/COSUDE (Quito-Ecuador). 64p.
3. CÁRDENAS, M.F.; TOBÓN, C. 2017. Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20(2):403-412. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>
4. CARVAJAL, A.F.; FEIJOO, A.; QUINTERO, H.; RONDON, M.A. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 9(3):222-235. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
5. CASTAÑEDA-MARTÍN, A.E.; MONTES-PULIDO, C.R. 2017. Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*. 13(1):210-221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
6. CAVIGLIA, O.P.; WINGEYER, A.B.; NOVELLI, L.E. 2016. El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*. 78:27-32.
7. CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, M.; CERRI, C.C. 2007. Tropical agriculture and global warming: impact and mitigation options. *Scientia Agricola*. 64:83-99. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100013>
8. CUNALATA, C.; INGA, C.; ALVAREZ, G.; RECALDE, C.; ECHEVERRÍA, M. 2013. Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades del chimborazo y shobol llinllin en Ecuador. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*. 27(27):10-13.
9. CURIEL YUSTE, J.; HEREŞ, A.-M.; OJEDA, G.; PAZ, A.; PIZANO, C.; GARCÍA-ANGULO, D.; LASSO, E. 2017.

- Soil heterotrophic CO<sub>2</sub> emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. *Soil Biology and Biochemistry*. 110:8-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.016>
10. DAZA TORRES, M.; HERNÁNDEZ FLÓREZ, F.; TRIANA, F. 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 67(1):7189-7200.  
<https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
  11. DE SOUZA BARROS, D.E.S. 2013. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. *Polêmica*. 12(2):341-351.  
<https://doi.org/10.12957/polemica.2013.6436>
  12. DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*. 17(4):1658-1670.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
  13. ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*. 75(4):529-538.  
<https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
  14. ESTUPIÑAN, L.H.; GÓMEZ, J.E.; BARRANTES, V.J.; LIMAS, L.F. 2009. Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo el Granizo, (Cundinamarca - Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 12(2):79-89.  
<https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.694>
  15. FERNÁNDEZ-PÉREZ, C.; CELY REYES, G.E; SERRANO, P.A. 2019. Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 28(1):121-133.  
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
  16. FORERO ULLOA, F.E.; CELY REYES, G.E.; PALACIOS PACHECO, L.S. 2015. Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC (Tunja, Colombia)*. 144p.
  17. GONZÁLEZ-MOLINA, L.; ETCHEVERS-BARRA, J.D.; HIDALGO-MORENO, C. 2008. Carbon in hillsides soil: Factors that must be considered to determine its change over time. *Agrociencia*. 42(7):741-751.
  18. GUTIÉRREZ, J.; ORDOÑEZ, N.; BOLÍVAR, A.; BUNNING, S.; GUEVARA, M.; MEDINA, E.; OLIVERA, C.; OLMENDO, G.; RODRÍGUEZ, L.; SEVILLA, V.; VARGAS, R. 2020. Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas*. 29(1):1855.  
<https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
  19. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM; PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, PNUD; MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS; DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP; CANCELLERÍA. 2017. Tercera comunicación nacional de Colombia a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático (CMNUCC). Punto aparte. 37p.
  20. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2018. Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*. 150p.
  21. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. 2020. El cambio climático y la tierra. Disponible desde Internet en: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
  22. LIS-GUTIÉRREZ, M.; RUBIANO-SANABRIA, Y.; LOAIZA-USUGA, J.C. 2019. Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena. *Auc Geographica*. 54(1):15-23.  
<https://doi.org/10.14712/23361980.2019.2>
  23. MACDICKEN, K.G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. *Forest carbon monitoring program*. Winrock International Institute for Agricultural Development. 87p.
  24. MASCIANDARO, G.; MACCI, C.; PERUZZI, E.; DONI, S. 2018. Soil Carbon in the World: Ecosystem Services Linked to Soil Carbon in Forest and Agricultural Soils. In: García, C.; Nannipieri, P.; Hernandez, T. (eds.). *The Future of Soil Carbon*. Elsevier. p.1-38.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00001-8>
  25. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS. 2015. Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Bogotá, D.C., Colombia)*. 92p.
  26. MORALES RIVAS, M.; OTERO GARCIA, J.; HAMMEN, T.V.D.; TORRES PERDIGÓN, A.; CADENA VARGAS, C.E.; PEDRAZA PEÑALOZA, C.A.; RODRIGUEZ ERAZO, N.; FRANCO AGUILERA, C.A.; BETANCOURTH, J.C.; OLAYA OSPINA, É.; POSADA

- GILEDE, E.; CARDENAS VALENCIA, L. 2007. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Bogotá, Colombia). 210p.
27. OLSON, K.R.; AL-KAISI, M.M. 2015. The importance of soil sampling depth for accurate account of soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss. *Catena*. 125:33-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.004>
28. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. FAO (Rome). 140p.  
<https://doi.org/10.4060/cb0509en>
29. PADBHUSHAN, R.; KUMAR, U.; SHARMA, S.; RANA, D.S.; KUMAR, R.; KOHLI, A.; KUMARI, P.; PARMAR, B.; KAVIRAJ, M.; SINHA, A.K.; ANNAPURNA, K.; GUPTA, V.V.S.R. 2022. Impact of Land-Use Changes on Soil Properties and Carbon Pools in India: A Meta-analysis. *Frontiers in Environmental Science*. 9:794866.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.794866>
30. PATIÑO, S.; HERNÁNDEZ, Y.; PLATA, C.; DOMÍNGUEZ, I.; DAZA, M.; OVIEDO-OCAÑA, R.; BUYTAERT, W.; OCHOA-TOCACHI, B.F. 2021. Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*. 202:105227.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
31. QUICHIMBO, P.; TENORIO, G.; BORJA, P.; CÁRDENAS, I.; CRESPO, P.; CÉLLERI, R. 2012. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*. 42(2):138-153.
32. RÜGNITZ, M.T.; CHACÓN, M.L.; PORRO, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal, Consorcio Iniciativa Amazónica (Lima, Perú). 90p.
33. SALVO, L.; BAYER, C. 2014. Balance de Gases de Efecto Invernadero en suelos agrícolas de secano. *Cangüé*. 35:7-14.
34. STOCKMANN, U.; ADAMS, M.A.; CRAWFORD, J.W.; FIELD, D.J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; DECOURCELLES, V.DE.R.; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D.A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BROOKES, P.; CHENU, C.; JASTROW, J.D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A.G.; PARTON, W.J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 164:80-99.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
35. SYLVESTER, S.P.; HEITKAMP, F.; SYLVESTER, M.D.P.V.; JUNGKUNST, H.F.; SIPMAN, H.J.M.; TOIVONEN, J.M.; GONZALES INCA, C.A.; OSPINA, J.C.; KESSLER, M. 2017. Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Scientific Reports*. 7(1):3334.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03500-7>
36. THOMPSON, J.B.; ZURITA-ARTHOS, L.; MÜLLER, F.; CHIMBOLEMA, S.; SUÁREZ, E. 2021. Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 53(1):48-59.  
<https://doi.org/10.1080/15230430.2021.1873055>
37. VISCONTI, F.; DE PAZ, J.M. 2017. Estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO<sub>2</sub> de los suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. 26(1):91-100.  
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.15>
38. ZHANG, Z.; ZHOU, Y.; WANG, S.; HUANG, X. 2018. Estimation of soil organic carbon storage and its fractions in a small karst watershed. *Acta Geochimica*. 37(1):113-124.  
<https://doi.org/10.1007/s11631-017-0164-4>
39. ZHU, G.; SHANGGUAN, Z.; DENG, L. 2021. Dynamics of water-stable aggregates associated organic carbon assessed from delta C-13 changes following temperate natural forest development in China. *Soil and Tillage Research*. 205:104782.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104782>
40. ZIMMERMANN, M.; MEIR, P.; SILMAN, M.R.; FEDDERS, A.; GIBBON, A.; MALHI, Y.; URREGO, D.H.; BUSH, M.B.; FEELEY, K.J.; GARCIA, K.C.; DARGIE, G.C.; FARFAN, W.R.; GOETZ, B.P.; JOHNSON, W.T.; KLINE, K.M.; MODI, A.T.; RURAU, N.M.Q.; STAUDT, B.T.; ZAMORA, F. 2010. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*. 13(1):62-74.  
<https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>
41. ZÚÑIGA-ESCOBAR, O.; PEÑA-SALAMANCA, E.J.; TORRES-GONZÁLEZ, A.M.; CUERO-GUEPENDO, R.; PEÑA-ÓSPINA, J.A. 2013. Assessment of the impact of anthropic activities on carbon storage in soils of high montane ecosystems in Colombia. *Agronomía Colombiana*. 31(1):112-119.



# Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia

## Carbon and nitrogen content of the soil in a high Andean agroecosystem of Valle del Cauca, Colombia

Francy Zorayda Gómez-Balanta<sup>1\*</sup> ; Luis Miguel Ramírez-Náder<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Palmira - Valle del Cauca, Colombia; e-mail: fragomez@unal.edu.co; lramirez@unal.edu.co

\*autor de correspondencia: fragomez@unal.edu.co

**Cómo citar:** Gómez-Balanta, F.Z.; Ramírez-Náder, L.M. 2022. Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2057. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2057>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** octubre 8 de 2021

**Aceptado:** noviembre 8 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Los ecosistemas altoandinos o de alta-montaña, se caracterizan por prestar servicios ecosistémicos esenciales, muchos de ellos, relacionados con el suelo; sin embargo, se conoce que las actividades agrícolas y pecuarias han llevado a cambios progresivos en los parámetros físicos, químicos y agotamiento del carbono orgánico y nitrógeno del suelo, contribuyendo a la pérdida de calidad edáfica e incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio evaluó la influencia de tres coberturas vegetales: bosque nativo, pastizal naturalizado de *Pennisetum clandestinum* y monocultivo de *Allium fistulosum*, sobre algunas propiedades del suelo, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca (Colombia). Se midieron propiedades edáficas, como densidad aparente, materia orgánica, contenidos y almacenamiento de C y N. Se encontró que las prácticas agrícolas asociadas al monocultivo influyeron significativamente en las propiedades edáficas evaluadas, generando cambios a nivel físico y químico, lo que podría aumentar la vulnerabilidad del suelo a la degradación. Se observó que los pastizales de *P. clandestinum* (C4), con un manejo del pastoreo de tipo extensivo, baja carga animal, presentaron mayor potencial para acumular C, reciclar N y mitigar el efecto del pisoteo, siempre y cuando, se garantice una gestión óptima del pastoreo, en términos de una carga animal, ambientalmente sostenible. El tipo de

cobertura vegetal y las prácticas de manejo asociadas promovieron cambios físicos y químicos, en los primeros centímetros del suelo, afectando la capacidad del suelo para almacenar C y N, lo que podría incidir en la provisión de Servicios Ecosistémicos.

Palabras clave: Carga animal; *Pennisetum clandestinum*; Monocultivo; Pastizales; Servicios ecosistémicos.

### ABSTRACT

High Andean or high-mountain ecosystems are characterized by providing essential ecosystem services, many of them related to the soil. However, it is known that agricultural and livestock activities have led to progressive changes in the physical and chemical parameters of the soil and depletion of organic carbon and nitrogen, contributing to the loss of edaphic quality and increasing greenhouse gas emissions. This study evaluated the influence of three kinds of plant covers: native forest, *Pennisetum clandestinum* naturalized grassland, and *Allium fistulosum* monoculture, on some soil properties in a high Andean ecosystem of Valle del Cauca (Colombia). The edaphic properties measured were: bulk density, soil organic matter, C and N contents, and storage. It was found that the agricultural practices associated with monoculture significantly influenced the evaluated edaphic properties, generating changes at a physical and chemical level, which

could increase the vulnerability of the soil to degradation. It was observed that the grasslands of *P. clandestinus* (C4), with extensive grazing management, and a low stocking rate, presented the greater potential to accumulate C, recycle N and mitigate the trampling effect, as long as optimal management is guaranteed in terms of environmentally sustainable stocking load. The kind of vegetation cover and the associated management practices, promoted physical and chemical changes, in the first centimeters of the soil, affecting the soil's capacity to store C and N, which could affect the provision of Ecosystem Services.

Keywords: Animal load; *Pennisetum clandestinum*; Ecosystem services; Grassland; Monoculture.

## INTRODUCCIÓN

La región andina de Colombia abarca 24,52 % del territorio nacional y se caracteriza por su alta diversidad y por tener paisajes complejos, en donde confluyen diferentes usos y niveles de intensificación del suelo, entre ellos, agroecosistemas de cultivos y pastizales para la producción ganadera (Rodríguez *et al.* 2006). En el Valle del Cauca, específicamente en la región de alta-montaña del municipio de El Cerrito, corregimiento de Tenerife, se pueden identificar paisajes diversos, en los que convergen áreas de conservación, monocultivos de cebolla de rama y ganadería bovina extensiva.

Las características climáticas, el tipo de vegetación y los suelos de las zonas de alta-montaña están relacionadas con una importante provisión de servicios ecosistémicos (SE), que brindan beneficios ecológicos, sociales y económicos, muchos de ellos, relacionados con el suelo, que ha estado sujeto a cambios, debido a la gestión e intensificación agropecuaria (Eze *et al.* 2018a; 2018b; Pérez *et al.* 2019; Piñeiro *et al.* 2010).

El suelo cumple un rol imprescindible no solo en la producción agraria, sino también en el equilibrio de los ecosistemas, a través de diversas funciones y SE esenciales, como el ciclaje de nutrientes, la regulación ambiental, la producción de alimentos y forrajes (Canedoli *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018b), relacionados con los contenidos de carbono orgánico (COS) (Daynes *et al.* 2013) y nitrógeno del suelo (NS) (Duan *et al.* 2020). En las últimas décadas, el cambio del uso del suelo, sin tener en cuenta su potencial, lo ha expuesto a múltiples amenazas, afectando su función y capacidad de proveer SE (Viaud *et al.* 2018), generando reducción de la productividad (Bieluczyk *et al.* 2020), agotamiento progresivo de las reservas de COS y de NS e incremento de las emisiones de GEI (Bieluczyk *et al.* 2020; Duan *et al.* 2020).

El COS y el NS influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas, que combinados intervienen sobre el ciclo de otros nutrientes y propiedades emergentes (fertilidad, salud, sostenibilidad y resiliencia), que mejoran y conservan la productividad agrícola y la seguridad alimentaria (Wang *et al.* 2018). Ambos, se utilizan para evaluar la sostenibilidad e impactos de los agroecosistemas (Bieluczyk *et al.* 2020), debido a que sus contenidos están influenciados por procesos ecológicos, clima, topografía, tipo de

vegetación (C4 o C3), propiedades y gestión del suelo (Alves *et al.* 2020; Duan *et al.* 2020; Wang *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2021).

El COS desempeña un importante papel en la regulación de SE de soporte, regulación y aprovisionamiento (Canedoli *et al.* 2020), por ello, desempeña funciones que afectan directa e indirectamente las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo (Alves *et al.* 2020; Bieluczyk *et al.* 2020), influyendo sobre la capacidad productiva edáfica, la mitigación del cambio climático y la seguridad alimentaria (Alves *et al.* 2020; Bondaruk *et al.* 2020; Canedoli *et al.* 2020). Por su parte, el NS está involucrado en diversas funciones edáficas y tiene una relación estrecha con el C, como componentes estructurales de la MOS; la dinámica del N puede restringir los flujos de C y la acumulación de COS (Piñeiro *et al.* 2010). Las principales entradas de N en los suelos son la hojarasca, la orina y el estiércol depositado por los animales, la fijación simbiótica y libre de N y la deposición de N<sub>2</sub> (Zhang *et al.* 2021).

La inadecuada gestión agrícola y la alta intensidad de pastoreo influyen en la dinámica del COS y NS (Alves *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018a; 2018b), ya que muchas de las actividades de manejo sobre cultivos y pastizales buscan modificar el estado de algunas propiedades edáficas, generando condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas (Eze *et al.* 2018a); sin embargo, podrían ser contraproducentes para la conservación de la calidad del suelo, con relación a la respuesta del COS y NS a diferentes manejos (Alves *et al.* 2020).

El objetivo de este estudio fue medir, en condiciones reales, el efecto de tres tipos de cobertura vegetal (bosque natural latifoliado, pastizal naturalizado de kikuyo y monocultivo de cebolla de rama), sobre los contenidos de C y N edáficos a diferente profundidad, en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca-Colombia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Caracterización del área de estudio.** El estudio se desarrolló en un agroecosistema ubicado en Tenerife, municipio de El Cerrito Valle del Cauca-Colombia, N 3°42'55", O 76°04'44"2", entre los 2.200 y 3.000 m s.n.m., precipitación de 1300 mm/año y temperatura media de 14 °C; zona de influencia de los páramos: Las Hermosas, Las Domínguez, Pan de Azúcar y Valle Bonito (CVC & FUNAGUA, 2011). A través de la recolección de información biofísica-productiva y georreferenciación del predio, se identificaron tres tipos de coberturas vegetales predominantes:

- Relictos de vegetación nativa, dentro de un ecosistema de Bosque frío húmedo en montaña fluvio-gravitacional (BOFHUMH) del Oroboma medio de Los Andes (CVC & FUNAGUA, 2011), con registros de flora, como *Ceroxylon alpinum* Bonpl. ex DC. (Arecaceae), *Beilschmiedia tovarensis* (Klotzsch & H. Karst. ex Meisn.) Sach. Nishida (Lauraceae), *Trophis caucana* (Pittier) C.C. Berg (Moraceae), *Montanoa quadrangularis* Schultz Bipontianus (Asteraceae), *Juglans neotropica* Diels (Juglandaceae), *Cecropia telealba* Cuatrec (Urticaceae) (CVC & FUNAGUA, 2011).

- b) Pastizales naturalizados, con predominancia de *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. (Poaceae) (>100 años de edad), con escasa presencia de árboles y ejemplares de Palma de Cera, *C. alpinum*; ganadería tipo extensiva, con una carga animal promedio de 0,54 unidad animal por hectárea (UA/ha), en áreas de ladera. Con división de potreros y rotación de los bovinos según la disponibilidad forrajera.
- c) Monocultivos de cebolla *Allium fistulosum* L. (Amaryllidaceae), (establecidos >45 años), sobre un relieve ligeramente ondulado (pendientes <7 %), caracterizados por un manejo de labranza convencional, aplicación constante de gallinaza, enmiendas para corregir el pH del suelo y biocidas para el control de plagas y enfermedades. Representando la principal actividad agrícola y económica de los productores de la zona.

**Criterios para la selección de los sitios de muestreo.** Los sitios de muestreo se seleccionaron, de acuerdo con los criterios que se presentan en la tabla 1. Para cada una de las zonas de muestreo, se tomaron tres muestras a dos profundidades (n = 42). Los porcentajes de pendiente, se determinaron según lo establecido por la Corporación Regional Autónoma del Valle del Cauca (CVC), que indica que suelos aptos para el pastoreo tienen pendientes < 25 %.

Tabla 1. Criterios de selección de los sitios de muestreo, con el fin de medir el efecto de tres tipos de cobertura vegetal (bosque natural, pastizal naturalizado de kikuyo y monocultivo de cebolla de rama), sobre los contenidos de C y N edáficos, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Criterios			Abreviatura
Cobertura vegetal	Altitud (m s.n.m.)	Pendiente (%)	
Bosque Natural	BN*	A (2.800-2.900)	BNA
		B (2.600-2.700)	BNB
Pastizales	P	A (2.800-2.900)	PAp1
		A (2.800-2.900)	PAp2
		B (2.600-2.700)	PBp1
		B (2.600-2.700)	PBp2
Monocultivo de cebolla	MC	2.200-2.300	MC

\* En BN solo se consideró la altitud como variable determinante, debido a que el porcentaje de la pendiente de esta zona siempre fue > 25 %.

**Análisis estadístico.** Se llevó a cabo un ANOVA, a través del procedimiento GLM, estableciendo las significancias estadísticas de los factores: cobertura vegetal y profundidad de muestreo; las diferencias entre medias fueron comparadas mediante prueba de Duncan (P <0,05) y la relación entre las variables mediante los coeficientes de correlación de Pearson (r) (5 %), a través del software estadístico SAS® 9.4.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades físicas y químicas del suelo

**Densidad aparente (DA).** Entre las profundidades de muestreo del suelo se encontraron diferencias; se detectó que, a medida

### Muestreo y análisis de suelos

**Propiedades físicas y químicas.** Los muestreos del suelo se realizaron a dos profundidades: 0-10 cm y de 10-20 cm. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente (24 °C), molidas y tamizadas (2,0 mm). La densidad aparente se midió utilizando el método del anillo volumétrico (Blake & Hartge, 1986); la materia orgánica del suelo con el método de Walkley & Black (1934); el pH por agua 1:1 (Collins *et al.* 1970) y la capacidad de intercambio catiónico por amonio acetato (Rhoades, 1982).

**Contenidos de carbono y nitrógeno.** Los porcentajes de carbono y nitrógeno total se determinaron por combustión seca. Los almacenamientos de COS y NT (Mg/ha), se calcularon con base en las ecuaciones de Abdalla *et al.* (2018) y Eze *et al.* (2018b), donde COS = carbono orgánico del suelo, NT: nitrógeno total, C: carbono (%), N: nitrógeno (%), DA: densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) y p: profundidad del suelo (cm).

$$\text{Almacenamiento COS (Mg/ha)} = C \times DA \times p \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Almacenamiento NT (Mg/ha)} = N \times DA \times p \quad \text{Ecuación 2}$$

que aumentó la profundidad del suelo, también incrementó la DA (Tabla 2), asociado con que la biomasa radical de las plantas disminuye y, con ello, se reduce la actividad de la fauna edáfica y los contenidos de COS y MOS; resultados similares fueron reportados por Daza Torres *et al.* (2014) y Zhang *et al.* (2021).

No hubo diferencias entre las coberturas vegetales BN y P, pero sí con MC, que presentó valores más altos (Tabla 2). La mayor DA en MC se asoció con las prácticas de manejo que, a través del tiempo, han cambiado las propiedades físicas, químicas y biológicas (Daynes *et al.* 2013). A pesar de las aplicaciones permanentes de material orgánico al monocultivo por parte del productor, la perturbación del suelo, la escasa cobertura vegetal acompañante y la intensidad de labranza, se refleja en el agotamiento de MOS, resultando en

Tabla 2. Valores medios de densidad aparente, pH, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica del suelo en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Cobertura vegetal	DA			pH			CIC			MOS				
	g/cm <sup>3</sup>			H <sub>2</sub> O			cmol/kg			g/kg				
	-	X	cm	0-10	10-20	cm	-	X	cm	0-10	10-20	cm	-	X
BNA	0,57 ± 0,1C	0,54 ± 0,1Bb	0,60 ± 0,1a	5,92 ± 0,2DE	5,83 ± 0,1a	5,83 ± 0,1a	46,55 ± 10,8A	49,57 ± 11,1a	43,53 ± 10,4b	186,13 ± 17,4a	159,48 ± 22,6 B	43,53 ± 10,4b	186,13 ± 17,4a	132,84 ± 27,7b
BNB	0,68 ± 0,1BC	0,53 ± 0,0Bb	0,84 ± 0,1a	6,46 ± 0,2B	6,55 ± 0,1a	6,38 ± 0,2a	33,03 ± 8,4B	39,10 ± 7,2a	26,97 ± 9,7b	170,49 ± 26,8a	135,05 ± 36,3 B	26,97 ± 9,7b	170,49 ± 26,8a	99,61 ± 45,9b
PAp1	0,62 ± 0,0BC	0,61 ± 0,0Bb	0,63 ± 0,1a	6,08 ± 0,0DC	6,12 ± 0,0a	6,12 ± 0,0a	46,12 ± 2,9A	46,07 ± 3,0a	46,17 ± 2,9b	208,74 ± 11,2a	198,56 ± 17,4A	46,17 ± 2,9b	208,74 ± 11,2a	188,37 ± 23,7b
PAp2	0,60 ± 0,1BC	0,58 ± 0,0Bb	0,62 ± 0,1a	6,13 ± 0,1C	6,05 ± 0,0a	6,21 ± 0,1a	48,8 ± 3,9A	52,80 ± 5,4a	44,80 ± 2,3b	226,06 ± 15,4a	202,42 ± 16,1A	44,80 ± 2,3b	226,06 ± 15,4a	178,77 ± 16,8b
PBp1	0,63 ± 0,1BC	0,58 ± 0,1Bb	0,67 ± 0,1a	5,88 ± 0,1E	5,85 ± 0,0a	5,93 ± 0,1a	43,35 ± 3,1AB	45,60 ± 3,9Aa	41,10 ± 2,3b	225,82 ± 23,3a	194,43 ± 21,2A	41,10 ± 2,3b	225,82 ± 23,3a	163,03 ± 19,1b
PBp2	0,7 ± 0,1B	0,61 ± 0,0Bb	0,80 ± 0,1a	5,79 ± 0,1E	5,84 ± 0,1a	5,74 ± 0,1a	45,48 ± 6,2A	47,40 ± 5,0a	43,57 ± 7,4b	195,34 ± 9,1a	179,57 ± 8,6 AB	43,57 ± 7,4b	195,34 ± 9,1a	163,79 ± 8,1b
MC	1,13 ± 0,1A	1,09 ± 0,1Ab	1,16 ± 0,1a	6,95 ± 0,1A	6,89 ± 0,1a	7,01 ± 0,1a	18,16 ± 3,9C	17,85 ± 4,0a	18,47 ± 3,8b	62,39 ± 8,3a	60,81 ± 8,6C	18,47 ± 3,8b	62,39 ± 8,3a	59,22 ± 8,9b

Valores medios ( $\pm$  error estándar). Profundidad de muestreo: 0-10 y 10-20 cm. DA: densidad aparente. pH: potencial de hidrógeno en agua. CIC: capacidad de intercambio catiónico. MOS: materia orgánica del suelo. Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC) y la minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ( $P < 0,05$ ). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

cambios de características físicas, como la DA (Daza Torres *et al.* 2014; Ordoñez *et al.* 2015) y una mayor compactación (Canedoli *et al.* 2020; Lin *et al.* 2020). Se observaron correlaciones negativas entre DA con MOS, COS y N (Figura 1), resultados que coinciden con los reportados por Ordoñez *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2021).

No hubo diferencias significativas entre los valores de DA en BN y P. La DA encontrada en P, se relacionó con la baja carga animal y la cobertura vegetal permanente de *P. clandestinus* que, por su hábito de crecimiento estolonífero, promueve la porosidad (Muñoz *et al.* 2014), aumenta los contenidos de MOS y crea un colchón que mitiga

Variables		pH	MO	CIC	%C	StockC	%N	DA
MO	r	-0.66233	1					
	p	<.0001						
CIC	r	-0.69836	0.90627	1				
	p	<.0001	<.0001					
%C	r	-0.56237	0.97973	0.86416	1			
	p	0.0001	<.0001	<.0001				
StockC	r	-0.11843	0.44219	0.29924	0.54878	1		
	p	0.4551	0.0034	0.0542	0.0002			
%N	r	-0.64582	0.97766	0.85868	0.96264	0.44485	1	
	p	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0032		
DA	r	0.66403	-0.83920	-0.84299	-0.76016	0.08543	-0.80145	1
	p	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.5906	<.0001	

Figura 1. Correlaciones de Pearson significativas ( $P < 0,05$ ) para propiedades del suelo. pH: pH, MO: Materia Orgánica, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico, %C: porcentaje de carbono, StockC: almacenamiento de C, %N: porcentaje de nitrógeno, DA: densidad aparente en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

el impacto del pisoteo del ganado (Pérez *et al.* 2019), disminuyendo la susceptibilidad a la compactación, resultados que coinciden con estudios realizados en ecosistemas ganaderos similares del país (Molina-Benavides & Sánchez-Guerrero, 2017; Ordoñez *et al.* 2015).

**pH.** No hubo diferencias significativas del pH del suelo en las profundidades evaluadas. A nivel de coberturas vegetales y altitud se presentaron diferencias (Tabla 2). El pH del suelo en BN y P, según la clasificación Soil Survey Division Staff, estuvo entre mediana y ligeramente ácido; en MC, se encontró un pH neutro, asociado a las labores agrícolas desarrolladas. De acuerdo con Viaud *et al.* (2018) y Whalen *et al.* (2000), las prácticas culturales, como la aplicación de enmiendas y la fertilización de los monocultivos, pueden generar cambios en el pH del suelo, lo que podría modificar, entre otras funciones, la acumulación de C. Eze *et al.* (2018b) señalan que las condiciones ácidas, junto con la humedad edáfica natural podrían potencializar los contenidos y el almacenamiento de C en zonas de alta-montaña.

La tendencia a la acidez en BN y P coinciden con otros estudios desarrollados en ecosistemas de alta-montaña del país, como, por ejemplo, Muñoz *et al.* (2014) y Ordoñez *et al.* (2015). Los suelos de alta-montaña, se caracterizan por ser naturalmente ácidos por su origen volcánico (Ordoñez *et al.* 2015). La acidez del suelo es una propiedad relacionada con la dinámica del C, pues este tiende a acumularse en condiciones ácidas, debido a la restringida descomposición de materiales orgánicos (Eze *et al.* 2018b). Se ha reportado que pastizales con suelos de pH ácido, en los primeros 15 cm de profundidad, pueden almacenar más C (82 Mg/ha/año), en comparación a pastizales con suelos neutros (61 Mg/ha/año) (Carey *et al.* 2008). Leifeld *et al.* (2013) sostienen que el pH del suelo debería ser clave en la evaluación de la renovación global de C y N, ya que por cada unidad de pH de acidificación se podría

incrementar el tiempo promedio de residencia de los depósitos de COS, del 22 al 86 %.

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** Se evidenciaron diferencias entre las profundidades evaluadas. Entre BNA y P no se encontraron diferencias significativas, pero sí con BNB y MC (Tabla 2). Los valores medios de CIC (cmol/kg) en P fueron: PAp2: 48,8; PAp1: 46,1; PBp2: 45,5; PBp1: 43,3; para los bosques BNA: 46,5 y BNB: 33,0 y para MC: 18,1. Los valores altos de CIC en P y BN, se asociaron con la relación directa de CIC con MOS y COS (Figura 1), debido a que MOS y C son responsables entre el 25 y 90 % de la CIC total de las capas superficiales en suelos minerales (Gómez-Vargas *et al.* 2017).

**Materia Orgánica del Suelo (MOS).** Hubo diferencias entre coberturas vegetales (Figura 2) y profundidades; la pendiente no incidió sobre los contenidos de MOS en P (Tabla 2). A medida que aumentó la profundidad disminuyeron los contenidos de MOS y se asoció al aporte directo de MO de la biomasa radical, así como las poblaciones edáficas, que son más activas en la rizosfera y disminuyen a medida que se profundiza en el perfil del suelo.

Los contenidos de MOS en BN y P fueron más altos en comparación con MC. En PAp1, PAp2 y PBp1, se encontraron medias superiores a 194 g/kg (198,56; 202,42; 194,43 g/kg, respectivamente), mientras que, en BNA, BNB y PBp2, los contenidos de MOS estuvieron entre 135 y 180 g/kg (159,48; 135,05; 179,57 g/kg, respectivamente). En contraste, el contenido de MOS en MC fue de 60,81 g/kg. Estos resultados evidencian un efecto directo de las prácticas de manejo sobre las cantidades de MOS (Viaud *et al.* 2018), más cuando promueven la perturbación y la descomposición de MOS, COS y NS (Wang *et al.* 2018).

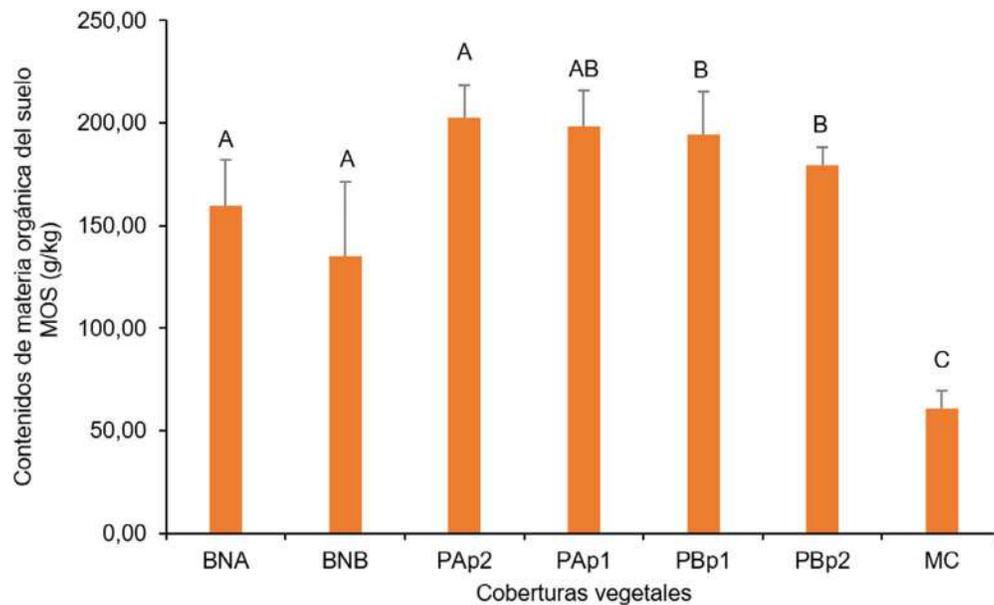


Figura 2. Contenidos de materia orgánica del suelo (0-20 cm) en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia.

Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC), mediante la prueba Duncan ( $P < 0,05$ ). Medias con la misma letra no presentaron diferencias significativas.

Los mayores contenidos de MOS en P en comparación a BN, se asociaron con entradas permanentes de C y N al suelo (Bondaruk *et al.* 2020), relacionados con el tipo de vegetación (C4), el hábito de crecimiento, el aporte de biomasa de las raíces (Leifeld *et al.* 2013), la alta capacidad de rebrote del *P. clandestinus* (Pérez *et al.* 2019), las deposiciones de excretas/orina (Bieluczyk *et al.* 2020) y el efecto del pastoreo, que conlleva a una permanente muerte y renovación de raíces, favoreciendo la acumulación de MOS (Daynes *et al.* 2013; Viaud *et al.* 2018). Estos hallazgos, se han reportado para *Urochloa brizantha* (Hochst ex a. Rich.) Stapf cv Piata, en Brasil (Bieluczyk *et al.* 2020); en pastizales de ryegrass *Lolium perenne* L. (Poaceae), en Francia (Viaud *et al.* 2018) y *P. clandestinus*, en Colombia (Pérez *et al.* 2019).

**Contenido y almacenamiento de carbono y nitrógeno.** Los contenidos de C y N presentaron diferencias entre coberturas vegetales y profundidades (Figura 3; Tabla 3). La pendiente no tuvo efecto sobre los porcentajes de C y N en P. Los P presentaron valores más altos de C y N en comparación con los BN y MC (Figura 3). Aunque no hubo diferencias entre los P, se evidenció un efecto positivo de la altitud sobre los contenidos de C y N, ya que los pastizales ubicados a mayor altitud (2.800-2.900 m s.n.m.) presentaron mayores porcentajes de C (PAp2: 12,1; PAp1: 11,8) y N (PAp1: 1,17, PAp2: 1,29), en comparación a los P de la altitud B (2-600-2-700 m s.n.m.), PBp1: 11,8 %; PBp2: 10,8 % de C, y PBp1: 1,19 %, PBp2: 1,05 % de N. Zhang *et al.* (2021) señalan que las existencias de C y N están afectadas por el clima, la altitud y el tipo de vegetación. MC presentó menores contenidos de C y N (3,5 y 0,25 %, respectivamente), demostrando que las labores agrícolas intensivas pueden agotar la MOS y tener implicaciones negativas sobre los contenidos de C y N, la fertilidad y estructura (Alves *et al.* 2020; Eze *et al.* 2018a; Piñeiro *et al.* 2010).

Hubo una relación estrecha entre los contenidos de C y N (Figura 1), lo que concuerda con Lin *et al.* (2020), Piñeiro *et al.* (2010) y Zhang *et al.* (2021), quienes informaron que los cambios en las existencias (agotamiento o acumulación) de C o N, generalmente, promueve pérdidas o ganancias del otro elemento, cambios en C:N, a mediano-largo plazo y que el potencial de captura de COS está reforzado por la acumulación de N. Estudios en agroecosistemas de alta-montaña en Colombia reportaron pastizales con contenidos de COS y N similares y mayores, que cultivos y/o bosques de la región (Muñoz *et al.* 2014; Ordoñez *et al.* 2015; Valenzuela B. & Visconti M., 2018).

Los contenidos de C y N en los BN no presentaron diferencias entre ellos (BNA: 9,6 % BNB: 8,2 % de C y BNA: 0,84 %, BNB: 0,73 % de N); se esperaba que los porcentajes de C y N, en BN fueran superiores a los de P, pero los resultados mostraron que en P hubo mayores contenidos de C y N; coincidiendo con Ordoñez *et al.* (2015). Estos resultados, se asociaron con las características diferenciadas entre la vegetación del bosque (mayoritariamente C3) y los pastizales (C4), así como a la distribución radical y el lugar de depósito de la biomasa, que en los bosques permanece durante un largo periodo sobre el suelo como mantillo (Pérez *et al.* 2019; Ordoñez *et al.* 2015), mientras que, en los pastizales, se deposita dentro del suelo.

El aumento de los niveles de COS en pastizales tropicales (C4), como *P. clandestinus*, está relacionado a la capacidad del pasto para adaptarse y compensar la acción del pastoreo (Abdalla *et al.* 2018), la alta biomasa radical, que favorece el aporte e incremento de COS en los primeros centímetros del suelo (Canedoli *et al.* 2020; Pérez *et al.* 2019) y el almacenamiento de nutrientes, en comparación a sistemas de cultivos no perennes o pastizales, dominados por C3 y/o pastizales mixtos (C3/C4) (Abdalla *et al.* 2018).

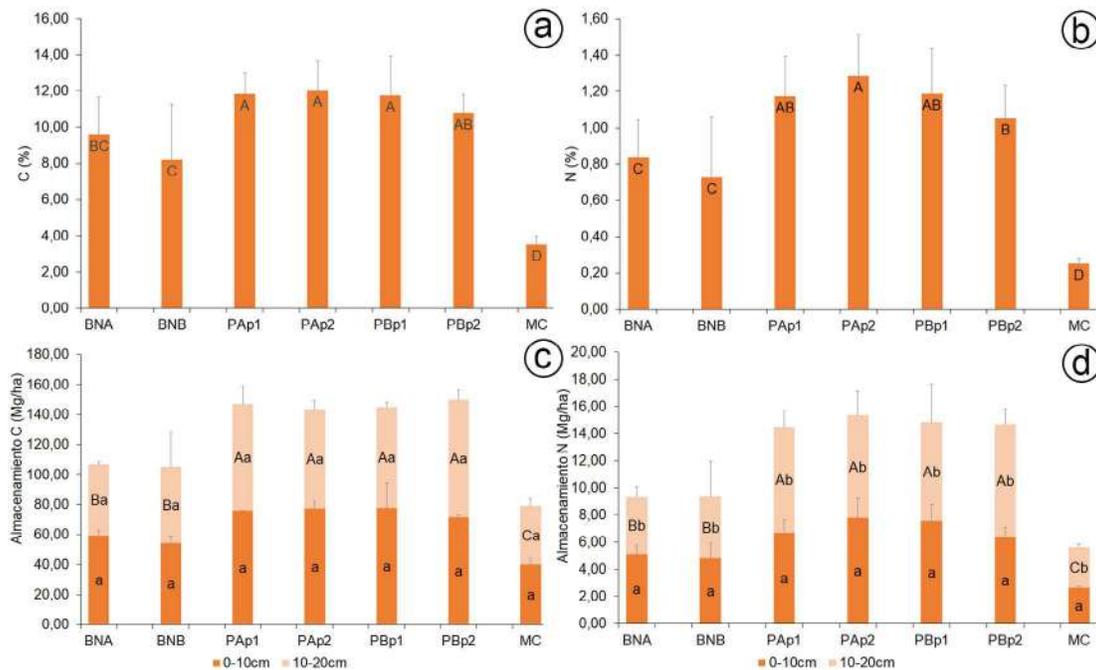


Figura 3. Contenidos y almacenamiento de carbono y nitrógeno del suelo en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia. a) Porcentajes de carbono; b) Porcentajes de nitrógeno; c) almacenamiento de carbono; d) almacenamiento de nitrógeno.

Las letras mayúsculas comparan las coberturas vegetales (BN, P y MC) y las minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ( $P < 0,05$ ). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

Tabla 3. Carbono, nitrógeno y C:N en las coberturas: bosque natural, pastizales y monocultivo de cebolla, en un ecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia, a dos profundidades de muestreo.

Cobertura vegetal	C %		N %		C:N	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
BNA	11,1 ± 1,1a	8,1 ± 1,7b	1,0 ± 0,2a	0,7 ± 0,2b	11,7 ± 0,9b	11,6 ± 2,3a
BNB	10,3 ± 1,6a	6,1 ± 2,8b	0,9 ± 0,3a	0,5 ± 0,3b	11,6 ± 1,8b	15,9 ± 13,7a
PBp1	13,5 ± 1,5a	10,1 ± 1,0b	1,3 ± 0,1a	1,1 ± 0,3b	10,3 ± 0,6b	10,1 ± 3,4a
PBp2	11,7 ± 0,6a	9,9 ± 0,3b	1,1 ± 0,2a	1,1 ± 0,2b	11,3 ± 1,5b	9,7 ± 1,9a
PAp1	12,5 ± 0,5a	11,2 ± 1,4b	1,1 ± 0,1a	1,3 ± 0,3b	11,5 ± 1,7b	9,3 ± 2,1a
PAp2	13,3 ± 0,9a	10,8 ± 1,0b	1,3 ± 0,3a	1,2 ± 0,2b	10,1 ± 1,4b	9,1 ± 2,3a
MC	3,6 ± 0,5a	3,4 ± 0,5b	0,2 ± 0,0a	0,3 ± 0,0b	15,1 ± 1,0b	13,1 ± 2,1a

Valores medios ( $\pm$  error estándar). Carbono (C), Nitrógeno (N), relación carbono:nitrógeno (C:N). Profundidad de muestreo: 0-10 y 10-20 cm. Las letras minúsculas comparan las profundidades de muestreo, mediante la prueba Duncan ( $P < 0,05$ ). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas.

Frank (2020) y Pérez *et al.* (2019) señalan que los contenidos y la disponibilidad de C y N en los pastizales, se pueden atribuir a que: a) los ungulados favorecen la acumulación de C, aportando MOS y nutrientes, por la adición de heces-orina y la muerte de raíces en respuesta al pastoreo, además transforman el N vegetal a formas más disponibles; b) el pastoreo aumenta la exudación de compuestos orgánicos lábiles, que estimulan la actividad microbiana, las tasas de mineralización y la disponibilidad de N inorgánico; además conserva la humedad del suelo, factor que favorece la disponibilidad de NS (Frank, 2020).

Hubo diferencias en el almacenamiento de C y N entre las coberturas vegetales (Figura 3). No se evidenciaron diferencias del almacenamiento de C entre profundidades, contrario al almacenamiento de N, en donde la profundidad del suelo, sí tuvo un efecto significativo. Los P presentaron mayor almacenamiento de C y N (Mg/ha), seguido de BN y MC (Figura 3). Los bajos valores en MC, además de estar relacionados con la gestión del suelo (Piñeiro *et al.* 2010), se podrían asociar con la duración del cultivo, pues se ha encontrado que los cultivos anuales o semestrales tienen menor capacidad de almacenar C, en comparación a las plantas perennes (Pérez *et al.* 2019).

La capacidad de almacenamiento de C y N de los P permite inferir que los pastizales pueden ser una opción viable para proveer beneficios (tanto ambientales como económicos) (Piñeiro *et al.* 2010). Según Eze *et al.* (2018b), los pastizales de alta-montaña, en los primeros 15 cm de profundidad, pueden almacenar cantidades significativas de COS ( $58,93 \pm 3,50$  a  $100,69 \pm 8,64$  Mg/ha) y se ha sugerido que *P. clandestinus*, por su alta capacidad de producción de biomasa aérea y subterránea, se podría considerar una gramínea importante en el secuestro de C y en la mitigación de la emisión de GEI (Pérez *et al.* 2019), siempre y cuando sea gestionada con prácticas de manejo adecuadas (Pérez *et al.* 2019) y bajo un sistema de pastoreo, ambientalmente sostenible (Alves *et al.* 2020; Soussana & Lemaire, 2014), buscando el equilibrio entre lo ambiental y lo económico-productivo.

El potencial de los bosques y pastizales altoandinos para secuestrar C hacen que estos sean claves en la mitigación del cambio climático, el mejoramiento de la salud del suelo y la provisión de SE (Canedoli *et al.* 2020). Es necesario evaluar pastizales en ecosistemas similares con mayores intensidades de pastoreo, así como la estabilidad del C y N almacenado, ajustando una carga animal, ambientalmente sostenible, que tenga en cuenta la oferta ecosistémica y la demanda productiva.

El tipo de cobertura vegetal y las prácticas de manejo asociadas promovieron cambios físicos y químicos edáficos, en los primeros centímetros de profundidad, afectando la capacidad del suelo para almacenar C y N, lo que podría incidir en la provisión de SE. Se sugiere, que la gestión de los agroecosistemas debería promover integridad edáfica, conservación de la MOS, almacenamiento de C y N, aplicando enfoques básicos de cuidado del suelo, integración de cultivos y cobertura vegetal multipropósito permanente. Finalmente, estos resultados pueden dar una visión distinta de la ganadería, pues con una gestión ajustada a las condiciones ecosistémicas específicas, podría ser una aliada multifuncional, para mitigar el cambio climático, ofrecer SE y seguridad alimentaria.

**Agradecimientos.** A Minciencias y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, por la financiación. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado por los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHADWICK, D.R.; JONES, D.L.; EVANS, C.D.; JONES, M.B.; REES, R.M.; SMITH, P. 2018. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 253:62-81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023>
2. ALVES, L.A.; DENARDIN, L.G. DE O.; MARTINS, A.P.; BAYER, C.; VELOSO, M.G.; BREMM, C.; CARVALHO, P.C. DE F.; MACHADO, D.R.; TIECHER, T. 2020. The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*. 203:104678. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678>
3. BIELUCZYK, W.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; PEREIRA, M. G.; DE MORAES, M.T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A.C. DE C.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; MOREIRA, M.Z.; CAMARGO, P.B.; DOS SANTOS DIAS, C.T.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M.R. 2020. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*. 371:114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
4. BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2 Ed. American Society of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America, Inc. p.363-375. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
5. BONDARUK, V.; LEZAMA, F.; DEL PINO, A.; PIÑEIRO, G. 2020. Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms. *Science of the Total Environment*. 743:140771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140771>
6. CANEDOLI, C.; FERRÈ, C.; ABU EL KHAIR, D.; COMOLLI, R.; LIGA, C.; MAZZUCHELLI, F.; PROIETTO, A.; ROTA, N.; COLOMBO, G.; BASSANO, B.; VITERBI, R.; PADOA-SCHIOPPA, E. 2020. Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*. 44:101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>
7. CAREY, P.D.; WALLIS, S.; CHAMBERLAIN, P.M.; COOPER, A.; EMMETT, B.A.; MASKELL, L.C.; MCCANN, T.; MURPHY, J.; NORTON, L.R.; REYNOLDS, B.; SCOTT, W.A.; SIMPSON, I.C.; SMART, S.M.; ULLYETT, J.M. 2008. Chapter 4 Semi-Natural grasslands: neutral, calcareous and acid grassland broad habitats. In: *Countryside Survey: UK Results from 2007*. Countryside Survey. p.38-49.
8. COLLINS, J.B.; WHITESIDE, E.P.; CRESS, C.E. 1970. Seasonal variability of pH and lime requirements in several Southern Michigan soils when measured in different ways. *Soil Science Society of America Journal*. 34(1):56-61. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400010018x>
9. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC.; FUNDACIÓN AGUA VIVA, FUNAGUA. 2011. Planes de manejo para la conservación de 22 especies focales de plantas en el departamento del Valle del Cauca. CVC-FUNAGUA (Cali-Colombia). 258p.

10. DAYNES, C.N.; FIELD, D.J.; SALEEBA, J.A.; COLE, M.A.; MCGEE, P.A. 2013. Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots. *Soil Biology and Biochemistry*. 57:683-694.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.020>
11. DAZA TORRES, M.C.; HERNÁNDEZ FLÓREZ, F.; TRI-ANA, F.A. 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 67(1):7189-7200.  
<https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
12. DUAN, B.; MAN, X.; CAI, T.; XIAO, R.; GE, Z. 2020. In-creasing soil organic carbon and nitrogen stocks along with secondary forest succession in permafrost region of the Daxing'an mountains, northeast China. *Global Ecology and Conservation*. 24:e01258.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01258>
13. EZE, S.; PALMER, S.M.; CHAPMAN, P.J. 2018a. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands. *Geoderma*. 314:175-183.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.017>
14. EZE, S.; PALMER, S.M.; CHAPMAN, P.J. 2018b. Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *Journal of Environmental Management*. 223:74-84.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013>
15. FRANK, D.A. 2020. Grazing effects on plant nitrogen use in a temperate grassland. *Rangeland Ecology and Management*. 73(4):482-490.  
<https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.03.002>
16. GÓMEZ-VARGAS, R.M.; HERNÁNDEZ-HOYOS, E.R.; GUARDIOLA-PERILLA, M.L.; BONILLA-CORREA, C.R. 2017. Dinámica entre propiedades químico-físicas y biológicas del suelo como respuesta a diferentes insumos orgánicos. *Suelos Ecuatoriales*. 47(1-2):53-60.
17. LEIFELD, J.; BASSIN, S.; CONEN, F.; HAJDAS, I.; EGLI, M.; FUHRER, J. 2013. Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland. *Biogeochemistry*. 112:59-69.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-011-9689-5>
18. LIN, D.; MCCULLEY, R.L.; NELSON, J.A.; JACOBSEN, K.L.; ZHANG, D. 2020. Time in pasture rotation alters soil microbial community composition and function and increases carbon sequestration potential in a temperate agroecosystem. *Science of the Total Environment*. 698:134233.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134233>
19. MOLINA-BENAVIDES, R.A.; SÁNCHEZ-GUERRERO, H. 2017. Sostenibilidad de sistemas ganaderos bovinos de alta montaña en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 8(2):29-36.  
<https://doi.org/10.22490/21456453.2028>
20. MUÑOZ, F.A.; PEREZ, E.H.; OTERO S., J.D. 2014. Susceptibilidad a la erosión hídrica de suelos en la zona andina del departamento del Cauca Colombia. *Revista de Investigaciones, Universidad del Quindío*. 26(1):45-50.
21. ORDOÑEZ, M.C.; GALICIA, L.; FIGUEROA, A.; BRAVO, I.; PEÑA, M. 2015. Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology* 71:28-36.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.001>
22. PÉREZ, M.; MEDINA, M.F.; HURTADO, A.; ARBOLEDA, E.M.; MEDINA, M. 2019. Reservas de carbono del pasto *Cenchrus clandestinus* (Poaceae) en los sistemas de manejo tradicional y silvopastoril, en diferentes relieves. *Revista de Biología Tropical*. 67(4):769-783.  
<https://doi.org/10.15517/rbt.v67i4.34529>
23. PIÑEIRO, G.; PARUELO, J.M.; OESTERHELD, M.; JOBBÁGY, E.G. 2010. Pathways of grazing effects on soil organic carbon and nitrogen. *Rangeland Ecology and Management*. 63(1):109-119.  
<https://doi.org/10.2111/08-255.1>
24. RHOADES, J. 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America. Inc. p.149-157.  
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c8>
25. RODRÍGUEZ, N.; ARMENTERAS, D.; MORALES, M.; ROMERO, M. 2006. *Ecosistemas de los Andes colombianos*. Segunda edición. Instituto Alexander Von Humbolt-IAvH (Bogotá-Colombia). 154p.
26. SOUSSANA, J.-F.; LEMAIRE, G. 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190:9-17.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>
27. VALENZUELA B., I.G.; VISCONTI M., E.F. 2018. Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 12(1):233-243.  
<https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349>

28. VIAUD, V.; SANTILLÀN-CARVANTES, P.; AKKAL-CORFINI, N.; LE GUILLOU, C.; PRÉVOST-BOURÉ, N.C.; RANJARD, L.; MENASSERI-AUBRY, S. 2018. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 265:166-177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.018>
29. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1):29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
30. WANG, S.; ADHIKARI, K.; WANG, Q.; JIN, X.; LI, H. 2018. Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C:N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. *Ecological Indicators*. 84:263-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.046>
31. WHALEN, J.K.; CHANG, C.; CLAYTON, G.W.; CARE-FOOT, J.P. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3):962-966. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643962x>
32. ZHANG, Y.; AI, J.; SUN, Q.; LI, Z.; HOU, L.; SONG, L.; TANG, G.; LI, L.; SHAO, G. 2021. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China. *Catena*. 196:104872. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104872>



# Evaluación de la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos del departamento del Cauca, Colombia

## Mobility assessment of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in andic soils of the department of Cauca, Colombia

Juan C. Casas<sup>1</sup> ; Edier H. Pérez<sup>2</sup> ; Jesús D. Hurtado<sup>1</sup> ; Claudia L. Quiroz<sup>1</sup> ; Mauricio Correa<sup>3</sup> ; Edna Cabrera<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Cauca, Departamento de Ingeniería Ambiental. Popayán - Cauca, Colombia; e-mail: jccasas@unicauca.edu.co; davidh@unicauca.edu.co; claudiaquiroz@unicauca.edu.co; ecabrera@unicauca.edu.co

<sup>2</sup>Universidad del Cauca, Departamento de Química. Popayán - Cauca, Colombia; e-mail: ehpere@unicauca.edu.co

<sup>3</sup>Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Sanitaria, Escuela Ambiental. Medellín – Antioquia, Colombia; e-mail: mandres.correa@udea.edu.co

\*autor de correspondencia: ecabrera@unicauca.edu.co

**Cómo citar:** Casas, J.C.; Pérez, E.H.; Hurtado, J.D.; Quiroz, C.L.; Correa, M.; Cabrera, E. 2022. Evaluación de la movilidad del ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ándicos del departamento del Cauca, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1772. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1772>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** noviembre 23 de 2020

**Aceptado:** septiembre 21 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El herbicida ácido 2,4–diclorofenoxiacético (2,4-D) es un ácido selectivo y sistémico que, desde 1940, es ampliamente utilizado en suelo agrícolas, de todo el mundo. Su uso radica a su selectividad entre la vegetación de hoja ancha y cultivos de gramíneas y como regulador del crecimiento vegetal; sin embargo, este herbicida se puede acumular en el ambiente y, adicionalmente, puede ser transportado por lixiviación, a través del suelo, llegando a contaminar aguas subterráneas, lo que genera un alto riesgo para el ambiente y la salud del ser humano. El estudio de la movilidad del 2,4-D en suelos con alto contenido de materia orgánica permitió conocer, que no solo la materia orgánica se correlaciona indirectamente con la movilidad de este compuesto, sino que, también, influye la humedad, al reducir la lixiviación y el potencial de contaminación del recurso hídrico subterráneo, mientras que la conductividad hidráulica se relaciona, de manera directa, con la lixiviación de este herbicida.

Palabras clave: Materia orgánica; Humedad; Conductividad hidráulica; Herbicida selectivo; Contaminantes del suelo.

### ABSTRACT

The herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is a selective and systemic acid that has been widely used in agricultural soils since 1940. Its use lies in its selectivity between broadleaf vegetation and grass crops, and as a regulator of plant growth. However, this herbicide can accumulate in the environment, and additionally, it can be transported by leaching through the soil, contaminating groundwater, which generates a high risk for the environment and human health. In this study, the mobility of 2,4-D in organic-matter-rich soils was assessed. The results revealed that not only the organic material is indirectly correlated with the mobility of this compound but also influences humidity and reduces leaching and potential pollution of groundwater resources, whereas hydraulic conductivity is directly related to herbicide leaching.

Keywords: Organic matter; Humidity; Hydraulic conductivity; Selective herbicide; Soil pollutants.

## INTRODUCCIÓN

El 2,4-D es considerado como el primer herbicida “fenoxi” que fue introducido en Colombia y se le puede encontrar disponible en formulaciones de sal 2,4-DMA, de ácido puro y de éster 2,4-D EHE (Bukowska, 2006). Los herbicidas de ácido fenoxialcanoicos son altamente solubles en agua, pero presentan una adsorción en el suelo relativamente baja (Labrada *et al.* 2000), por esta razón, son susceptibles a contaminar aguas subterráneas por lixiviación. Este hecho recibe bastante atención, ya que el agua subterránea representa alrededor del 98 % del agua dulce disponible de nuestro planeta. Es así, como la Directiva 98/83/CE de la Unión Europea (DOUE, 1998) establece las concentraciones máximas permitidas para los plaguicidas y sus productos en las aguas potables, con el fin de proteger a las personas, contra los efectos nocivos.

En un estudio realizado en Roorkee, India, se evaluó la persistencia y la movilidad de ácido 2,4-D, en la zona no saturada del suelo en condiciones de campo, para la cosecha de trigo (Gupta *et al.* 2012). Se eligieron tres parcelas experimentales para representar el movimiento potencial y la persistencia del herbicida 2,4-D, bajo tres tratamientos de riego. Como resultado, se reportó que la mayor cantidad de herbicida fue retenido en los primeros 15 cm del suelo y su porcentaje de degradación osciló del 60 al 90 %, en 40 días después de aplicado, dependiendo de la parcela.

Por su parte, Morillo *et al.* (2001) corroboraron que con la adición de  $\beta$ -ciclodextrina, como una fase orgánica, se tuvo el 2,4-D en suelo, lo que favoreció la degradación del herbicida, el cual, fue después liberado, lo que disminuyó su lixiviación del 83 al 70 %. En experimentos con suelos de Malasia, Ismail *et al.* (2009), luego de cuatro procesos de desorción realizados a suelos franco arcilloso y arcilloso, encontraron porcentajes totales de desorción de 18,31 y 28,33 %, respectivamente, indicando que no hubo lixiviación completa del compuesto, mientras que se observó un aumento en la adsorción del 2,4-D, con el incremento del contenido de arcillas y la presencia de materia orgánica.

En un estudio llevado a cabo con suelos ácidos del departamento del Cauca en Colombia, por Pérez & Páez (2010), se determinó que la pérdida de los plaguicidas organofosforados clorpirifos y diazinón ocurrió por escorrentía superficial y movilidad en el perfil del suelo, lo que permitió predecir el comportamiento y la dinámica de estos compuestos en la zona no saturada del suelo. Se concluyó, que puede existir una dependencia entre la relación carbono orgánico/arcilla y la adsorción de los plaguicidas al suelo. Además, se reportó que el clorpirifos, se desplazó 15 cm en el perfil del suelo, con 3 eventos de lluvia simulada y a 25 cm de profundidad, con la aplicación de 5 eventos de lluvia. Ambos plaguicidas y sobre todo el clorpirifos, se adsorbieron fuertemente en los primeros 10 cm del suelo, por lo que no lixivian en grandes cantidades a mayores profundidades.

Las propiedades del suelo, como el contenido de carbono orgánico, el pH, la textura, la composición mineralógica y la estructura, así como el uso y la gestión del suelo (aplicación de plaguicidas, tiempo y labranza), el clima de la zona, el subsuelo y las propiedades del

plaguicida, tienen un papel decisivo en el potencial de lixiviación de los herbicidas (Islam *et al.* 2018; Meftaul *et al.* 2020); por ejemplo, la materia orgánica y las arcillas pueden incrementar la capacidad de retención de plaguicidas y extender el tiempo de contacto, para que los procesos, que llevan a la degradación de los contaminantes, permitan la reducción de la contaminación del recurso hídrico (Góngora-Echeverría *et al.* 2019; Gurson *et al.* 2019; Ozbay *et al.* 2017; Ismail *et al.* 2009).

El propósito de esta investigación fue aportar información sobre el comportamiento del herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético en suelos ácidos de montaña y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo en la movilidad del herbicida, en un montaje experimental de columnas de suelo no alterado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Ubicación y características de la zona de estudio.** Se tomaron muestras de suelo provenientes del municipio de Timbío, en el departamento del Cauca (Colombia), ubicado en las coordenadas 2°21'10"N y 76°40'55"O, a una altitud 1.850 m s.n.m.

El relieve de la región es de ondulado a fuertemente ondulado, presenta disecciones poco profundas, con pendientes cortas y medias. Algunos sectores tienen relieve suavemente ondulado y otros llegan a ser fuertemente quebrados. El clima de la zona es moderadamente frío, con temperaturas que varían entre 12 y 20 °C y la precipitación oscila entre 1.200 y 1.800 mm anuales. El material parental del sector, donde se tomaron las muestras de suelo, es ceniza volcánica.

**Muestreo.** Se realizaron muestreos en tres fincas agrícolas del municipio de Timbío, para la toma de muestras disturbadas y sin disturbar. Las muestras disturbadas, se tomaron con el propósito de caracterizar el suelo y aquellas sin disturbar, se emplearon en la determinación de la movilidad del 2,4-D, mediante un montaje de columnas en el laboratorio.

El área muestreada de cada finca fue seleccionada en campo, delimitando una cuadrícula de 625 m<sup>2</sup>, en la cual, se tomaron 25 submuestras de suelo de 1 kg, a 20 cm de profundidad, separadas 5 m entre sí, con el fin de obtener una muestra compuesta que, entonces, fue trasladada al laboratorio, en una bolsa debidamente marcada, para su posterior secado y tamizado.

Las muestras de suelo disturbado, se secaron al aire y posteriormente fueron tamizadas a 2 mm y almacenadas a temperatura ambiente. Las propiedades físicas y químicas, se determinaron de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC ISO/IEC 17025:2005 (ICONTEC, 2005) y siguiendo la metodología descrita por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006). Las propiedades físicas medidas fueron: humedad gravimétrica en porcentaje (%); densidad aparente (DA – g/cm<sup>3</sup>), por el método del cilindro; textura, por el método Bouyucos; conductividad hidráulica, por consolidación de suelo (cm/s) y gravedad específica. Las propiedades químicas determinadas fueron: pH, por el método

potenciómetro (Relación 1:1); carbono orgánico (%), por Walkley y Black; nitrógeno, por el método de Kjeldahl (%); capacidad de intercambio catiónico, por  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 M pH 7 (meq/100 g suelo).

Las muestras de suelo sin disturbar, se tomaron enterrando, con ayuda de un mazo, las columnas de PVC de 5 cm de diámetro y 30 cm de largo, dejando el extremo superior por fuera del suelo, unos cuantos centímetros. Estas columnas, se taparon por ambos costados, indicándose la dirección natural del suelo. Cada muestra se tomó por triplicado, para un total de 9.

**Diseño experimental.** El diseño experimental fue factorial, completo de dos vías (tiempo y cantidad de materia orgánica), con 18 tratamientos, resultado de combinar 6 niveles de tiempo (cada 10 días, durante 2 meses), con tres contenidos de materia orgánica (9,84, 10,94 y 12,42 %) y constituyeron un factor fijo; los niveles de tiempo son un factor aleatorio. El muestreo fue estratificado, con tres réplicas para cada nivel de materia orgánica, seis medidas en el tiempo y un control, por triplicado. La unidad experimental estuvo constituida por la muestra empacada en una columna de suelo. La variable de respuesta fue la concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) en el lixiviado.

**Montaje.** En el extremo inferior de cada columna con suelo sin disturbar, se instaló una frita de vidrio y se selló con una tapa de PVC, con orificio de 1 cm de diámetro, para permitir la salida y la recolección del lixiviado. La superficie superior de cada columna, se cubrió con una frita de vidrio de 1 mm de espesor, para distribuir el flujo de la lluvia en forma homogénea. Después, las columnas fueron llevadas a saturación por capilaridad, con una solución 0,01 M de  $\text{CaCl}_2$ , desde el fondo hasta la superficie, asegurando desplazar el aire de los poros de suelo por agua. Se equilibraron durante 12 horas y el exceso de agua, se drenó por gravedad.

Se aplicó directamente sobre la superficie de las columnas una concentración de 361,51 mg de 2,4-D/kg de suelo en metanol. Las columnas empacadas se pesaron al inicio y al final del montaje de laboratorio. La humedad del suelo en las columnas se mantuvo a capacidad de campo y a 15 °C en la oscuridad, durante todo el experimento. Una vez preparadas, las columnas se dispusieron verticalmente y se inició la lluvia artificial, con 250 mL de una solución de cloruro de calcio 0,01 mol/dm<sup>3</sup>, por 48 horas, a un flujo de 0.1 mL por minuto (OECD, 2000).

Un total de 12 columnas fueron preparadas para llevar a cabo todos los ensayos. Estos, se realizaron por triplicado para un suelo, con tres concentraciones de materia orgánica diferentes, con un evento de lluvia cada 10 días. Además, se hizo una columna de control con arena, también por triplicado, para un evento de lluvia, cuyo material recibió tratamiento para eliminación del contenido de materia orgánica. Este control permitió corregir los datos que se pudieran alterar por la interacción de los materiales usados, con cualquier contaminante. El lixiviado fue recogido en fracciones por 50 días, durante los cuales, se registraron sus volúmenes. La concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) fue cuantificada en cada fracción.

Las muestras de lixiviado, se filtraron por milipore de 0,45  $\mu\text{m}$  y se inyectaron al Cromatógrafo de líquidos de alta resolución, acoplado al detector selectivo de masas (HPLC-SM), HEWELETT PACKARD 1100, ChemStation Versión B.03.01 SR 1.1, Columna C18 VYDAC de 250 mm de longitud 4,6 mm y de 5,0  $\mu\text{m}$  de tamaño de partícula a 25 °C, volumen de inyección 20  $\mu\text{L}$  y detector UV-Visible a 280 nm de longitud, la fase móvil acetronitrilo - ácido acético (40:60), en modo isocrático, para un tiempo de 10 minutos y un flujo de 1,0 mL/min, en el Centro de Investigaciones Ambientales, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Para la curva de calibración, se usó un estándar certificado de 2,4-D: marca CHEMSERVICE, 99,0 % pureza, lote: 401-92-A, lográndose un límite de detección del método (LDM), de 0,024 mg/L.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Caracterización fisicoquímica del suelo.** Los datos obtenidos del análisis fisicoquímico realizado a las muestras de suelo de las tres fincas, se resumen en la tabla 1. La interpretación de resultados, se llevó a cabo, utilizando, como referencia, los datos reportados por Silva Mojica (2000) y que se encuentran en la tabla 2.

De los resultados del análisis de textura mostrado en la tabla 1, se observa que los suelos estudiados presentan un contenido de arena alto y el análisis de Tukey indica una diferencia significativa entre ellos (indicada por las letras a, b y c). Además, el contenido de arcilla es apropiado, excepto para el suelo en San Luis parte baja, donde supera el rango considerado adecuado (10-25 %). Dados estos contenidos de arcilla y arena, estos suelos presentan una clase textural franco arenosa.

Se observa que los niveles de humedad higroscópica de las tres muestras de suelo son normales y se asocia, especialmente, al alto contenido de materia orgánica (MO), como se puede deducir de la correlación de Pearson positiva y altamente significativa (0,924).

De la tabla 1, se puede también observar que los tres suelos contienen bajo valor de densidad aparente y se atribuye a los altos contenidos de MO, pero, principalmente, a las arcillas, reflejado en la correlación de Pearson negativa (-0,921); esto puede indicar, que el incremento en ellas aumenta el volumen de espacios porosos y, por lo tanto, se reduce la densidad, lo cual, afecta la estabilidad y la capacidad de retención de agua; de esta forma, se puede producir una disminución en la lixiviación de contaminantes, a lo largo del perfil.

La tabla 1, también muestra las conductividades hidráulicas de los suelos de las tres fincas que, de acuerdo con la norma DIN 18130 (1998), son bajas, al estar en el rango comprendido entre  $10^{-6}$  y  $10^{-8}$ , indicando, entonces, que estos suelos tienen muy mal drenaje. De acuerdo con la misma norma, los valores de conductividad hidráulica, se encuentran en el rango característico de un suelo franco arenoso. Todo lo anterior explica la dificultad presentada en el paso del agua, a través del suelo contenido en las columnas de PVC empleadas en el laboratorio, con tiempos de lixiviado y drenaje de hasta 8 días.

Tabla 1. Resultados de los análisis de propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo de las tres fincas en estudio, del municipio de Timbío - Cauca, Colombia.

Propiedades físicas del suelo							
Finca	Textura	Arena (%)	Arcilla (%)	Limos (%)	Humedad Higroscópica (%)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Conductividad Hidráulica (cm/s)
1	Franco arenosa	72 b	25 <sup>b</sup>	4	10,67 c	0,66 c	4,73 x 10 <sup>-7</sup> a
2		71 c	26 <sup>a</sup>	3	14,06 b	0,68 b	2,70 x 10 <sup>-7</sup> b
3		77 a	19 c	4	15,09 a	0,75 a	1,84 x 10 <sup>-7</sup> c
Propiedades químicas del suelo							
C (%)	MO (%)	pH		CIC (meq/100 g suelo)		N (%)	
5,71	9,84 c	5,08 b		59,83		1,18 a	
6,34	10,94 b	5,07 b		59,78		0,98 c	
7,20	12,42 a	5,10 a		54,46		1,09 b	

C: Carbono. MO: Materia orgánica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. N: nitrógeno.  
a, b, c: Prueba de Tukey, a>b>c (p <0,05). Letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

Tabla 2. Nivel de materia orgánica (MO) en un suelo de clima medio (Silva Mojica, 2000).

Nivel	Bajo	Medio	Alto
% MO	<3	3-5	>5

Se puede observar en la tabla 1, que el contenido de materia orgánica es alto en los tres suelos (Conklin, 2005). Esta característica hace que disminuya la susceptibilidad de estos a ser erosionados y los oscurece, facilitando su calentamiento, aspecto que es favorable para la germinación de semillas. También, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, mejora la capacidad buffer de los suelos, aunque disminuye el pH. Una característica poco deseable de la materia orgánica es la de retener compuestos y elementos tóxicos, como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o de metales pesados, que llegan al suelo, son adsorbidos y dificultan su eliminación (Jaramillo Jaramillo, 2002).

De acuerdo con los resultados, los tres suelos están clasificados como fuertemente ácidos, por estar en un valor inferior a 5,5. Esta acidez tiene un efecto en la actividad biológica del suelo, ya que condiciona su fertilidad o el crecimiento de las plantas y, además, disminuye la disponibilidad de algunos nutrientes, puesto que un pH ácido aumenta la solubilidad de los compuestos básicos, facilitando su lixiviación. Esta fuerte acidez puede provenir, probablemente, del alto contenido de MO y de los alófanos presentes en este tipo de suelos, que son de origen volcánico (Vázquez, 2005).

Respecto a la capacidad de intercambio catiónico de los tres suelos, se obtuvieron resultados superiores a 40 meq / 100g suelo. Se considera que estos valores son altos, lo cual, es benéfico para las

plantas, ya que esta CIC le permite retener elementos catiónicos, evitando su lavado. Los altos niveles de CIC, se atribuyen, principalmente, al alto contenido de materia orgánica, pero, en este caso, en especial, a las arcillas del suelo, como lo demuestra la correlación positiva y altamente significativa (0,975).

**Lixiviación del 2,4-D.** La figura 1 muestra los resultados de movilidad de los suelos estudiados. Esta gráfica permite ver que cada que ocurre un evento de lluvia, se induce a la lixiviación del 2,4-D, tanto en la columna de control o blanco como en las columnas con muestra de suelo. También, se puede ver que la movilidad del 2,4-D es superior en las columnas blanco. Al comparar los resultados de movilidad en los tres suelos, se infiere que esa movilidad disminuye al aumentar el contenido de MO, que se puede confirmar con la correlación de Spearman negativa y altamente significativa (-0,334). Esto es un indicativo de que la retención del plaguicida ocurre en las moléculas de la MO.

Igualmente, se observa en la figura 1, que la mayor parte del plaguicida es movilizado en el día 1, con el primer evento de lluvia; por ejemplo, en el suelo de la finca 1, la prueba de Tukey no muestra diferencia significativa entre las concentraciones del plaguicida en los primeros 30 días, pero la cantidad movilizada es significativamente inferior durante los 40 y 50 días.

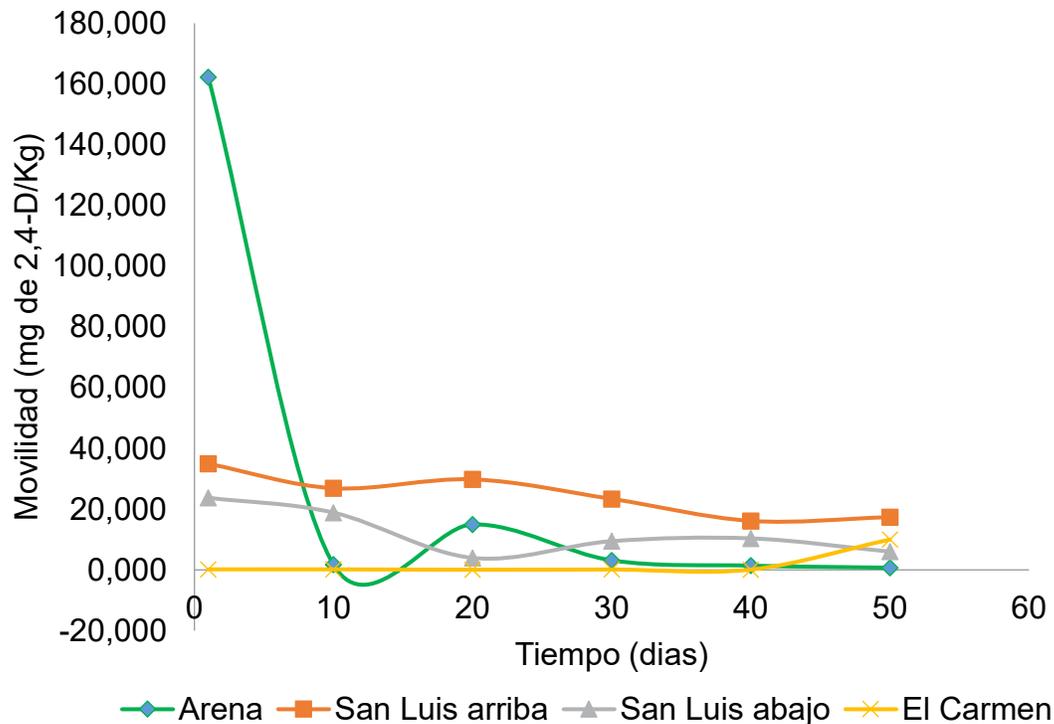


Figura 1. Movilidad del 2,4-D, en tres suelos del municipio de Timbío - Cauca, Colombia.

En la misma gráfica de la figura 1, se ve que, para el suelo de la finca 2, la prueba de Tukey no presenta diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en el lixiviado en los 50 días de muestreo y se observa una cantidad movilizada significativamente inferior en el evento de lluvia, ocurrido a los 20 días, debido, probablemente, a las líneas de flujo que se generan con el transporte de líquidos, a través de la columna de suelo.

Finalmente, en el suelo de la finca 3, la prueba de Tukey tampoco demuestra diferencias significativas entre las concentraciones del 2,4-D en los primeros 40 días, pero la cantidad movilizada es significativamente superior a los 50 días, en el sexto evento de lluvia.

El tiempo y los eventos de lluvia a lo largo de los 50 días afectaron la lixiviación del herbicida 2,4-D en los suelos estudiados, lo cual, se confirma con la correlación de Pearson negativa (-0,416), indicando que, a medida que el tiempo entre eventos de lluvia se incrementó, la movilidad disminuyó.

Las características del suelo condicionan el arrastre de los contaminantes; por ejemplo, los resultados obtenidos para el suelo de la finca 1 (Tabla 1), cuya concentración de materia orgánica de 9,84 %, muestran que después de 50 días de lixiviación y 6 eventos de lluvia permite lixiviar un 40 % de la concentración inicial de 2,4-D, porcentaje que se considerara alto, ya que está muy cercano al valor obtenido en el control (arena).

Por el contrario, en la columna de suelo de la finca 3, experimentalmente, se obtuvo una lixiviación total baja del 3,05 % de 2,4-D, asociada al contenido superior de materia orgánica

en los suelos estudiados; pero como se mencionó, anteriormente, el control de la lixiviación no solo se debe atribuir a la materia orgánica del suelo, sino a otras características fisicoquímicas del mismo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, que regulan el paso del agua y otros fluidos, a través del suelo y que interactúan con el contaminante, para realizar los procesos de transformación o degradación, dando origen a nuevos compuestos, que pueden tener mayor, menor o igual toxicidad.

Los datos mostrados en la tabla 1 permiten verificar, además, que el suelo con mayor porcentaje de materia orgánica es el que tiene una conductividad hidráulica menor, siendo, entonces, el que más control ejerce al flujo del agua y fluidos, a través de la columna de suelo y, asimismo, controla el tiempo de lixiviación.

#### Comparación de la lixiviación de los suelos con la muestra control

En la figura 1, se compararon los resultados de lixiviación de cada suelo estudiado con la muestra control (arena), haciendo la suposición de que este control tuvo un comportamiento diferente al de los suelos orgánicos, una conductividad hidráulica alta y porcentajes de retención de contaminantes casi nulos.

Este análisis, se hizo teniendo en cuenta que la retención que presenta la muestra control se debió a factores externos a los suelos, los cuales, no fueron considerados para la comparación; por ejemplo, la adsorción por el PVC y líneas de flujo preferencial.

En el caso de la muestra control (Columna de arena), la prueba de Tukey no mostró diferencias significativas en la concentración

del plaguicida a partir de los 20 días y se observó una cantidad movilizada significativamente superior en el día 1, con el primer evento de lluvia. Esto, se atribuyó a las características estructurales de la arena y a su alto valor de conductividad hidráulica, correspondiente a  $4,63 \times 10^{-3}$  cm/s.

Después de pasados los primeros 10 días, la muestra control mostró valores de lixiviación inferiores a 20 %, debido al lavado y al arrastre del contaminante, ocurrido con el primer evento de lluvia. Esto, se ratificó con el test de Tukey, con el que no se encontraron diferencias significativas en las medias de los siguientes muestreos.

Al comparar cada suelo con la muestra control, se observó que la lixiviación aumentó en los tres suelos estudiados y que el comportamiento fue el mismo, si se tiene en cuenta que, a mayor concentración de materia orgánica, menor fue el porcentaje de lixiviación y que, a mayor tiempo, mayor la degradación del 2,4-D. Adicionalmente, se observa que al transcurrir el tiempo la lixiviación, después de cada evento de lluvia, fue más significativa comparada con la concentración inicial adicionada y se vio el efecto de los eventos de lluvia, pues con cada evento de lluvia la lixiviación se acumuló; después de 50 días, se obtuvo un 40,95 % de lixiviación total para la finca 1; 19,85 % de lixiviación total para la muestra de la finca 2 y un 3,05 % de lixiviación total para la muestra de la finca 3.

Tabla 3. Comparación de porcentajes de lixiviación de 2,4-D, en los suelos tres suelos estudiados del municipio de Timbío - Cauca, Colombia vs tiempo.

	Tiempo (días)					
	1	10	20	30	40	50
<b>Suelo 1</b>	9,64	7,41	8,22	6,44	4,45	4,79
<b>Suelo 2</b>	6,51	5,17	1,08	2,6	2,83	1,64
<b>Suelo 3</b>	0,05	0,05	0,02	0,04	0,03	2,86

**Evaluación de la retención de 2,4-D en los suelos y la incidencia del tiempo.** Al analizar el comportamiento de las columnas de suelo y comparar las concentraciones del 2,4 D en el lixiviado, con las que se retenían en el suelo después de cada evento de lluvia, se encontró que todas tienen un porcentaje de retención mayor al 90 %, después de cada muestreo, debido a que la concentración del 2,4-D varía con cada proceso de lixiviación, determinado por cada evento de lluvia.

La retención del 2,4-D es un proceso que no solo se debe a la circulación del agua, por el suelo, pues existen unas variables importantes que influyen en su retención o movimiento, a través del mismo. El proceso de adsorción/desorción es de gran importancia para entender la difusión de los plaguicidas hacia los recursos hidrológicos.

Se pudo verificar que los tres suelos tienen porcentajes de recuperación de 2,4-D en el lixiviado, inferiores a los reportados por Morillo *et al.* (2001); sin embargo, al comparar los resultados de ambos estudios, se debe tener en cuenta las características físicas y químicas que influyen en el proceso de lixiviación; por ejemplo, los tres suelos del presente reporte tienen una textura franco - arenosa, además presentan arcillas y alto valor de materia orgánica, lo cual, ayuda a la retención del contaminante, entre otras variables significativas en el proceso de lixiviación; estas características contrastan con el suelo del estudio de Morillo *et al.* (2001), cuya textura es franco - limosa.

El porcentaje de lixiviación total de los suelos ándicos estudiados en este proyecto fue de 3 - 60 %. Al comparar los anteriores resultados con los del estudio de la lixiviación de 2,4-D en suelos de la India, realizado por Gupta *et al.* (2012), se observa la diferencia en los porcentajes, ya que reportaron un porcentaje de lixiviación del 25 - 76 %. Se puede considerar que tener un menor porcentaje de lixiviación en los suelos del presente proyecto resulta favorable porque, de esta forma, el contaminante puede ser degradado o transformado, mediante procesos que son favorecidos por el porcentaje de materia orgánica, el pH del suelo, las arcillas, entre otras variables; por ejemplo, el riesgo de lixiviación de 2,4-D fue mayor en el suelo 1 que en el suelo 3; esto puede estar relacionado con los diferentes contenidos de materia orgánica (Tabla 3).

**Otros factores que afectan la lixiviación del 2,4-D.** Algunos autores, como Senesi *et al.* (2001), Ismail *et al.* (2009), Kumar *et al.* (2015) y Ozbay *et al.* (2017) encontraron que el contenido de materia orgánica está relacionado con el proceso de adsorción y de lixiviación de contaminantes, como plaguicidas, ya que cuando estos ingresan al suelo son retenidos por la materia orgánica. Hay, además, otros factores, como la textura y la conductividad hidráulica, que también son determinantes en la lixiviación o la retención y la descomposición de los contaminantes, que ingresan al suelo.

Como conclusión, el presente trabajo reporta una relación inversamente proporcional entre la materia orgánica y la movilidad del herbicida 2,4-D, debido a que proporciona sitios de adsorción por la presencia de los grupos funcionales, que forman complejos de asociación fuertes y, por consiguiente, mayor número de moléculas adsorbidas.

Otro factor que condiciona la movilidad del 2,4-D es la humedad, ya que, tanto las tasas de degradación química como microbiana, se incrementan con mayores niveles de temperatura y de humedad.

En el suelo de la finca 1, con una conductividad hidráulica más alta que la del suelo de la finca 3, la lixiviación del 2,4-D fue mayor; sin embargo, estadísticamente, la relación de movilidad con los valores de conductividades hidráulicas en los suelos orgánicos es muy baja (0,240), debido a que los valores encontrados en cada muestra son muy parecidos entre sí.

El riesgo de lixiviación del herbicida fue significativamente mayor en la finca 1 que en la finca 3, relacionado, probablemente, con el contenido de materia orgánica más bajo en la finca 1, en comparación con la finca 3; el alto contenido de esta termina siendo de gran importancia para la retención de contaminantes, mitigando la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas de estos suelos.

Al comparar cada uno de los suelos con el control, se evidenció una diferencia significativa, ya que la conductividad del blanco fue notablemente superior a la de los suelos. La conductividad hidráulica es un parámetro que incide en la movilidad; valores altos permiten que el agua atraviese rápidamente la columna del blanco. Es así, como en el primer muestreo, la mayor cantidad del herbicida fue arrastrada e incrementada por su alta solubilidad en agua, de manera que se produce un “lavado” y genera mayor concentración del mismo en el lixiviado.

Los resultados aquí registrados fueron realizados a nivel de laboratorio, pero las condiciones de campo, en la mayoría de los casos, pueden favorecer la movilidad del 2,4-D en el suelo, por la gran variabilidad de las condiciones climáticas del sitio en estudio (humedad, eventos de lluvia, temperatura, evapotranspiración) y por la naturaleza del herbicida. La lixiviación, por ejemplo, puede aumentar con el volumen de las precipitaciones, debido a la alta solubilidad del herbicida 2,4-D. De esta manera, el contenido de agua del suelo puede ser un factor importante para influir en el movimiento y la degradación del plaguicida.

Se puede inferir, de manera general, que la movilidad de los herbicidas depende de su afinidad por los constituyentes del suelo (adsorción), es decir, cuanto mayor sea su adsorción en suelo menor será su potencial de lixiviación.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen a la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Cauca y Universidad de Antioquia, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo. **Conflicto de intereses:** Los autores del presente trabajo, manifiestan que no existe conflicto de interés que pueda afectar la validez de los resultados aquí presentados.

## REFERENCIAS

1. BUKOWSKA, B. 2006. Toxicity of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid— molecular mechanisms. *Polish Journal Environmental Studies*. 15(3):365-374.
2. CONKLIN, A.R. 2005. *Introduction to soil chemistry: Analysis and instrumentation*. 1 ed. Wiley. 240p.
3. DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V., DIN. 1998. Laboratory tests for determining the coefficient of permeability of soil. 24p.
4. DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, DOUE. 1998. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. 23p.
5. GÓNGORA-ECHEVERRÍA, V.R.; MARTIN-LAURENT, F.; QUINTAL-FRANCO, C.; LORENZO-FLORES, A.; GIÁCOMAN-VALLEJOS, G.; PONCE-CABALLERO, C. 2019. Dissipation and adsorption of 2, 4-D, atrazine, diazinon, and glyphosate in an agricultural soil from yucatan state, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*. 230:131. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4177-y>
6. GUPTA, M.; GARG, N.K.; JOSHI, H.; SHARMA, M.P. 2012. Persistence and mobility of 2,4-D in unsaturated soil zone under winter wheat crop in sub-tropical region of India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 146(1):60-72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.009>
7. GURSON, A.P.; OZBAY, I.; OZBAY, B.; AKYOL, G.; AKYOL, N.H. 2019. Mobility of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid, Glyphosate, and Metribuzine Herbicides in Terra Rossa-Amended soil: Multiple approaches with experimental and mathematical modeling studies. *Water, Air, & Soil Pollution*. 230:220. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4266-y>
8. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, ICONTEC. 2005. Norma tecnica colombiana-NTC-ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. ICONTEC (Bogotá D.C.). 49p.
9. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Suelo, agua, abono orgánico, tejido vegetal, material particulado*. Ed. 6. (Bogotá, D.C.). 647p.
10. ISLAM, F.; WANG, J.; FAROOQ, M.A.; KHAN, M.S.S.; XU, L.; ZHU, J.; ZHAO, M.; MUÑOS, S.; LI, Q.X.; ZHOU, W. 2018. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International*. 111:332-351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020>
11. ISMAIL, B.; SAMENI, M.; HALIMAH, M. 2009. Adsorption, desorption and mobility of 2 4-D in two Malaysian agricultural soils. *Asian Journal of Agricultural Research*. 3(3):67-77. <https://doi.org/10.3923/ajar.2009.67.77>

12. JARAMILLO JARAMILLO, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional Colombia. 619p.
13. KUMAR, N.; MUKHERJEE, I.; VARGHESE, E. 2015. Adsorption-desorption of tricyclazole: effect of soil types and organic matter. *Environmental monitoring and assessment*. 187:61.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-015-4280-5>
14. LABRADA, L.; CASELEY, J.; PARKER, C. 2000. Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO (Roma). 378p.
15. MEFTAUL, I.M.; VENKATESWARLU, K.; DHARMARAJAN, R.; ANNAMALAI, P.; MEGHARAJ, M. 2020. Movement and fate of 2, 4-D in urban soils: a potential environmental health concern. *ACS omega*. 5(22):13287-13295.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01330>
16. MORILLO, E.; PÉREZ-MARTÍNEZ, J.; GINÉS, J.M. 2001. Leaching of 2,4-D from a soil in the presence of [beta]-cyclodextrin: laboratory columns experiments. *Chemosphere*. 44(5):1065-1069.  
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00346-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00346-5)
17. OECD. 2000. OECD guidelines for the testing of chemical. Leaching in soil columns. 15p.
18. OZBAY, B.; AKYOL, N.H.; AKYOL, G.; OZBAY, I. 2017. Sorption and desorption behaviours of 2, 4-D and glyphosate in calcareous soil from Antalya, Turkey. *Water and Environment Journal*. 32(1):141-148.  
<https://doi.org/10.1111/wej.12311>
19. PÉREZ, H.; PAEZ, M.I. 2010. Movilidad Clorpirifos en columnas de suelo andico disturbado y no disturbado usando GC-ECD y CG-SM. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío*. 18:201-207.
20. SENESI, N.; LOFFREDO, E.; D'ORAZIO, V.; BRUNETTI, G.; MIANO, T.M.; LA CAVA, P. 2001. Adsorption of pesticides by humic acids from organic amendments and soils. En: Clapp, C.E.; Hayes, M.H.B.; Senesi, N.; Bloom, P.R.; Jardine, P.M. (eds.). *Humic substances and chemical contaminants*. Soil Science Society of America. p.129-153.  
<https://doi.org/10.2136/2001.humicsubstances>
21. SILVA MOJICA, F. 2000. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Tercera edición. Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo (Santa fe de Bogotá). 323p.
22. VÁZQUEZ, M.E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA (Buenos Aires, Argentina). p.161-188.



# Determinación de viabilidad, vigor y banco de semillas de retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en un Andisol de un ecosistema de Páramo

## Determination of viability, vigor and seed bank of gorse (*Ulex europaeus* L.) in an Andisol of a Paramo ecosystem

Alba Gissela Fajardo-Ortiz<sup>1</sup> ; Laura Rocío Fonseca-Hernández<sup>1\*</sup> ; Arlette Ivonne Gil-Clavijo<sup>2</sup> ; Juliana Andrea Martínez-Chiguachi<sup>1</sup> ; Álvaro Celis-Forero<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Cundinamarca, Grupo de Investigación Fitomejoramiento y Biotecnología del Sumapaz. Fusagasugá - Cundinamarca, Colombia; e-mail: agfajardo@ucundinamarca.edu.co; lrfonseca@ucundinamarca.edu.co; julianaamartinez@ucundinamarca.edu.co; acelis@ucundinamarca.edu.co

<sup>2</sup>Universidad de Cundinamarca, Grupo de Investigación PROSAFIS. Fusagasugá - Cundinamarca, Colombia; e-mail: aigil@ucundinamarca.edu.co

\*autor de correspondencia: lrfonseca@ucundinamarca.edu.co

**Cómo citar:** Fajardo-Ortiz, A.G.; Fonseca-Hernández, L.R.; Gil-Clavijo, A.I.; Martínez-Chiguachi, J.A.; Celis-Forero, Á. 2022. Determinación de viabilidad, vigor y banco de semillas de retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en un Andisol de un ecosistema de Páramo. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2076. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2076>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** septiembre 3 de 2021

**Aceptado:** noviembre 11 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) es una planta introducida invasora de rápido crecimiento y diseminación, con producción de semillas, que permanecen latentes en los primeros 5 cm de profundidad del suelo; esta planta altera espacios ecológicos nativos, áreas de producción agropecuaria y su control y erradicación no es exitosa. Conocer ciertas características de las semillas del retamo facilitará su control. El objetivo de este trabajo, fue determinar el vigor, la viabilidad y el banco de semillas de retamo espinoso, en zonas del páramo de Sumapaz. Para las pruebas, se colectaron semillas en tres sitios: Delicias, Usabá y Laguna. La prueba de vigor, se llevó a cabo mediante conductividad eléctrica y la de viabilidad, por ensayo topográfico de tetrazolio; en cada prueba, se realizó cuatro repeticiones, cada una con 100 semillas; el diseño estadístico fue completamente al azar. Para el banco de semillas, se tomaron muestras de suelo, a profundidades 0-5, 5-10 y 10-20

cm y se dispusieron en bandejas de aluminio. La prueba de vigor mostró que, después de 6 horas de hidratación, la cantidad de iones lixiviados se estabilizó, con un valor de  $38,51 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , a las diez horas, afirmando alto vigor de semillas. La prueba de viabilidad presentó un 98 % y el banco de semillas registró mayor cantidad en el horizonte de 10-20 cm, con 950 semillas.m<sup>2</sup>, en la Laguna. Este estudio demuestra que las semillas de retamo tienen altos valores de vigor, viabilidad y un abundante banco de semillas distribuidas a diferentes profundidades.

Palabras clave: Especie invasora; Viabilidad; Conductividad eléctrica; Banco de semillas, Sibaté.

### ABSTRACT

The gorse (*Ulex europaeus* L.) is an invasive introduced plant of rapid growth and spread, with seeds production that remain

dormant in the first 5 cm of soil depth, this plant alters native ecological spaces, areas of agricultural production, and its control and eradication is not successful. Know certain characteristics of gorse seeds will facilitate its control. Thus, the purpose of this work was to determine the vigor, viability and seed bank of gorse in areas of the Sumapaz paramo. For the tests, seeds were collected in three sites: Delicias, Usabá and Laguna. The vigor test was carried out by means of electrical conductivity and the viability test by tetrazolium topographic assay, in each test four repetitions were carried out, each with 100 seeds, the statistical design was completely random. For the seed bank, soil samples were taken at depths of 0-5, 5-10 and 10-20 cm, and placed in aluminium trays. The vigor test showed that after 6 hours of hydration, the amount of leached ions stabilized with a value of  $38.51 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  at ten hours, confirming high seed vigor. The viability test presented 98 % and the seed bank registered a greater quantity in the 10-20 cm horizon with 950 seeds.m<sup>2</sup> in the Laguna. This study shows that gorse seeds have high values of vigor, viability, and an abundant seed bank distributed at different depths.

Keywords: Invasive species; Biodiversity; Viability; Electrical conductivity; Seed bank, Sibaté.

## INTRODUCCIÓN

El retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) es una especie leguminosa nativa de Europa occidental y las Islas Británicas (Hill *et al.* 2001); su crecimiento es perenne de largo plazo y forma un denso matorral (Amaya-Villareal & Renjifo, 2010). En Colombia, se reporta desde 1932 (Ríos Alzate & Jardín Botánico de Bogotá «José Celestino Mutis», 2005; Sánchez & Zabaleta, 2006) y está presente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Caldas, Cauca, Córdoba, Huila, Meta, Nariño, Risaralda, Santander y Tolima (Mora Goyes *et al.* 2018; Barrera-Cataño *et al.* 2019). Esta especie fue introducida para usarse como cerca viva y propagada de forma comercial, como ornamental (Sanguino Fernández, 2018), también fue establecida para controlar otras especies que afectaban espacios ecológicos; sin embargo, con el pasar del tiempo, el retamo espinoso aumentó su distribución (Ocampo-Zuleta & Solorza-Bejarano, 2017), particularmente, en la Sabana de Bogotá, originado disturbios en ecosistemas nativos, áreas de producción agropecuaria, parques distritales y de conservación (Vargas *et al.* 2009).

Dentro de las alteraciones en el ecosistema causada por *U. europaeus* es la afectación en el crecimiento y desarrollo de arbustos nativos, lo que disminuye la disponibilidad de frutos, de los cuales, se alimentan las aves (Amaya-Villareal & Renjifo, 2010); otro aspecto a tener en cuenta, es que este arbusto puede alcanzar hasta 2 m de altura, donde en el tercio bajo se acumula una densa necromasa, que se acumula año tras año, formando una barrera que dificulta el ingreso de diferentes semillas y la luz al suelo (Beltrán-G. & Barrera-Cataño, 2014). Además, la necromasa y la presencia de aceites en diferentes partes de retamo espinoso, predisponen el desarrollo de incendios en áreas donde se establece (Barrera-Cataño *et al.* 2019). Los incendios generan condiciones que estimulan la regeneración y la propagación del retamo espinoso, ocasionado pérdida de bienes y servicios

ecosistémicos, aumento la tasa de erosión y facilita el establecimiento de otras especies invasoras (Barrera-Cataño *et al.* 2002; Ocampo-Zuleta & Beltrán-Vargas, 2018; Ocampo-Zuleta, 2019).

El retamo espinoso, se cataloga entre las diez especies introducidas invasoras de mayor riesgo en Colombia, por su forma de establecimiento, impacto e inviabilidad de control (Baptiste E. *et al.* 2010). *U. europaeus*, se caracteriza por su facilidad de germinar, recuperarse rápidamente, dificultad para su erradicación y una elevada producción de semillas, la cual, se puede estimar entre 442 y 36.741 semillas.m<sup>2</sup> al año (Rees & Hill, 2001). En los Cerros Orientales del sur de Bogotá, se evaluaron bordes de matorral con presencia de esta especie invasora, reportando la presencia de un banco de semillas con cantidades promedio de 5.386 semillas m<sup>2</sup>, en profundidades de hasta 20 cm, en el perfil del suelo (Ocampo-Zuleta & Solorza-Bejarano, 2017). La variabilidad en la cantidad de semillas tiene una relación con la edad del área invadida, encontrando valores de hasta 15.000 semillas.m<sup>2</sup> en invasiones de 40 años (Beltrán-Gutiérrez & Barrera-Cataño, 2015).

Un banco de semillas, se puede definir como un grupo de semillas con potencial germinable, capaces de conformar una futura vegetación o reinvasión, adaptadas a diferentes condiciones, que prevalecen en periodos adversos de espacio y tiempo (Hill *et al.* 2001; Cano-Salgado *et al.* 2012). El estudio de estos reservorios de semillas permite conocer la cantidad de semillas nuevas, ubicadas, principalmente, en la superficie del suelo y de semillas antiguas, persistentes en el tiempo, facilitando determinar la viabilidad de estas y, con ello, estimar la posible infestación de malas hierbas. Es necesario tener en cuenta, que los bancos de semillas pueden presentar cambios, como modificaciones en tamaño y en composición de las especies presentes en el suelo, debido a la implementación de prácticas agrícolas (Begum *et al.* 2006). Otro aspecto que permite la evaluación de los bancos de semillas es conocerlos como fuente de propágulos y diversidad genética, que facilita el reconocimiento de especies de plantas, distribución de semillas y los programas de manejo, que ayuden en el control de especies invasoras (Cox & Allen, 2008; Gioria *et al.* 2019).

Además, conocer la viabilidad de una semilla puede determinar la habilidad que tiene el embrión para germinar, aunque este evento se puede alterar por diversos factores, como la producción de semillas viables por la planta, edad de la semilla, daños por factores externos y condiciones ambientales. Otra característica a tener en cuenta es el vigor de las semillas, considerado para determinar el nivel de actividad y desempeño de estas durante la germinación y emergencia de la plántula; este vigor puede disminuir a lo largo del tiempo, porque las semillas pierden la capacidad de realizar sus procesos fisiológicos (Shaban, 2013). Otra técnica para evaluar el estado de las semillas es la conductividad eléctrica, que presenta ventajas, como la rapidez de resultados, no afectados por la latencia, no demanda equipos costosos, ni personal altamente calificado, es capaz de identificar el deterioro de las semillas en su estado inicial (Silva *et al.* 2013), además de su objetividad y una base teórica consistente (AOSA, 1983).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar el vigor, la viabilidad y el banco de semillas de retamo espinoso, para conocer la dinámica de desarrollo de esta planta invasora en las zonas de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el municipio de Sibaté - Cundinamarca, Colombia, en la vereda Romeral, ubicada a una altura aproximadamente de 3.312 m s.n.m., con temperatura media de 14 °C y precipitación media anual de 1.075 mm. Estos suelos se caracterizan por ser de tipo Andisol (Borja, 2012).

Para el estudio del banco de semillas se seleccionaron tres sitios de muestreos, de acuerdo a su ubicación y ecosistemas contrastantes. El primer lugar, denominado Delicias, se encontraba ubicado al borde de la carretera, que conduce a la vereda Romeral; este punto, se caracterizaba por la presencia de pasto para ganado lechero, el cual, estaba siendo invadido por retamo espinoso, con coordenadas N 4°25'53.00", W 74°14'2.00" W. El segundo lugar, llamado la Laguna, se caracterizaba por plantas de retamo espinoso al borde de un cuerpo de agua, con coordenadas N 4°24'46.00", W 74°14'5.01" y finalmente Usabá, sobre la carretera hacia el municipio de Pasca-Cundinamarca, limitando con sistemas de producción agrícola, con coordenadas N 4°24'26.00", W 74°14'7.00" (Figura 1). Para

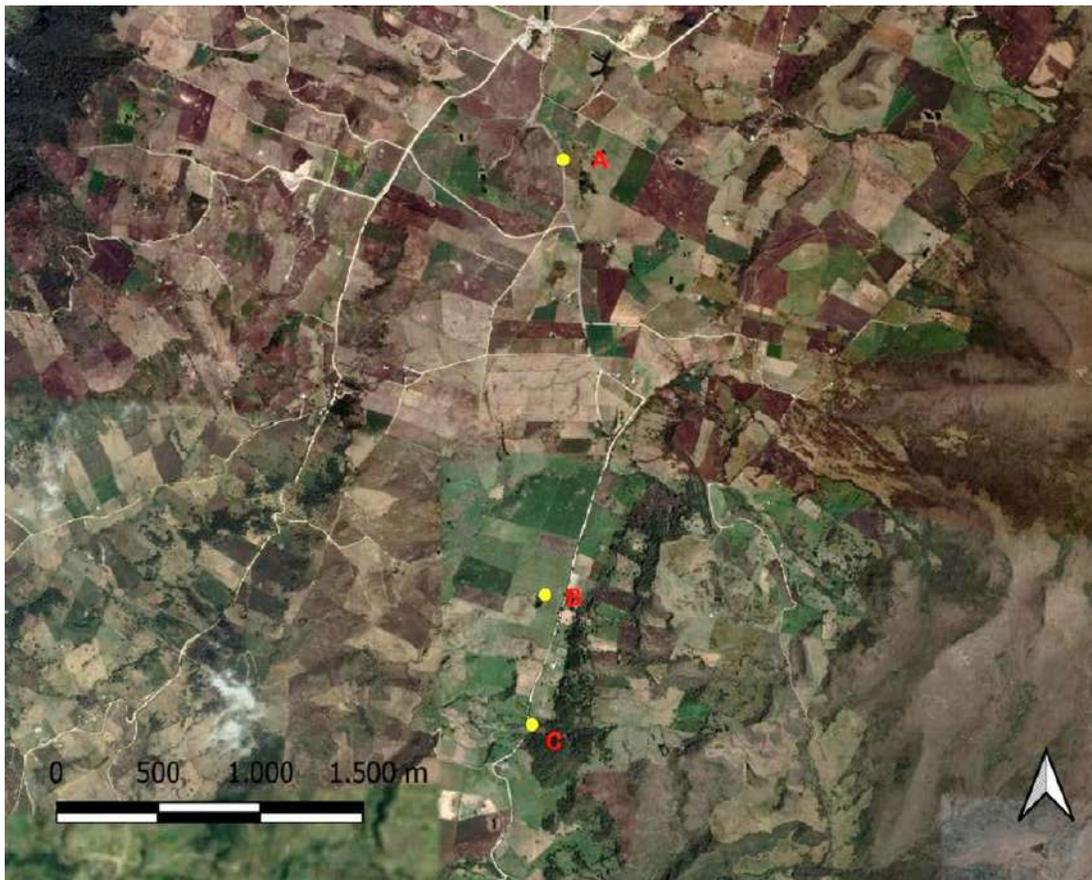


Figura 1. Lugares de muestreo para determinación del banco de semillas de *Ulex europaeus*. a) Delicias; b) Laguna y c) Usaba.

la determinación del vigor y viabilidad de la semilla, solo se utilizó material vegetal del sector llamado Delicias.

### Metodología para determinación de vigor, viabilidad y banco de semillas

**Prueba de vigor:** El vigor de las semillas de retamo espinoso, se analizó mediante la prueba de conductividad eléctrica (C.E.), determinada por la ISTA (International Seed Testing Association, 2005), en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá, bajo condiciones de

temperatura promedio de 20 °C. Se utilizó un diseño estadístico completamente al azar, con cuatro repeticiones de 100 semillas cada una. Cada repetición fue colocada en un vaso de precipitados con 60 mL de agua destilada estéril y mediante un conductímetro marca Jenway 4510 (calibrado en 25 mL de agua destilada estéril), se realizaron las respectivas mediciones, tomadas a las 2, 4, 6, 8 y 10 horas de imbibición de la semilla. Los resultados, se expresaron en  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  y se analizaron con el paquete estadístico SAS, con una prueba de comparación múltiple de Tukey al 5 % de significancia, para determinar si existieron diferencias estadísticas entre el tiempo de imbibición y el vigor de la semilla.

Tabla 1. Prueba de Tukey para conductividad eléctrica (C.E.) de las semillas de retamo espinoso en el sector Delicias, vereda Romeral (Sibaté, Cundinamarca).

PERÍODOS DE IMBIBICIÓN (HORAS)	C.E. ( $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )
2	9,01a**
4	20,15ab
6	37,45b
8	38,51b
10	37,31b

( $\mu\text{s}$ : microsiemens). \*\*Letras distintas indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ).

**Prueba de viabilidad:** Las semillas colectadas en el sector Delicias, vereda Romeral (Sibaté), fueron sometida a una prueba de viabilidad, mediante el ensayo topográfico de tetrazolio en el laboratorio de la Universidad de Cundinamarca. Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada repetición constó de 100 semillas, acondicionadas mediante un corte longitudinal con bisturí y, posteriormente, se colocaron en un vaso de precipitados de 100 mL, con una solución de tetrazolio en agua al 1 %, en un volumen total de 50 mL, durante 2 horas. Pasado este tiempo, se realizó un conteo de las semillas viables y no viables, con la ayuda de un estereoscopio, para calcular el porcentaje de viabilidad, de acuerdo con las reglas de la ISTA (2005), según el color de la tinción, obtenida por el embrión, que varía de rojo intenso, para las semillas vigorosas, pasando por coloración rosa (de fuerte a pálido, para semillas parcialmente dañadas) y color blanco, para las semillas muertas o inviables (Elizalde *et al.* 2017).

**Banco de semillas:** La colecta de muestras, se realizó en la zona de páramo de Sumapaz del municipio de Sibaté, seleccionando tres matorrales de *Ulex europaeus*, en los sitios mencionados. Para colectar el suelo, se usó la metodología de Sánchez & Zabaleta (2006), pero modificando el área de evaluación, al pasar de  $1\text{ m}^2$  a  $0,40\text{ m}^2$ , buscando reducir la cantidad de suelo colectado y así distribuir una proporción, de acuerdo al área disponible para las evaluaciones y con el fin de tener precisión en la colecta de suelo, se utilizó un cuadrado de  $0,20 \times 0,20\text{ m}$ . En cada matorral, se seleccionaron tres puntos de muestreo, donde se dispuso el cuadrado anteriormente mencionado y, a partir de allí, se tomaron muestras a tres profundidades de 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Se realizaron dos muestreos en cada uno de los matorrales. Posteriormente, el suelo extraído de cada matorral, se distribuyó en bandejas de aluminio marcadas con cada profundidad. Las muestras permanecieron en un umbráculo por un periodo de tres meses, con aplicaciones de riego, para posteriormente realizar el conteo de plántulas germinadas, diferenciándolas en dicotiledóneas (hoja ancha), monocotiledóneas (hoja angosta) y retamo espinoso, que se identificó al observar las primeras hojas verdaderas (trifoliadas) (Barrera-Cataño *et al.* 2019). Con el fin de confirmar que fueran plantas de retamo espinoso, se mantuvieron por un periodo de hasta dos meses, para observar el desarrollo de la plántula.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Prueba de vigor.** La prueba de conductividad eléctrica, se basa en el hecho de que las semillas, cuando se sumergen en agua (fase de imbibición), exudan iones, azúcares y otros metabolitos, debido a los cambios en la integridad de las membranas celulares, de acuerdo con Fessel *et al.* (2006).

Según Bewley & Black (1985), en las semillas de bajo vigor, los mecanismos de reparación de membranas son ineficientes, están ausentes o las membranas están completamente dañadas, lo que permite la salida de una gran cantidad de electrolitos, a través de ella. Cuando se estabilizan las membranas, se produce la menor lixiviación de exudados (Fessel *et al.* 2010).

La prueba de comparación múltiple de Tukey para la conductividad eléctrica de las semillas de retamo espinoso del sector Delicias (Tabla 1) mostró que, a partir de las 6 horas de hidratación, la cantidad de iones lixiviados se estabilizó, demostrando que sus membranas celulares tienen una alta capacidad de restauración en su integridad en poco tiempo, directamente relacionado con su alto vigor.

Algunos resultados para este parámetro en especies cultivadas son abundantes, pero para semillas de *U. europaeus* son muy pocas, por lo que se considera un punto de partida para futuras investigaciones, en el conocimiento de esta especie; por ejemplo, para semillas de maíz (*Zea mays* L.), se considera que la pérdida de iones, a través de las membranas, se estabiliza a las 24 horas de imbibición, a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  (Sivritepe *et al.* 2015); para semillas de frijón (*Phaseolus vulgaris* L.), a las 16 horas, a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  (Ortiz *et al.* 2018) y en sorgo, a las 24 horas, a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  (Fatonah *et al.* 2017).

De acuerdo con la investigación realizada por Szemruch *et al.* (2019), en semillas de girasol (*Helianthus annuus* L.), se encontró que los valores de la C.E. variaron entre  $40,4$  y  $41,5\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , para aquellas consideradas de alto vigor y entre  $60,6$  y  $50,2\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , para las consideradas de medio y bajo vigor (Szemruch *et al.* 2019). Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la prueba, que fueron de  $38,51\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , a las ocho horas y de  $37,31\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , a las diez horas, se puede afirmar que las semillas de *U. europaeus* del sector Delicias presentan un alto vigor.

**Prueba de viabilidad.** Los resultados de la prueba de tetrazolio mostraron que las semillas de retamo espinoso del sector Delicias tuvieron una viabilidad del 98 %, de acuerdo con los estándares de tinción del embrión, de color rojo intenso, lo cual, quiere decir que estas poseen un embrión viable, capaz de germinar y producir plántulas normales. La viabilidad de las semillas expresa su potencial germinativo, de acuerdo con lo reglamentado por la ISTA (2005).

En embriones de semillas, la diferencia entre los tejidos vivos de los muertos refleja la actividad de las enzimas deshidrogenasas, base del proceso respiratorio. Cuando las semillas vivas se hidratan, la actividad de las deshidrogenasas se ve incrementada, lo que da como resultado la liberación de iones hidrógeno, que reduce a la solución de tetrazolio (incolora) a trifenil-formazán, de color rojo, de acuerdo con Ruiz (2009). Cuando existe una baja concentración

Tabla 2. Número de plantas dicotiledóneas, monocotiledóneas y de retamo espinoso *Ulex europaeus*, en los sitios muestreados Delicias, Usabá y Laguna, del municipio de Sibaté, en las profundidades de 0-5, 5-10 y 10-20 cm.

Lugar	Dicotiledóneas	Monocotiledóneas	Retamo		
			Número	Número m <sup>-2</sup>	Número ha <sup>-1</sup>
<b>Profundidad 0-5 cm</b>					
Delicias	25	59	4	100	1.000.000
Usabá	40	56	14	350	3.500.000
Laguna	31	11	21	525	5.250.000
<b>Profundidad 5-10 cm</b>					
Delicias	30	36	11	275	2.750.000
Usabá	11	16	1	25	250.000
Laguna	36	11	26	650	6.500.000
<b>Profundidad 10-20 cm</b>					
Delicias	63	33	24	600	600.000
Usabá	6	19	2	50	500.000
Laguna	54	20	38	950	9.500.000
Total	296	261	141	3.525	29.850.000

de deshidrogenasas, no se colorea la semilla al no reaccionar con tetrazolio, según Victoria T. (2006). Los diferentes grados de tinción, se relacionan con la germinación.

Estos resultados difieren con los obtenidos por Sixtus *et al.* (2004), en la viabilidad de semillas de retamo espinoso, en dos sitios de Nueva Zelanda, mostrando diferencias según el sitio de colecta, siendo mayor en las vainas colectadas en Golden Bay (esquina noroeste de la isla sur), con un 60 %, a diferencia de las producidas más al sur, en el lago glacial Ohau, con un 30 % de viabilidad. En Golden Bay, la producción de semilla de retamo espinoso es de forma continua, con picos de producción en junio y diciembre, con un promedio mensual de las temperaturas mínimas invernales de, aproximadamente, 5 °C, mayores que en otras zonas de la isla, lo que podría ser la causa del más largo período reproductivo por estación, mientras que en el lago Ohau, la semilla de retamo espinoso se produce por más cortos periodos, que puede ser debido a la temperatura más fría, de -2 °C.

**Banco de Semillas.** El mayor potencial de plantas de retamo espinoso de las zonas de estudio se alcanzó en el matorral la Laguna,

con 2.250 semillas germinadas por m<sup>-2</sup>; estas cifras son similares a las encontradas en Sir Lanka y en Australia (Kariyawasam & Ratnayake, 2019). Ocampo-Zuleta & Solorza-Bejarano (2017), en Colombia, encontraron 1.892 semillas por m<sup>-2</sup>, entre los 2.700 a 3.200 m.s.n.m., menor a la densidad de los bancos evaluados en este estudio, que oscilaron entre 2.500 y 16.000 semillas.m<sup>-2</sup>; estas cantidades coincidieron con los rangos reportados por Rees & Hill (2001), que estiman la producción anual de semillas de retamo espinoso entre 442 a más de 36.741 semillas.m<sup>-2</sup>. Una causa de las variaciones en las densidades de las semillas de retamo, se atribuye a su amplia adaptación en diferentes rangos de climas, así garantiza producción constante de semillas (Bowman *et al.* 2008); sin embargo, en este caso, no se puede atribuir a alguna época o a condiciones climáticas, porque no fue posible relacionarlas con las fechas de muestreo. Este tipo de cambios en las densidades muestran la necesidad de interpretar y analizar el banco de semillas de cada lugar de estudio, para determinar estrategias de control, acordes a las características de las zonas invadidas por esta planta.

Los resultados muestran que la mayor abundancia de semillas de retamo espinoso se encontró en el matorral la Laguna, en la profundidad de

10-20 cm, seguida de 0-5 cm y finalmente de 5-10 cm (Tabla 2); por el contrario, Ocampo-Zuleta & Solorza-Bejarano (2017) reportaron la mayor cantidad de semillas de retamo espinoso, depositadas entre 0-5 cm, independiente de los sitios muestreados. Esta mayor densidad puede ser explicada por la apertura de vainas, que al caer se abren y las semillas quedan depositadas en el primer horizonte del suelo (Clements *et al.* 2001); sin embargo, es posible hallar semillas a profundidades superiores de 10 cm, las cuales, pueden funcionar como el reservorio futuro de *U. europaeus*, al tener la posibilidad de evitar adversidades bióticas o abióticas a esas profundidades (Hill *et al.* 2001). En este sentido, Gonzalez *et al.* (2010) encontraron un número mayor de semillas de retamo espinoso, entre los 5-10 cm del suelo y no necesariamente entre los primeros 5 cm; esto se podría deber a factores, como disturbios en el ambiente y el agotamiento de la capa superficial del suelo, así como la exposición a algunos depredadores, los cuales, afectan el tamaño de los bancos de semillas (Carbonne *et al.* 2020). En especies de plantas arvenses, el aumento en la densidad de semillas se obtuvo, igualmente, a la profundidad de 10 a 20 cm y en los primeros centímetros disminuyó, lo cual, fue relacionado con las prácticas de manejo del suelo (Vargas Gutiérrez & Blanco Metzler, 2012).

Según los análisis realizados para las tres áreas evaluadas, el banco de semillas, para el matorral la Laguna, fue de 2.125 semillas, seguido de las Delicias, con 975 semillas y finalmente con Usaba, 425 semillas; por lo anterior, el matorral la Laguna presentó valores más altos de semillas. Estos resultados pueden estar relacionados con actividades realizadas por la comunidad en dicho matorral, para el control de esta especie invasora, como las quemadas constantes. Esta práctica aumenta la dispersión y la propagación de semillas (Vargas *et al.* 2009), creando una condición de sucesión ecológica detenida, prolongando la permanencia de la especie en los matorrales (Herrera *et al.* 2016), lo cual, afecta la resiliencia del suelo y la recuperación del hábitat, con especies nativas. De igual forma, las semillas de retamo espinoso han demostrado ser tan resistentes al fuego, que los incendios favorecen la expresión masiva de los bancos de semilla, dificultando la erradicación de la planta (Barrera-Cataño *et al.* 2002; Vargas, 2007; Contreras-Rodríguez *et al.* 2019).

Al realizar el conteo de la composición del banco de semillas, se encontró que estaba compuesto, en mayor proporción, de especies dicotiledóneas, con 42,4 %, monocotiledóneas, con 37,4 % y retamo espinoso, con 20,2 %. Esta composición fue similar a los resultados obtenidos por Haretche & Rodríguez (2006), donde presentó mayor predominancia de plantas dicotiledóneas que monocotiledóneas, lo que puede estar relacionado con la longevidad de las semillas, ya que las monocotiledóneas se caracterizan por ser poco longevas.

Finalmente, se puede concluir, que las semillas de esta especie presentan una reparación de membranas celulares en corto tiempo después del inicio de la imbibición, lo cual, indica que posee alto vigor, asociado a una alta viabilidad, factores clave para su establecimiento exitoso en diversos ambientes. El banco de semillas de retamo espinoso, se puede encontrar a profundidades de hasta 20 cm del suelo en los lugares muestreados, además el matorral asociado al cuerpo hídrico

de la Laguna, presentó el mayor banco de semillas, lo que se puede atribuir a las prácticas de quemadas allí realizadas.

**Agradecimientos.** Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Cundinamarca, por la financiación y a la comunidad de Romeral Alto, por permitirnos el ingreso a los predios para la toma de muestras. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue elaborado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. AMAYA-VILLAREAL, Á.M.; RENJIFO, L.M. 2010. Efecto del retamo espinoso (*Ulex europaeus*) sobre las aves de borde en un bosque altoandino. *Ornitología Colombiana*. 10:11-25.
2. ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS, AOSA. 1983. Seed vigour testing handbook. 1st Edition. AOSA (USA). 88p.
3. BAPTISTE E., M.P.; CASTAÑO, N.; CÁRDENAS LÓPEZ, D.; GUTIÉRREZ, F. DE P.; GIL, D.; LASSO, C.A. 2010. Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Bogotá, D.C., Colombia). 200p.
4. BARRERA-CATAÑO, J.I.; CONTRERAS-RODRÍGUEZ, S. M.; MALAMBO-DUARTE, N.; MORENO CÁRDENAS, A.C.; OCAMPO, R.; RODRÍGUEZ PERDOMO, D.; ROJAS ROJAS, J.E. 2019. Plan de prevención, manejo y control de las especies de retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Genista monspessulana*) en la jurisdicción CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca; Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia).170p.
5. BARRERA-CATAÑO, J.I.; RÍOS-ALZATE, H.F.; PINZÓN-OSORIO, C.A. 2002. Planteamiento de la propuesta de restauración ecológica de áreas afectadas por el fuego y/o invadidas por el retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en los cerros de Bogotá D.C. *Perez-Arbelaezia*. 13:55-71.
6. BEGUM, M.; JURAIMI, A.S.; RASTAN, S.O.B.S.; AMARTALINGAM, R.; MAN, A.B. 2006. Seedbank and seedling emergence characteristics of weeds in ricefield soils of the muda granary area in north-west peninsular Malaysia. *Biotropia*. 13(1):11-21.
7. BELTRÁN-G, H.E.; BARRERA-CATAÑO, J.I. 2014. Caracterización de invasiones de *Ulex europaeus* L. de diferentes edades como herramienta para la restauración ecológica de bosques altoandinos, Colombia. *Biota Colombiana*. 15(2):3-26.

8. BELTRÁN-GUTIÉRREZ, H.; BARRERA-CATAÑO, J.I. 2015. Herramientas para la caracterización de comunidades de *Ulex europaeus* en un contexto de restauración ecológica del bosque altoandino. En: Cárdenas-Toro, J.; Baptiste E. M.P.; Ramírez, W.; Aguilar-Garavito, M. (eds.). Herramientas para la gestión de áreas afectadas por invasiones biológicas en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Bogotá-Colombia). p.107-112.
9. BEWLEY, J.D.; BLACK, M. 1985. Seeds: physiology of development and germination. Plenum Press (New York). 367p.
10. BORJA, P. 2012. Los suelos del páramo. Unidad 3. En: Llambi, L.D.; Soto-W., A.; Céleri, R.; De Bievre, B.; Ochoa, B.; Borja, P. (Eds.) Ecología hidrología y suelo de páramos. Páramos Andinos (Quito, Ecuador). p.69-92.
11. BOWMAN, G.; TARAYRE, M.; ATLAN, A. 2008. How is the invasive gorse *Ulex europaeus* pollinated during winter? A lesson from its native range. *Plant Ecology*. 197(2):197-206. <https://doi.org/10.1007/s11258-007-9370-1>
12. CANO-SALGADO, A.; ZAVALA-HURTADO, J.A.; OROZCO-SEGOVIA, A.; VALVERDE-VALDÉS, M.T.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, P. 2012. Composición y abundancia del banco de semillas en una región semiárida del trópico mexicano: patrones de variación espacial y temporal. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 83:437-446.
13. CARBONNE, B.; PETIT, S.; NEIDEL, V.; FOFFOVA, H.; DAOUTI, E.; FREI, B.; SKUHROVEC, J.; ŘEZÁČ, M.; SASKA, P.; WALLINGER, C.; TRAUOGOTT, M.; BOHAN, D. 2020. The resilience of weed seedbank regulation by carabid beetles, at continental scales, to alternative prey. *Scientific reports*. 10:19315. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76305-w>
14. CLEMENTS, D.R.; PETERSON, D.J.; PRASAD, R. 2001. The biology of Canadian weeds. *Ulex europaeus* L. *Canadian Journal of Plant Science*. 81(2):325-337. <https://doi.org/10.4141/P99-128>
15. CONTRERAS-RODRÍGUEZ, S.; ORDOÑEZ-PARRA, C.; BASTO, S.; ROJAS-ROJAS, J.E.; TALERO-RODRÍGUEZ, C.; BARRERA-CATAÑO, J.I. 2019. El retamo espinoso y liso en el Territorio CAR: un problema que entre todos debemos solucionar. *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR*. 43p.
16. COX, R.; ALLEN, E.B. 2008. Composition of soil seed banks in southern California coastal sage scrub and adjacent exotic grassland. *Plant Ecology*. 198:37-46. <https://doi.org/10.1007/s11258-007-9383-9>
17. ELIZALDE, V.; GARCÍA, J.R.; PEÑA-VALDIVIA, C.B.; YBARRA, M.C.; LEYVA, O.R.; TREJO, C. 2017. Viabilidad y germinación de semillas de *Hechtia perotensis* (Bromeliaceae). *Revista de Biología Tropical (Costa Rica)*. 65(1):153-165. <http://doi.org/10.15517/rbt.v65i1.23566>
18. FATONAH, K.; SULIANSYAH, I.; ROZEN, N. 2017. Electrical conductivity for seed vigor test in sorghum (*Sorghum bicolor*). *Cell Biology and Development*. 1(1):6-12. <https://doi.org/10.13057/cellbioldev/v010102>
19. FESSEL, S.A.; PANOBIANCO, M.; DE SOUZA, C.R.; VIEIRA, R.D. 2010. Electrical conductivity test of soybean seeds stored under different temperatures. *Bragantia (Brasil)*. 69(1):207-214.
20. FESSEL, S.A.; VIEIRA, R.D.; CRUZ, M.C.P.; PAULA, R.C.; PANOBIANCO, M. 2006. Electrical conductivity testing of corn seeds as influenced by temperature and period of storage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 41(10):1551-1559. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001000013>
21. GIORIA, M.; LE ROUX, J.J.; HIRSCH, H.; MORAVCOVÁ, L.; PYŠEK, P. 2019. Characteristics of the soil seed bank of invasive and non-invasive plants in their native and alien distribution range. *Biological Invasions*. 21(7):2313-2332. <https://doi.org/10.1007/s10530-019-01978-y>
22. GONZALEZ, M.; MATHIEU, A.; AUGUSTO, L.; GIRE, C.; BAKKER, M.R.; BUDYNEK, A. 2010. Gorse seed bank variability in maritime pine stands. *Seed Science Research*. 20(1):31-38. <https://doi.org/10.1017/s0960258509990237>
23. HARETCHE, F.; RODRÍGUEZ, C. 2006. Banco de semillas de un pastizal uruguayo bajo diferentes condiciones de pastoreo. *Ecología Austral*. 16:105-113.
24. HERRERA, I.; GONCALVES, E.; PAUCHARD, A.; BUSTAMANTE, R.O. 2016. Manual de plantas invasoras de Sudamérica. IEB Chile-Instituto de Ecología y Biodiversidad (Chile). 116p.
25. HILL, R.L.; GOURLAY, A.H.; BARKER, R.J. 2001. Survival of *Ulex europaeus* seeds in the soil at three sites in New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*. 39(2):235-244. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2001.9512734>
26. INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION, ISTA. 2005. International rules for seed testing. Annual Meeting. Vol. 215. ISTA.
27. KARIYAWASAM, C.S.; RATNAYAKE, S.S. 2019. Reproductive biology of gorse, *Ulex europaeus* (Fabaceae) in the mount lofty ranges of South Australia and Sri Lanka.

- The International Journal of Plant Reproductive Biology. 11(2):145-152. <https://doi.org/10.14787/ijprb.201911.2>
28. MORA GOYES, M.F.; RUBIO, J.; OCAMPO, R.; BARRERA CATAÑO, J.I. 2018. Catálogo de especies invasoras del territorio CAR. Pontificia Universidad Javeriana; Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (Colombia). 220p.
  29. OCAMPO-ZULETA, K. 2019. Modelo descriptivo de restauración ecológica en zonas afectadas por incendios forestales e invasión de retamo espinoso en los Cerros Orientales de Bogotá. Acta Biológica Colombiana. 24(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.71953>
  30. OCAMPO-ZULETA, K.; BELTRÁN-VARGAS, J. 2018. Modelación dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia. Madera y bosques. 24(3):e2431662.
  31. OCAMPO-ZULETA, K.; SOLORZA-BEJARANO, J. 2017. Banco de semillas de retamo espinoso *Ulex europaeus* L. en bordes del matorral invasor en un ecosistema zonal de bosque altoandino, Colombia. Biota Colombiana. 18(1 Sup):89-98. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18s01a05>
  32. ORTIZ, T.A.; GOMES, G.R.; DE SIQUEIRA VENGRUS, N.A.; ANSCHAU, R.; ASSARI TAKAHASHI, L.S. 2018. Electrical conductivity test for evaluating physiological quality in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. Australian Journal of Crop Science. 12(10):1561-1565. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.10.pne1022>
  33. REES, M.; HILL, R.L. 2001. Large-scale disturbances, biological control and the dynamics of gorse populations. Journal of Applied Ecology. 38(2):364-377. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00598.x>
  34. RÍOS ALZATE, H.F.; JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ "JOSÉ CELESTINO MUTIS". 2005. Guía Técnica para la restauración ecológica de áreas afectadas por especies vegetales invasoras en el Distrito Capital. Complejo invasor retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) y retamo liso (*Teline monspessulana* (L) C. Koch). Jardín Botánico José Celestino Mutis (Bogotá, D.C.). 155p.
  35. RUIZ, M.A. 2009. El análisis de tetrazolio en el control de calidad de semillas. Caso de estudio: cebadilla chaqueña. Publicación técnica no. 77. EEA INTA Anguil (Argentina).19p.
  36. SÁNCHEZ, A.; ZABALETA, Á. 2006. La invasión del espio, un problema que nos toca enfrentar. En: Vargas, O. (Ed.). En busca del bosque perdido. Una experiencia de restauración ecológica en predios del embalse de Chisacá. Localidad de Usme, Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. p.88-94.
  37. SANGUINO FERNÁNDEZ, J.A. 2018. Identificación de impactos generados por el retamo espinoso en la vereda santa rosa localidad Ciudad Bolívar. Boletín Semillas Ambientales. 12(1):160-164.
  38. SHABAN, M. 2013. Study on some aspects of seed viability and vigor. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research (Iran). 1(12):1692-1697.
  39. SILVA, R.C.D.; GRZYBOWSKI, C.R. DE S.; FRANCANETO, J. DE B.; PANOBIANCO, M. 2013. Adaptação do teste de tetrazólio para avaliação da viabilidade e do vigor de sementes de girassol. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 48(1):105-113.
  40. SIVRITEPE, H.O.; SENTURK, B.; TEOMAN, S. 2015. Electrical Conductivity Tests in Maize Seeds. Advances in Plants & Agriculture Research (USA). 2(7):00075.
  41. SIXTUS, C.R.; HILF, G.D.; SCOTT, R.R. 2004. Variation in gorse (*Ulex europaeus* L.) seed production and viability in the South Island of New Zealand. Agronomy of New Zealand. 34:31-41.
  42. SZEMRUCH, C.; GALLO, C.; MURCIA, M.; ESQUIVEL, M.; ARANGUREN, M.; GARCÍA, F.; MEDINA, J. 2019. Uso del test de conductividad eléctrica para la estimación del vigor y la emergencia a campo de semillas de girasol. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA EEA Oliveros (Argentina). 37p.
  43. VARGAS, O. 2007. Guía metodológica para la restauración de áreas invadidas por el retamo espinoso. En: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia; Convenio Interinstitucional Acueducto de Bogotá – Jardín Botánico – Secretaría Distrital de Ambiente. p.169-174.
  44. VARGAS, O.; LÉON, O.; DÍAZ, A. 2009. Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas. Universidad Nacional de Colombia; Convenio Interinstitucional Secretaría Distrital de Ambiente (Bogotá D.C.). 305p.
  45. VARGAS GUTIÉRREZ, M.; BLANCO METZLER, H. 2012. Efecto de prácticas de manejo del suelo sobre el banco de semillas de malezas, Guanacaste, Costa Rica. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales. 13(26):43-57.
  46. VICTORIA T., J.A. 2006. Viabilidad en tetrazolio de semillas de caléndula y eneldo. Acta agronómica (Colombia). 55(1):31-41.



# Methylmercury (MeHg) in the most consumed fish in a municipality of La Mojana, Colombia

## Metilmercurio (MeHg) en los peces más consumidos en un municipio de la Mojana, Colombia

Wilson Baleta-Anaya<sup>1</sup> ; Yesenia Garay-Román<sup>1</sup> ; Adolfo Consuegra-Solorzano<sup>1</sup> ; Jhon Vidal-Durango<sup>2</sup> ; Jorge Buelvas-Soto<sup>3\*</sup> ; José Marrugo-Negrete<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Sucre. Food and Water Resource Conservation Research Group (CRHIA). Sincelejo - Sucre, Colombia; e-mail: wilsondb2112@gmail.com; yese.biology@gmail.com; adolfo.consuegra@unisucra.edu.co

<sup>2</sup>Universidad de la Costa. Barranquilla - Atlántico, Colombia; e-mail: jhonvidaldurango@gmail.com

<sup>3</sup>Universidad de Córdoba. Group of Waters, Applied and Environmental Chemistry, Laboratory of Toxicology and Environmental Management. Montería - Córdoba, Colombia. e-mail: jorge.buelvas.soto@gmail.com; jmarrugo@correo.unicordoba.edu.co

\*autor de correspondencia: jorge.buelvas.soto@gmail.com

**How to cite:** Baleta-Anaya, W.; Garay-Román, Y.; Consuegra-Solorzano, A.; Vidal-Durango, J.; Buelvas-Soto, J.; Marrugo-Negrete, J. 2022. Methylmercury (MeHg) in the most consumed fish in a municipality of La Mojana, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2024. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2024>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** July 8, 2021

**Accepted:** November 28, 2022

**Edited by:** Helber Adrian Arévalo Maldonado

### ABSTRACT

La Mojana is a biodiverse area of wetlands that offers environmental services to its inhabitants. Despite its ecological relevance and for the food security of its inhabitants, this ecoregion has been strongly impacted by contamination from mining that takes place in the riverbeds that drain into it. Therefore, it is necessary to monitor the levels of MeHg in foods of relevance to the population of the area, such as fish. Thus, current research seeks to determine the levels MeHg in the most consumed ichthyofauna in the region and its possible impacts on public health. Therefore, MeHg concentrations were determined in the most consumed fish species in San Marcos, Colombia. Using cold vapor atomic absorption spectrophotometry (CVAAS) the concentrations of MeHg in the dorsal muscle of the most consumed species were quantified. *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, *Plagioscion surinamensis*, and *Hoplias malabaricus* registered the highest levels of MeHg

with concentrations of  $0.396 \pm 0.025$   $\mu\text{g/g}$ ;  $0.377 \pm 0.049$   $\mu\text{g/g}$  and  $0.355 \pm 0.028$   $\mu\text{g/g}$ , respectively. No species exceeded the maximum permissible concentration in the muscle of  $0.5$   $\mu\text{g/g}$  for fresh fish established by the European Union. However, all carnivorous species exceed the threshold for a vulnerable population of  $0.2$   $\mu\text{g/g}$ . It is concluded that the ichthyofauna of the Mojana is contaminated with MeHg, which constitutes a public health problem and a risk factor for the fauna and the inhabitants of this region, due to the habitual consumption of contaminated fish.

**Keywords:** Fish consumption; Gold mining; Ichthyofauna; Mining contamination; Wetlands.

### RESUMEN

La Mojana es una zona biodiversa de humedales que ofrece servicios ambientales a sus habitantes. A pesar de su relevancia ecológica y para la seguridad alimentaria de sus pobladores, dicha ecorregión ha

sido fuertemente impactada por la contaminación, proveniente de la minería que se desarrolla en los cauces de los ríos, que drenan en ella. Por lo anterior, es necesario monitorear los niveles de MeHg, en alimentos de relevancia para la población de la zona, como los peces. Así, la actual investigación busca determinar los niveles de MeHg en la ictiofauna de mayor consumo en la región y sus posibles impactos en la salud pública. Por lo tanto, se determinaron las concentraciones de MeHg en las especies de peces más consumidas en San Marcos, Colombia. Usando espectrofotometría de absorción atómica por vapor frío (CVAAS), se cuantificaron las concentraciones de MeHg, en músculo dorsal de las especies más consumidas. *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, *Plagioscion surinamensis* y *Hoplias malabaricus* registraron los niveles más altos de MeHg, con concentraciones de  $0,396 \pm 0,025 \mu\text{g/g}$ ;  $0,377 \pm 0,049 \mu\text{g/g}$  y  $0,355 \pm 0,028 \mu\text{g/g}$ , respectivamente. Ninguna especie superó los valores de concentración máxima permisible en músculo de  $0,5 \mu\text{g/g}$ , para peces frescos, que establece la Unión Europea; sin embargo, todas las especies carnívoras superaron el umbral para población vulnerable, de  $0,2 \mu\text{g/g}$ . Se concluye, que la ictiofauna de La Mojana, se encuentra contaminada con MeHg, lo que constituye un problema de salud pública y factor de riesgo para la fauna y los habitantes de esta región, debido al consumo habitual de peces contaminados.

Palabras clave: Consumo de peces; Contaminación minera; Humedales; Ictiofauna; Minería aurífera.

## INTRODUCTION

Fish consumption in the riparian and coastal areas of Colombia is considerably high, representing a large proportion of the animal protein consumed (DNP, 2012). In turn, various studies have reported high levels of Hg contamination in fish from these areas, especially where artisanal-scale gold mining activities have been practiced (Marrugo-Negrete *et al.* 2018). An important riparian region that serves as a reference to measure the levels of Hg contamination in Colombia is La Mojana, a region located in the north of the country and where three large Colombian rivers converge: Cauca, Magdalena, and San Jorge. Through the channels of these rivers, large quantities of Hg are discharged from the gold mining practiced in the south of Bolívar, north of Antioquia, and the upper part of the San Jorge river. Located in the south of the department of Sucre, the municipality of San Marcos is part of the region of La Mojana and San Jorge, it has numerous bodies of water, that host great biodiversity, made up of species of phytoplankton, zooplankton, periphyton, macroinvertebrates aquatic animals, plants, terrestrial invertebrates and vertebrates (Linares Arias *et al.* 2018). These water bodies also provide ecosystem services to the population, including the consumption of fish from rivers and swamps near the municipality. In a study carried out by Marrugo-Negrete *et al.* (2018), it was shown that 11.6% of the fish species evaluated exceeded the recommended limits for Hg of 0.5 (UE) and  $0.2 \mu\text{g/g}$  (FAO/WHO).

The environmental levels of Hg have increased considerably since the beginning of the industrial era, it is present throughout the

planet in various sources and foods, especially in fish, at harmful levels to humans and wildlife (Buck *et al.* 2019). It is a toxic metal, which can be chemically transformed, accumulated, and biomagnified in the trophic chain (Liu *et al.* 2021), until it reaches man, causing neurological damage, irritation of the gastrointestinal tract, and kidney and liver deterioration (Rice *et al.* 2014). It exists in a wide variety of forms, particularly as organic mercury compounds (Clarkson & Magos, 2006). The best known of all is methylmercury (MeHg), formed in the environment by microbial metabolism and abiotic processes (Bravo & Cosio, 2019), in addition, since most of the Hg is present as MeHg in aquatic biota (Gimenes *et al.* 2021), is classified as the main source of human exposure due to fish consumption (Mania *et al.* 2012).

MeHg is formed by the methylation of inorganic Hg carried out by microorganisms present in the soil, in sediments, in the air, or underwater (Ma *et al.* 2019), to later pass to the trophic network and be bioaccumulated and biomagnified, up to the human being (Li *et al.* 2021).

In pregnant women, MeHg crosses the placenta and is concentrated in the fetus; congenital disease affects newborns and translates into cerebral palsy with mental retardation, feeding difficulties, and significant motor deficit, in less severe cases, they can appear completely normal and develop neurological deficit once the central nervous system matures (Saavedra *et al.* 2021). Methylmercury also has a teratogenic capacity (Hong *et al.* 2012). Teratogenicity consists of alterations in the development of the embryo or fetus, which can generate congenital malformations (Rojas & Walker, 2012).

For this reason, the evaluation of MeHg levels represents an important factor not only from a toxicological point of view but also for the evaluation of potential impacts on public health. The municipality of San Marcos was chosen to carry out this research because it has one of the most important urban populations and economies in La Mojana. Therefore, the objective of this research was to determine the concentrations of MeHg in the most consumed fish species in the Municipality of San Marcos, Colombia.

## MATERIALS AND METHODS

**Study area.** The present study was carried out in six sampling sites in wetlands, streams, and rivers adjacent to the municipality of San Marcos  $8^{\circ}35'06''\text{N}$ ,  $75^{\circ}07'16.39''\text{W}$ , located south of the department from Sucre, gateway to the sub-region of La Mojana, northwestern Colombia. The sampling sites were San Marcos Swamp, Carate Stream, Viloría Stream, San Jorge River, Belén, and Palo Alto Swamp (Figure 1). These sampling sites were chosen because they are streams and swamps that receive water from the San Jorge River downstream and run along the jurisdiction of the municipality of San Marcos. Two systems can be established in the area: the floodplain of the Lower San Jorge River (swamps and swamp complexes), made up of about 400 bodies of water, of which the municipality has a total of 49; and that corresponding to the basin of the lower San Jorge River, made up of the river

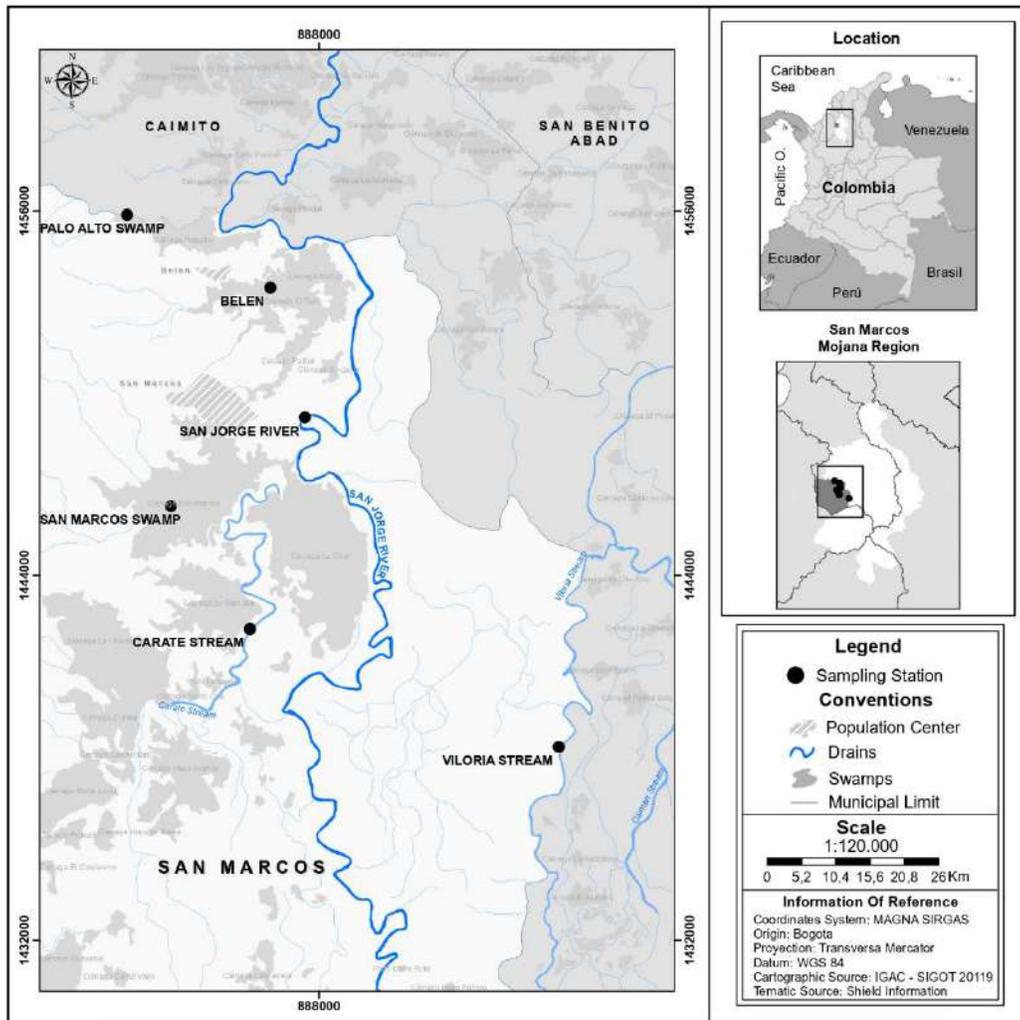


Figure 1. Map of the sampling areas to determine the concentrations of MeHg in the most consumed fish species in the municipality of San Marcos, Colombia.

and innumerable streams that drain from the eastern slope of the Serranía de San Jerónimo and converge on the left bank of the San Jorge River (IGAC, 1986).

**Samples collection.** Previous design and validation, a survey was applied to 100 individuals to collect information on eating habits in the municipality. Subsequently, supported by the information from the surveys, the fish species of interest for the study were captured, with the help of fishermen in the area. 10 individuals per species were captured, for a total of 110 individuals. The fish were caught in six bodies of water that surround the municipality of San Marcos. The viscera were extracted from the captured fish. Subsequently, samples of the dorsal muscle of the fish were taken, and then they were individually packed in plastic bags and transported in a cold chain to the Water, Applied and Environmental Chemistry laboratory of the University of Córdoba where the dorsal muscle was used to quantify the MeHg. The fishes were identified with the book of Mojica *et al.* (2012).

**MeHg analysis in fish dorsal tissue.** To carry out the quantification of MeHg, 0.3-0.5 g of fresh fish was digested with hydrobromic acid using a 50 ml centrifuge tube through of manual shaking. Subsequently, 20 mL of toluene was added and the resulting mixture was stirred for 2 minutes. Afterward, the mixture was centrifuged for 10 min at 3000 rpm and then 15 mL of the upper organic phase was extracted several times into 50 mL tubes containing 6.0 mL of 1% L-cysteine solution. Finally, a 100  $\mu$ L aliquot of the aqueous phase was injected into a direct mercury analyzer (Cordeiro Raposo *et al.* 2013). Quality control was carried out in triplicate using CRM DORM-2 certified standard dogfish muscle ( $4.47 \pm 0.32 \mu\text{g/g}$ ). The MeHg recovery percentage was  $99.0 \pm 3.7\%$  ( $n = 3$ ), the detection limit was  $0.007 \mu\text{g g}^{-1}$ , and the quantification limit was  $0.023 \mu\text{g g}^{-1}$ . MeHg concentrations were reported in  $\mu\text{g kg}^{-1}$  wet weight (ww). Analyzes of fish samples for MeHg were done in duplicate.

**Statistical analysis.** The Kolmogorov - Smirnov normality test was performed to verify the assumption of normality of the MeHg

concentrations obtained, subsequently, an analysis of variance (ANOVA) was performed using the Tukey test. In this sense, the homogeneity of the sample variances was corroborated by Bartlett's homoscedasticity test of variances; obtaining the concentrations of MeHg for each species studied as the mean  $\pm$  the standard deviation of the same, in the same way, all the tests were carried out with a significance level of 95 % ( $p < 0.05$ ). The data treatment was carried out with the statistical packages Statgraphics Centurion version 15.2.06 and Infostat3.

## RESULTS AND DISCUSSION

The fish species with the highest consumption, the mean concentrations of MeHg determined in their dorsal muscle and the average weekly consumption of the surveyed individuals are shown in table 1. *Pseudoplatystoma magdaleniatum* and *Prochilodus magdalenae* presented the highest and lowest mean concentration of

MeHg, respectively and *P. magdalenae* and *Ageneiosus pardalis* were, in their order, those with the highest and lowest consumption. The average concentration of Hg in fish in the present investigation was 0.221  $\mu\text{g/g}$ . This result is lower than that found by Marrugo-Negrete *et al.* (2018), in 13 species from the study area, who obtained a mean Hg concentration of 0.270  $\mu\text{g/g}$ . Marrugo-Negrete *et al.* (2020) determined concentrations of mercury and methylmercury (MeHg) in the 10 most consumed fish species in 11 municipalities of La Mojana, obtaining concentration ranges between 0.22-0.58  $\mu\text{g/g}$  in carnivorous fish, concentration ranges higher than those found in carnivorous fish in this investigation, which were between 0.173  $\mu\text{g/g}$  and 0.396  $\mu\text{g/g}$ . Marrugo-Negrete *et al.* (2010) determined Hg-T concentrations in fish, being the highest in the carnivorous *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, and the lowest in the non-carnivorous *Prochilodus magdalenae*, results that coincide with those found here. Figure 2 shows the distributions of the MeHg concentrations in the evaluated species.

Table 1. Mean concentrations of MeHg ( $\mu\text{g/g}$ ) in fish species consumed in San Marcos with eating habits and mean weekly consumption (g/week).

Common name	Scientific name	Eating habits	Trophic level	N	Average consumption (g/week)	Mean concentration $\pm$ SD ( $\mu\text{g/g}$ )
Bagre pintado	<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	SC	P-C	11	73.889	0.396 $\pm$ 0.025
Pacora	<i>Plagioscion surinamensis</i>	SC	P-C	11	152.149	0.377 $\pm$ 0.049
Moncholo	<i>Hoplias malabaricus</i>	SC	P-C	11	311.528	0.355 $\pm$ 0.028
Bagre blanquillo	<i>Sorubim cuspicaudus</i>	SC	P-C	11	400.027	0.338 $\pm$ 0.017
Doncella	<i>Ageneiosus pardalis</i>	SC	P-C	11	31.058	0.310 $\pm$ 0.018
Mojarra Amarilla	<i>Petenia kraussi</i>	SC	P-C	11	183.566	0.173 $\pm$ 0.016
Comelón	<i>Leporinus muyscorum</i>	PC	NC-O	11	422.465	0.116 $\pm$ 0.008
Arenca	<i>Triportheus magdalenae</i>	SC	Z-C	11	174.713	0.100 $\pm$ 0.003
Barbudo	<i>Pimelodus clarias</i>	SC	NC-O	11	240.176	0.099 $\pm$ 0.009
Viejito	<i>Curimata magdalenae</i>	PC	NC-D	11	389.242	0.095 $\pm$ 0.002
Bocachico	<i>Prochilodus magdalenae</i>	PC	NC-D	11	2510.885	0.068 $\pm$ 0.007

SC: Secondary consumer. PC: Primary consumer. P-C: Piscivorous carnivore. Z-C: Zooplanktophagous carnivore. NC-O: Non-carnivore omnivore. NC-D: Non-carnivorous detritivore.

The fish species that are consumed in San Marcos come from places close to the urban area, with the San Jorge River, San Marcos and Belén Ciénaga Swamp being the sites from which the largest supply of fish comes for such consumption. However, there are other sites from which this food is also extracted to a lesser extent, such as

Viloria Stream, Cuiva, Patilla, village of Las Pozas, Calle Nueva, Rabón, Caño Cruz, and Carate Stream, as shown in figure 3.

The most consumed fish by the inhabitants of San Marcos were *P. magdalenae*, *Leporinus muyscorum*, and *Sorubim cuspicaudus*,

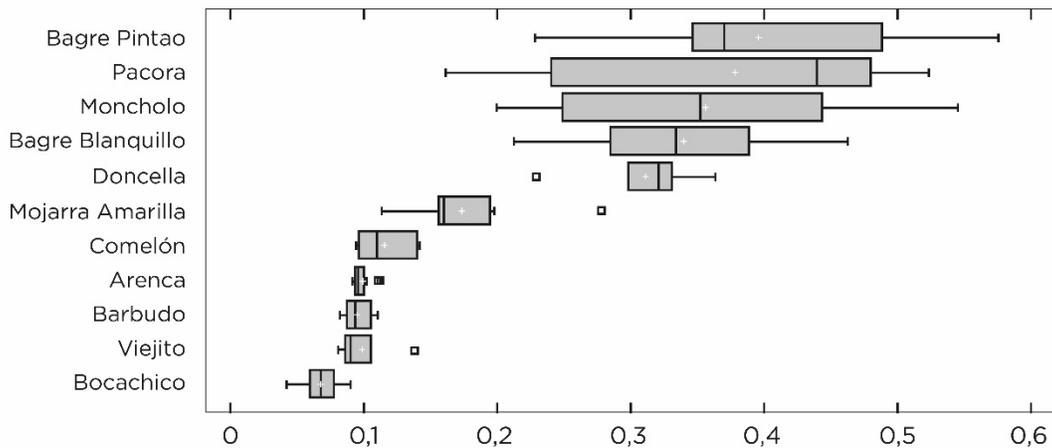


Figure 2. Distribution of methylmercury concentrations in the fish species with the highest consumption in the municipality of San Marcos, Sucre.

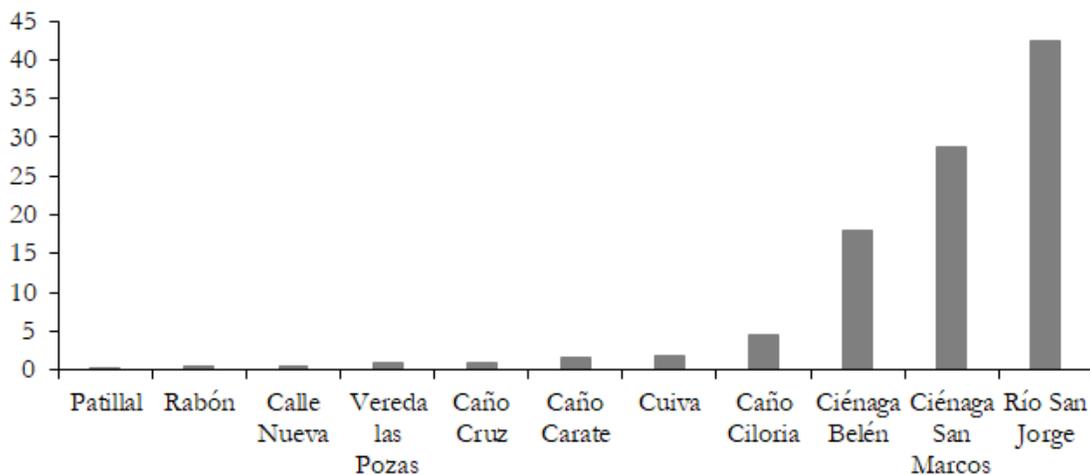


Figure 3. Percentages of origin of the fish species most consumed in San Marcos, Sucre.

this is due to their great abundance, low commercial value, and culture of consumption (Atencio G. *et al.* 2013; Segura-Guevara *et al.* 2017), those with the lowest consumption were *P. surinamensis*, *P. magdaleniatum* and *A. pardalis*. *P. magdaleniatum* is the second species with the lowest consumption by the inhabitants of San Marcos, this situation originates because the meat of this fish has a high commercial amount in local markets, due to the wide acceptance among consumers for its nutritional value and absence of intramuscular spines (Márquez-Fernández *et al.* 2020).

The presence of MeHg in fish depends on the type of diet or eating habits of the fish species since this pollutant is biomagnified through the food chain. Therefore, predatory species, secondary and tertiary consumers, contain higher levels of mercury in their tissues than non-predatory species, primary consumers (Lavoie *et al.* 2013). The fish species with the highest concentration of MeHg

are *P. magdaleniatum*, *P. surinamensis*, *Hoplias malabaricus*, *S. cuspidatus*, and *A. pardalis*; this is a group of predatory species that have a carnivorous diet, characterized by including other smaller fish and some benthic invertebrates in their diet (Marrugo-Negrete *et al.* 2007). In figure 2, the lower part shows a group of species with a lower degree of MeHg concentration, these correspond to *Petenia kraussi*, *L. muyscorum*, *Triportheus magdalenae*, *Pimelodus clarias*, *Curimata magdalenae* and *P. magdalenae*; the latter being the species with the lowest concentration of MeHg ( $0.068 \pm 0.007$  ug MeHg/g), a result that occurs because the *P. magdalenae* is not a predatory species, it feeds on organic matter, and its diet is made up mainly of detritus containing algae, bacteria and fungi (Ramírez Caballero & Pinilla Agudelo, 2012). In the upper part of figure 2, the first group of species with high variability in the concentration of MeHg is evidenced and in the lower part of the same figure 2, the second group of species with less variability in the concentration

of MeHg is observed. This is explained from the point of view of the mobility regime of each of these species. In the first group, *P. magdaleniatum*, *P. surinamensis*, *S. cuspidatus* are cataloged as migratory species, these fish at a certain point in their biological cycle feel the impulse to reproduce, which induces them to carry out tours in search of places that meet the conditions minimum for their vital function, migrations begin from mid-December to mid-March (Jiménez-Segura *et al.* 2010; Zapata & Usma, 2013). Unlike the second group, where *T. magdalenae* and *C. magdalenae* are classified as non-migratory species, these fish perform their vital functions mainly in swamps, which indicates that they have a lower mobility regime and therefore less variability in the concentrations of MeHg (DoNascimento *et al.* 2017). *P. clarias* and *P. magdalenae*, despite being migratory species, presented low levels and variability of methylmercury. On the other hand, *H. malabaricus* presented high levels and high variability of the pollutant. These cases can be explained because the biomagnification and bioaccumulation process of Hg in fish depends on many factors related to the type of species, its physiology, its ecology, and the physicochemical factors of the water bodies in which they live (Lescord *et al.* 2019).

Table 2. The concentration of Hg and MeHg in sediments from the sites of origin of the fish species with the highest consumption in San Marcos, Sucre.

Site of origin	[ug Hg/g] Sediment	[ug MeHg/g] Sediment
Carate Stream	0.138 +/- 0.0085	0.002 +/- 0.0002
Belén Swamp	0.134 +/- 0.0124	0.002 +/- 0.0001
Palo Alto Swamp	0.119 +/- 0.0066	0.003 +/- 0.0001
San Jorge River	0.264 +/- 0.0055	0.004 +/- 0.0004
San Marcos Swamp	0.259 +/- 0.0131	0.005 +/- 0.0003
Viloria Stream	0.374 +/- 0.0153	0.007 +/- 0.0004

The results obtained confirm the presence of methylmercury in all the fish samples consumed in the population of San Marcos, thus demonstrating that the organometallic forms of mercury are more easily accumulated by the aquatic biota, due to the ease of diffusion in their cell membranes and the affinity of compounds with body lipids (Ajsuvakova *et al.* 2020). Mercury in fish is neurotoxic (Pereira *et al.* 2019) and high levels of the metal can cause pathological and biochemical changes, reproductive problems, less food consumption and decreased alertness to predators, threatening their ability to survive (Strungaru *et al.* 2018). Mercury is teratogenic and its effects can damage genes, proteins, cells, and tissues, and affect the growth and behavior of fish, it produces oxidative stress (Zheng *et al.* 2019), immune deficiencies (Abu Zeid *et al.* 2021), alterations hematological and biochemical (Alam *et al.* 2021), affects sperm quality and fish fertility (Hayati *et al.* 2019) and produces hepatotoxicity (Brandão *et al.* 2015).

The consumption of species contaminated with MeHg causes problems for human health, especially for the most vulnerable groups, such as pregnant women, babies, children, and malnourished

Hg and MeHg concentration in sediment from the sites where most of the fish consumed in the Municipality of San Marcos come from is observed in table 2. Table 2 shows the low variability of MeHg concentrations in sediment from the different sampling sites. Viloria Stream was the place where the sediment samples registered the highest concentration of the pollutant (0.007 µgMeHg / g). This value is lower than the 0.097 µg/g of THg in sediments reported by Marrugo-Negrete *et al.* (2018) and the 0.5242 µg/g, reported by Pinedo-Hernández *et al.* (2015), in the study area. This stream connects the Ayapel swamp with the San Jorge River (Argumedo G. *et al.* 2015). The Ayapel swamp is affected by nickel mining carried out in the upper San Jorge, and through sewers, it receives mercury contamination from the north of Antioquia, Bajo Cauca, and south of Bolívar. The dynamics of mining waste in the area are as follows: The mercury used for gold extraction flows through the Magdalena, San Jorge, and Cauca waters to the Ayapel swamps and the pipes connected to it. Hg is deposited in the sediments and from these, it passes to macrophytic plants and small fish, on which larger fish and organisms of other taxa will feed (Marrugo-Negrete *et al.* 2010).

people (Gimenes *et al.* 2021). Chronic exposure to low doses of MeHg causes cardiovascular problems, fetal neurological damage, neurological disorders, and brain development (Yu *et al.* 2020).

According to the maximum methylmercury concentration limit in fish of 0.5 µg / g, set by FAO and the World Health Organization (FAO / WHO, 2007), none of the species had mean concentrations above this value. However, due to the constant consumption by the population of this region of the aforementioned fish, it presents a health risk.

In conclusion, the fish species with the highest consumption in San Marcos - Sucre, present contamination by MeHg, caused by mining and the use of agrochemicals in the region of La Mojana. This puts the region's fish diversity at risk and puts human populations at risk due to their consumption. Constant monitoring of Hg contamination levels in the area and environmental policies are recommended to avoid the excessive dumping of heavy metals in the Mojana region.

Since the problem of contamination by MeHg of the fish consumed in La Mojana has its main source in gold mining, it is recommended that government entities provide technical assistance to artisanal miners for them to formalize their mining activities and make them more competitive, productive, and more eco-friendly.

#### Acknowledgments.

To the Group of Applied and Environmental Chemistry of Water, Laboratory of Toxicology and Environmental Management of the Universidad de Córdoba, to the Research Group for the Conservation of Water and Food Resources of the Universidad de Sucre and to the community of the municipality of San Marcos, Sucre. Conflict of interest: The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all the authors, who declare that there is no conflict of interest that puts the validity of the results presented at risk.

## REFERENCES

1. ABU ZEID, E.H.; KHALIFA, B.A.; SAID, E.N.; ARISHA, A.H.; REDA, R.M. 2021. Neurobehavioral and immune-toxic impairments induced by organic methyl mercury dietary exposure in Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquatic Toxicology*. 230:105702. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105702>
2. AJSUVAKOVA, O.P.; TINKOV, A.A.; ASCHNER, M.; ROCHA, J.B.T.; MICHALKE, B.; SKALNAYA, M.G.; SKALNY, A.V.; BUTNARIU, M.; DADAR, M.; SARAC, I.; AASETH, J.; BJØRKLUND, G. 2020. Sulfhydryl groups as targets of mercury toxicity. *Coordination Chemistry Reviews*. 417:213343. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213343>
3. ALAM, R.T.M.; ABU ZEID, E.H.; KHALIFA, B.A.; ARISHA, A.H.; REDA, R.M. 2021. Dietary exposure to methyl mercury chloride induces alterations in hematology, biochemical parameters, and mRNA expression of antioxidant enzymes and metallothionein in Nile tilapia. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:31391-31302. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13014-5>
4. ARGUMEDO G., M.P.; VERGARA R., C.; VIDAL D., J.V.; MARRUGO N., J.L. 2015. Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) crudo y cocido procedente del municipio de San Marcos- Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel - Córdoba. *Revista Universidad Industrial de Santander. Salud*. 47(2):169-177.
5. ATENCIO G., V.; KERGUÉLÉN D., E.; NAAR, E.; PETRO, R. 2013. Desempeño reproductivo del bocachico *Prochilodus magdalenae* inducido dos veces en un mismo año. *Revista MVZ Córdoba*. 18(1):3304-3310. <https://doi.org/10.21897/rmvz.192>
6. BRANDÃO, F.; CAPPELLO, T.; RAIMUNDO, J.; SANTOS, M.A.; MAISANO, M.; MAUCERI, A.; PACHECO, M.; PEREIRA, P. 2015. Unravelling the mechanisms of mercury hepatotoxicity in wild fish (*Liza aurata*) through a triad approach: bioaccumulation, metabolomic profiles and oxidative stress. *Metallomics*. 7(9):1352-1363. <https://doi.org/10.1039/c5mt00090d>
7. BRAVO, A.G.; COSIO, C. 2019. Biotic formation of methylmercury: A bio-physico-chemical conundrum. *Limnology and Oceanography*. 65(5):1010-1027. <https://doi.org/10.1002/lno.11366>
8. BUCK, D.G.; EVERS, D.C.; ADAMS, E.; DIGANGI, J.; BEELER, B.; SAMÁNEK, J.; PETRLIK, J.; TURNQUIST, M.A.; SPERANSKAYA, O.; REGAN, K.; JOHNSON, S. 2019. A global-scale assessment of fish mercury concentrations and the identification of biological hotspots. *Science of The Total Environment*. 687:956-966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.159>
9. CLARKSON, T.W.; MAGOS, L. 2006. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical Reviews in Toxicology*. 36(8):609-662. <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
10. CORDEIRO RAPOSO, F.; GONÇALVES, S.; CALDÉRON, J.; ROBOUCH, P.; EMTEBORG, P.; CONNEELY, P.; TUMBA-TSHILUMBA, M.-F.; KORTSEN KONRAD, B.; DE LA CALLE GUNTINAS, M.B. 2013. IMEP-115: Determination of Methylmercury in Seafood. *Eu A collaborative trial report*. 46p. <http://dx.doi.org/10.2787/76278>
11. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP. 2012. Plan integral de ordenamiento ambiental y desarrollo territorial de la región de La Mojana.
12. DONASCIMIENTO, C.; HERRERA-COLLAZOS, E.E.; HERRERA-R, G.A.; ORTEGA-LARA, A.; VILLANAVARRO, F.A.; USMA-OVIEDO, J.S.; MALDONADO-OCAMPO, J.A. 2017. Checklist of the freshwater fishes of Colombia: a Darwin Core alternative to the updating problem. *ZooKeys*. 708:25-138. <https://doi.org/10.3897/zookeys.708.13897>
13. FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION/ WORLD HEALTH ORGANIZATION, FAO/WHO. 2007. Evaluation of certain food additives and contaminants. Sixty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO Technical Report Series 940. Available from Internet in: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43592/WHO\\_TRS\\_940\\_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43592/WHO_TRS_940_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

14. GIMENES, T.C.; PENTEADO, J.O.; DOS SANTOS, M.; DA SILVA JÚNIOR, F.M.R. 2021. Methylmercury in fish from the Amazon Region-a review focused on eating habits. *Water, Air, & Soil Pollution*. 232(5).  
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05151-x>
15. HAYATI, A.; WULANSARI, E.; ARMANDO, D.S.; SOFIYANTI, A.; FU'ADIL AMIN, M.H.; PRAMUDYA, M. 2019. Effects of in vitro exposure of mercury on sperm quality and fertility of tropical fish *Cyprinus carpio* L. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*. 45(2):189-195.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.06.005>
16. HONG, Y.-S.; KIM, Y.-M.; LEE, K.-E. 2012. Methylmercury exposure and health effects. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*. 45(6):353-363.  
<https://doi.org/10.3961/jpmph.2012.45.6.353>
17. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 1986. Estudio general de suelos de los municipios de Caimito, la Unión de Sucre, Majagual, San Benito Abad, San Marcos y Sucre (departamento de Sucre). IGAC (Bogotá). 165p.
18. JIMÉNEZ-SEGURA, L.F.F.; PALACIO, J.; LÓPEZ, R. 2010. Características biológicas del blanquillo *Sorubim cuspicaudus littmanni*; Burr y Nass, 2000 y Bagre rayado *Pseudoplatystoma magnaleniatum*; Buitrago-Suárez y Burr, 2007 (Siluriformes: Pimelodidae) relacionadas con su reproducción en la Cuenca Media del río Magdalena, Colombia. *Revista Actualidades Biológicas*. 31(90):53-66.
19. LAVOIE, R.A.; JARDINE, T.D.; CHUMCHAL, M.M.; KIDD, K.A.; CAMPBELL, L.M. 2013. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: A worldwide meta-analysis. *Environmental Science & Technology*. 47(23):13385-13394.  
<https://doi.org/10.1021/es403103t>
20. LESCORD, G.L.; JOHNSTON, T.; BRANFIREUN, B.A.; GUNN, J.M. 2019. Mercury bioaccumulation in relation to changing physicochemical and ecological factors across a large and undisturbed boreal watershed. *Canadian Journal of Fish-eries and Aquatic Sciences*. 76(12):2165-2175.  
<https://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0465>
21. LI, C.; XU, Z.; LUO, K.; CHEN, Z.; XU, X.; XU, C.; QIU, G. 2021. Biomagnification and trophic transfer of total mercury and methylmercury in a sub-tropical montane forest food web, southwest China. *Chemosphere*. 277:130371.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130371>
22. LINARES ARIAS, J.C.; CARRILLO FAJARDO, M.Y.; GONZÁLEZ, C.M.; VERGARA DORIA, L.E.; ORTEGA LEÓN, Á.M.; RUIZ VEGA, R.; BALLESTEROS CORREA, J.; MOGOLLÓN ARISMENDI, M.J.; VARILLA GONZÁLEZ, J.D.; CUADRADO ARGEL, L.A.; PRIOLÓ, M.C.; LÓPEZ MEBARAK, Y.; VARGAS PÉREZ, A.; MARTÍNEZ, J.A.; HERNÁNDEZ, R.; CHARRASQUIEL, L.E.; PLAZA, M.; LASTRE SOLÍS, L.; BUITRAGO, Y.; TUBER-QUIA, A.; TORRES, J.E.; PÉREZ, G.P.; CHICA VARGAS, J.P. 2018. Caracterización en la dinámica espacial de los mac-rohábitats acuáticos en la región de La Mojana. Available from Internet in: <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/34994>
23. LIU, J.; MENG, B.; POULAIN, A.J.; MENG, Q.; FENG, X. 2021. Stable isotope tracers identify sources and transformations of mercury in rice (*Oryza sativa* L.) growing in a mercury mining area. *Fundamental Res*. 1(3):259-268.  
<https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.04.003>
24. MA, M.; DU, H.; WANG, D. 2019. Mercury methylation by anaerobic microorganisms: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 49(20):1893-1936.  
<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1594517>
25. MANIA, M.; WOJCIECHOWSKA-MAZUREK, M.; STARSKA, K.; REBENIAK, M.; POSTUPOLSKI, J. 2012. Fish and seafood as a source of human exposure to methylmercury. *Rocz Panstw Zakl Hig*. 63(3):257-264.
26. MÁRQUEZ-FERNÁNDEZ, P.M.; MÁRQUEZ, E.J.; RUIZ-VILLADIEGO, O.S.; MÁRQUEZ-FERNÁNDEZ, D.M. 2020. Nutritional value of fatty acids of the Neotropical freshwater fishes *Prochilodus magdalenae*, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* and *Ageneiosus pardalis*. *Grasas y Aceites*. 71(1):342.  
<https://doi.org/10.3989/gya.0713182>
27. MARRUGO-NEGRETE, J.; BENÍTEZ, L.N.; OLIVERO-VERBEL, J.; LANS, E.; VAZQUEZ GUTIERREZ, F. 2010. Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *International Journal of Environmental Health Research*. 20(6):451-459.  
<https://doi.org/10.1080/09603123.2010.499451>
28. MARRUGO-NEGRETE, J.; PINEDO-HERNÁNDEZ, J.; PATERNINA-URIBE, R.; QUIROZ-AGUAS, L.; PACHECO-FLOREZ, S. 2018. Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*. 23(Supl.1):7062-7075.  
<https://doi.org/10.21897/rmvz.1481>
29. MARRUGO-NEGRETE, J.; VARGAS-LICONA, S.; RUIZ-GUZMÁN, J.A.; MARRUGO-MADRID, S.; BRAVO, A.G.; DÍEZ, S. 2020. Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environmental Research*. 182(109050):109050.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109050>
30. MARRUGO-NEGRETE, J.; VERBEL, J.O.; CEBALLOS, E.L.; BENITEZ, L.N. 2007. Total mercury and methylmer-

- cury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental Geochemistry and Health*. 30(1):21-30. <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9104-2>
31. MOJICA, J.I.; USMA OVIEDO, J.S.; ÁLVAREZ LEÓN, R.; LASSO, C.A. 2012. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. 1a ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales (Bogotá, D. C., Colombia). 319p.
32. PEREIRA, P.; KORBAS, M.; PEREIRA, V.; CAPPELLO, T.; MAISANO, M.; CANÁRIO, J.; ALMEIDA, A.; PACHECO, M. 2019. A multidimensional concept for mercury neuronal and sensory toxicity in fish - From toxicokinetics and biochemistry to morphometry and behavior. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*. 1863(12):129298. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.01.020>
33. PINEDO-HERNÁNDEZ, J.; MARRUGO-NEGRETE, J.; DÍEZ, S. 2015. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*. 119:1289-1295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.044>
34. RAMÍREZ CABALLERO, A.M.; PINILLA AGUDELO, G.A. 2012. Hábitos alimenticios, morfometría y estados gonadales de cinco especies de peces en diferentes períodos climáticos en el río sogamoso (Santander). *Acta Biológica Colombiana*. 17(2):241-258.
35. RICE, K.M.; WALKER, E.M.; WU, M.; GILLETTE, C.; BLOUGH, E.R. 2014. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*. 47(2):74-83. <https://doi.org/10.3961/jpmph.2014.47.2.74>
36. ROJAS, M.; WALKER, L. 2012. Malformaciones congénitas: aspectos generales y genéticos. *International Journal of Morphology*. 30(4):1256-1265. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022012000400003>
37. SAAVEDRA, S.; FERNÁNDEZ-RECAMALES, Á.; SAYAGO, A.; CERVERA-BARAJAS, A.; GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, R.; GONZALEZ-SANZ, J.D. 2021. Impact of dietary mercury intake during pregnancy on the health of neonates and children: a systematic review. *Nutrition Reviews*. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab029>
38. SEGURA-GUEVARA, F.; LÓPEZ-CORRALES, H.; MEDRANO DE LA HOZ, C.; OLAYA-NIETO, C.W. 2017. Biología reproductiva de Liseta *Leporinus muyscorum* Steindachner, 1901 en el río Sinú, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*. 22(1):5728-5737. <https://doi.org/10.21897/rmvz.932>
39. STRUNGARU, S.-A.; ROBEA, M.A.; PLAVAN, G.; TODIRASCU-CIORNEA, E.; CIOBICA, A.; NICOARA, M. 2018. Acute exposure to methylmercury chloride induces fast changes in swimming performance, cognitive processes and oxidative stress of zebrafish (*Danio rerio*) as reference model for fish community. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 47:115-123. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.01.019>
40. YU, X.; KHAN, S.; KHAN, A.; TANG, Y.; NUNES, L.M.; YAN, J.; YE, X.; LI, G. 2020. Methyl mercury concentrations in seafood collected from Zhoushan Islands, Zhejiang, China, and their potential health risk for the fishing community. *Environment International*. 137:105420. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105420>
41. ZAPATA, L.A.; USMA, J.S. 2013. Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. Vol. 2. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia (Bogotá, D.C., Colombia). 486p.
42. ZHENG, N.; WANG, S.; DONG, W.; HUA, X.; LI, Y.; SONG, X.; CHU, Q.; HOU, S.; LI, Y. 2019. The toxicological effects of mercury exposure in marine fish. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 102(5):714-720. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02593-2>



# Exposure of workers in tanneries, construction and beauty salons in Armenia to occupational environmental pollution. Case study

## Exposición de los trabajadores de curtiembres, obras de construcción y salones de belleza de Armenia a contaminación ambiental laboral. Caso de estudio

Milena E. Gómez-Yepes<sup>1\*</sup> ; Rafael H. Villamizar-Vargas<sup>1</sup> ; Olga L. Rendón-García<sup>1</sup> ; Lázaro V. Cremades<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad del Quindío, Facultad de Ciencias de la Salud, Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo. Armenia - Quindío, Colombia; e-mail: milenagomez@uniquindio.edu.co; rhvillamizar@uniquindio.edu.co; olgarendon@uniquindio.edu.co

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de Projectes i de la Construcció. Barcelona, Spain; e-mail: lazaro.cremades@upc.edu

\*corresponding autor: milenagomez@uniquindio.edu.co

**How to cite:** Gómez-Yepes, M.E.; Villamizar-Vargas, R.H.; Rendón-García, O.L.; Cremades, L.V. 2022. Exposure of workers in tanneries, construction and beauty salons in Armenia to occupational environmental pollution. Case study. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1960. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1960>

Open access article published by Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, under Creative Commons License CC BY-NC 4.0

Official publication of the Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, University, Accredited as a High-Quality Institution by the Colombian Ministry of Education.

**Received:** May 20, 2021

**Accepted:** September 22, 2022

**Edited by:** Helber Adrian Arévalo

### ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the working and health conditions of workers in three sectors of the economy of Armenia, Colombia (tanneries, construction sites, and beauty salons) exposed to chemical and physical agents. A descriptive observational study of the working conditions and health of workers in their work environments was carried out, by visiting 10 companies per sector. The evaluation of working conditions in construction sites gave High (high risk), as well as in tanneries. Beauty salons gave an evaluation of Medium (medium risk).

Keywords: Tanneries; Construction sites; Beauty salons; Exposure; Safety and occupational health.

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar las condiciones de trabajo y salud de los trabajadores, de tres sectores de la economía de Armenia, Colombia (curtiembres, obras de construcción y

salones de belleza), expuestos a agentes químicos y físicos. Se realizó un estudio observacional descriptivo de las condiciones de trabajo y salud de los trabajadores en sus entornos laborales, visitando 10 empresas por sector. La evaluación de las condiciones de trabajo en las obras de construcción dio un resultado Alto (riesgo elevado), al igual que en las curtiembres. Los salones de belleza obtuvieron una evaluación Media (riesgo medio).

Palabras clave: Curtiembres; Salones de belleza; Construcción; Exposición; Seguridad y salud en el trabajo.

### INTRODUCTION

Breathing quality indoor air is critical for good health because people spend a large amount of time indoors. In works related to the measurement of indoor air quality, the focus has been on determining the environmental conditions and chemical compounds in the air in the spaces where people live. To assess the risk of indoor air pollution, the four elements of any risk assessment must be considered (Qiu *et al.* 2019; Carazo Fernández *et al.* 2013;

Cremades, 2006): risk identification, dose-response assessment, exposure assessment, and risk characterization.

For leather production, chemical tanning uses primarily mineral salts such as chromium sulfate, and alternatively fish oils or synthetic tannins. Some factories have highly mechanized systems and use closed automatic systems and many chemicals. Among the chemical agents, the wide variety of acids, alkalis, tannins, solvents, disinfectants, chromium, and bleaching agents, among others, can be irritating to the respiratory tract and skin. In Colombia, numerous industries handle Cr compounds, including tanneries. Official data report approximately 800 tanneries in operation, of which 60 % are located in Bogotá (Cuberos *et al.* 2009). Exposure to Cr<sup>6+</sup> as a predominantly occupational risk is considered a Group I carcinogen by the International Agency for Research on Cancer (IARC, 1995). But, Cr<sup>3+</sup> used in the tannery industry in the form of chromium salts has not been proven to be carcinogenic (González Fernández, 1992; Cohen *et al.* 1993; Cuberos *et al.* 2009; Rangel Cordova *et al.* 2015; Alibardi & Cossu, 2016). As for physical agents, noise can represent a problem in many of the machines used, especially in drums and routers, because they generate sound pressure levels above 85 dB(A) (United States Department of Labor, 2022).

On the other hand, on construction sites, workers are exposed to a wide variety of health hazards. Exposure varies from job site to job site; exposure to any hazard is usually intermittent and of short duration, but is likely to recur. A worker may not only encounter the primary hazards of his or her work but may also be exposed as a passive observer to hazards generated by those working in his or her vicinity. This pattern of exposure is one of the consequences of having many jobs of relatively short duration and working alongside workers in other risk-generating jobs. The severity of each risk depends on the concentration and duration of exposure for a given job. As in other jobs, the risks for construction workers are usually chemical (paints, varnishes, particulate matter) and physical (noise from drills, machinery, welding, etc.). Then, pollutants can come from: noise pollution, solid and liquid waste, water pollution, harmful gases, and dust (Enshassi *et al.* 2014).

In the case of hairdressing salons, many associated hazards can pose a risk to both the safety and health of customers and workers, such as physical, chemical, mechanical, and biomechanical hazards, the latter having the greatest impact. Contact with products containing hazardous chemicals poses a significant risk, since they cause injuries or conditions by inhalation, skin contact, or accidental ingestion (dyes, solvents, enamels), in addition to the noise of the dryers (Caraballo-Arias *et al.* 2013; Lozano Ramírez & Montero Martínez, 2015; Baghania *et al.* 2018).

One of the aims pursued by the Colombian legislation on occupational safety and health is to improve working conditions; for this, not only must there be the resources, methods, and/or techniques to identify what these working conditions are, but it must also be possible to assess their degree of adequacy: from identifying very unfavorable situations that have to be urgently

modified, to situations where working conditions, in principle, are adequate (Mintrabajo, 2015).

In Armenia, there are approximately 18 tanneries, 120 construction sites, and 250 beauty salons. The predominant pathologies in workers in these sectors due to uncontrolled exposure to chemical agents are (Cremades, 2006; Chandra Kashyapa *et al.* 2021): contact dermatitis, rhinitis and conjunctivitis, bronchial asthma and irritative respiratory diseases.

Therefore, the objective of this research was to evaluate the working and health conditions of workers in three sectors of the economy of Armenia (tanneries, construction sites, and beauty salons) exposed to atmospheric pollutants, as well as other chemical and physical agents.

## MATERIALS AND METHODS

A descriptive observational study of the working conditions and health of workers in the work environments of tanneries, construction sites, and beauty salons was carried out. Due to budgetary limitations, convenience sampling was chosen, in this case, 10 companies per sector. Of these companies, 10 % of the workers in construction sites and tanneries and 50 % in beauty salons were studied.

The study included reconnaissance visits through a structured guide and field diary, sampling of basic hygiene measurements of exposure to atmospheric pollution (noise, lighting, and particulate matter), and surveys of working and health conditions.

For environmental sampling, some equipment and instruments were used (sound level meters, personal sampling pumps, dosimeters, with their respective calibrators). The analytical methods followed the American Conference of Governmental Industrial Hygienists' international standards (ACGIH, 2021). For the illumination level, an Extech Instruments HD 450 luxmeter, certificate LX-13016865-7963, was used. For noise, a 3M sound level meter model SD-200 Class 2 Integrating SLM, certificate 288082SD20013144, +/-2.2% acoustic (0.19 dB). For the total dust sample, a GilAir Plus Gilian Assembly, STP, P/N 610-0901-03-R personal air sampling pump. The filters used were silical 5.0 µm PH-PVC 37 mm. A silica gel desiccator and a Precisa 405M-200<sup>a</sup> analytical balance were also used. The analytical method used was the NIOSH standard 500 "Total non-respirable dust" (NIOSH, 1994).

The sampling of particulate matter in the construction sector lasted a 9-hour working day. The sampling time was 60 minutes at a flow rate of 1.7 L min<sup>-1</sup>.

To define the working conditions, the atmospheric pollutants to which workers are exposed were identified, located, and assessed, using national and international standardized analytical methods from the National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH) 0500 and ACGIH (ICONTEC, 1995; 1997a; 1997b; ISO, 2018; ACGIH, 2021). In addition, a self-reporting tool of health conditions was used, which allows knowing the

morbimortality and absenteeism due to occupational events generated by exposure to air pollutants.

## RESULTS AND DISCUSSION

In the workspace discomfort surveys, problem areas were found to be the passageways and the facilities themselves. As can be seen in figure 1, 24 % of the construction workers expressed discomfort with the transit zones and 14.3 % with the facilities. This is because the spaces are obstructed by materials, impeding pedestrian areas. There was little evidence of this in beauty salons. In tanneries, 30 % do not have adequate transit zones.

In terms of exposure to physical agents, workers reported discomfort

from noise (hairdressers from the hairdryers and workers from the polishing machines). However, in the tanneries, noise does not exceed the maximum permissible limit of 85 dB. Construction workers complained about the ambient heat and warehouse workers about the poor lighting.

The workers coincided with the presence of discomfort due to exposure to chemical agents. In construction, 57 % of the workers reported discomfort from particulate material, which is not a single pollutant, but rather is a mixture of many chemical species. In beauty salons, 47 % of the stylists reported discomfort from the use of chemical products. In tanneries, 48 % of the workers also reported discomfort from the chemicals used in the leather process. Stylists and tannery workers also coincided with the discomfort

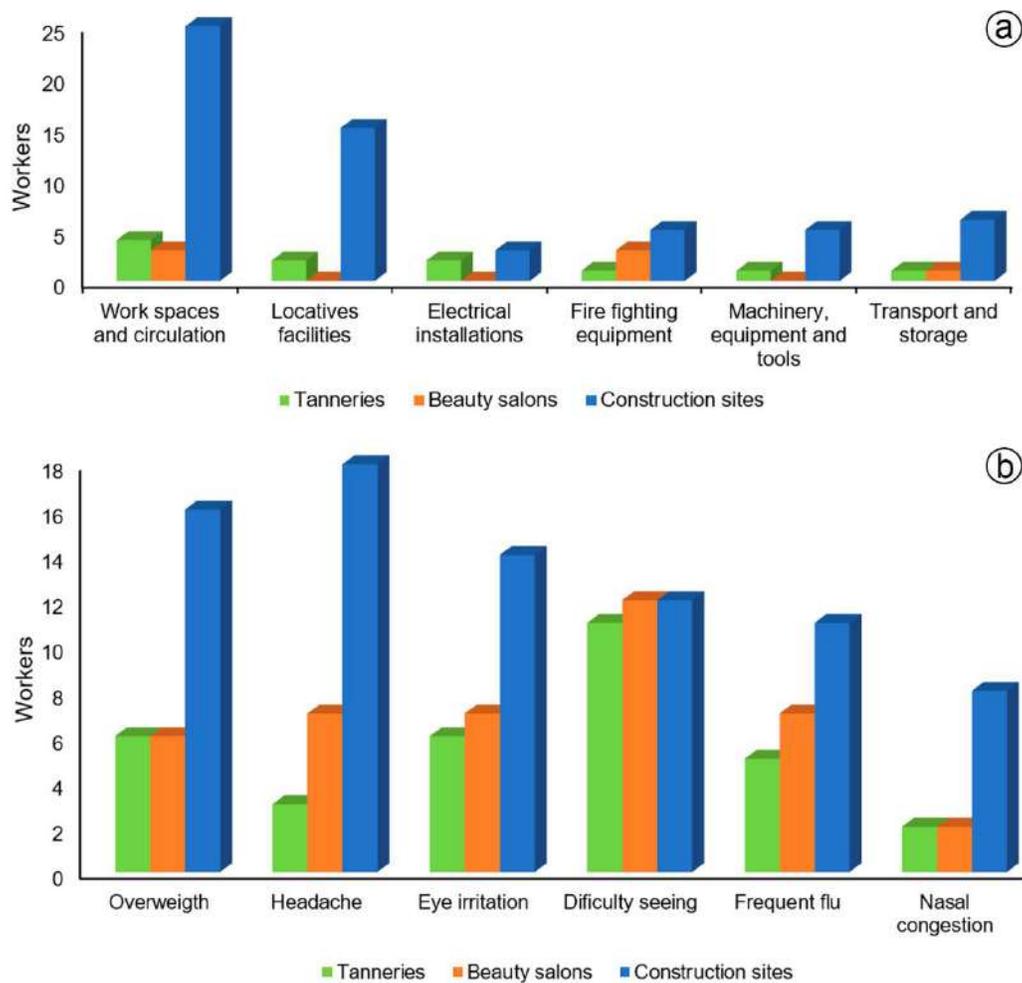


Figure 1. Working and health conditions in the tanneries, beauty salons and constructions sites visited, according to the discomfort surveys. a) Poor security conditions; b) Healthy conditions.

caused by the gases and vapors given off by the chemical products when handling them.

As for poor ergonomic conditions, 54.2 % of the construction workers and 40 % of the workers in beauty salons agreed that they had discomfort due to long hours of work with postural strain,

especially those in construction, who have to work against the clock on construction sites. Only in a high season do stylists work more than 12 hours a day.

Regarding organizational conditions, construction site workers and tannery workers expressed dissatisfaction with the provision of

restrooms. They also reported deficiencies in economic incentives and long working hours.

As shown in figure 1, approximately, 15 % of the workers surveyed suffer from being overweight, and 20 % from headaches. It can also be seen that they have difficulty seeing up close or far away. On the other hand, it can be seen that both construction and tannery workers suffer from physical exhaustion or fatigue, as well as fatigue when getting up.

According to the sociodemographic study of the workers surveyed, the predominant gender in the construction and tannery sectors is male, while in the beauty salon sector it is predominantly female. The predominant ages in these sectors are between 21 and 40 years old, which is equivalent to more than 51 % of the working population. As for the predominant positions in the companies visited, in the tanneries, 72 % are miscellaneous jobs. In the beauty salons, stylists account for 71.8 %. In construction, the position of assistant represents 50.4 %, followed by miscellaneous jobs with 29.5 %.

In terms of experience in construction sites, 90 % of the workers have up to one year, 31.2 % of the stylists have between 10 and 20 years and in tanneries, they have about 5 years of work. 52.3 % of construction workers have a high school education, as well as 31.2 % of stylists and 40 % of tanners. But, only 10 % of them completed secondary school. In the beauty salon sector, the main choice was for technical beauty studies. Of the 162 workers surveyed, 17.3 % reported other studies, with a preference for image consulting and

English. In addition, 44 % of the workers practice some type of sport or art (soccer, cycling, skating, dancing, painting, weaving).

The evaluation of working conditions in construction sites gave **High**, as well as in tanneries. Beauty salons gave an evaluation of **Medium** due to the handling of chemical products and exposure to physical agents.

The basic hygienic conditions of the analyzed posts (general areas, leather finishing, painting, and ironing; manicurist, stylist; warehouse, welding, and assembly of beams and windows) were:

**Lighting:** the overall average lighting (Table 1) shows how in construction sites, administrative and warehouse facilities are temporary, and lighting conditions are not adequate, as they are below the recommended value.

**Noise:** The result for the tanneries is **73 dB(A)**, which does not exceed the noise Threshold Limit Value (TLV) of 85 dB(A) (MinTrabajo & MPSPS, 1990). It should be noted that all the tanneries visited have very controlled noise levels. For the beauty salons, the noise level is **79 dB(A)** in the use of hair dryers, which does not exceed the noise TLV. In construction sites, the polisher produces a noise of **91.8 dB(A)** with the circular saw without cutting and **99 dB(A)** with cutting, working an average of 4 hours a day. All exceed 85 dB(A) daily and the risk level is **7.01**, indicating a high noise risk. The use of adequate hearing protection was not detected (Londoño Ciro, 1996).

Table 1. Lighting levels in indoor conditions in three sectors of the economy of Armenia, Colombia.

Activity	Recommended level (lux)	Measured level (lux)
Tanneries	500-750-1000	488
Beauty salons	500-750-1000	856
Construction sites	200-300-500	
Administration and warehouse		193.3
Welding		67.5 – 214.5
Pipe installation		55.05

In the construction sector, the theoretical TLV for lime and cement is 10 mg m<sup>3</sup>. The concentration measured was **20.6 mg m<sup>3</sup>**. The degree of risk is **2.058** (Very high). The personal protection element used by the workers is a common disposable mask, not effective for high dust concentrations.

At the construction sites, safety measures for high-risk tasks are deficient. Concerning individual protection, inadequate use of personal protective equipment was observed; helmet-type hearing protectors are used incorrectly, in addition to eye protection.

All tanneries have managed to minimize noise, which does not exceed 80 dB(A), but as for respiratory protection, they use an inadequate element for protection against gases and vapors.

In the esthetics sector, the beauty salons, in compliance with local safety requirements, have controlled noise and the asepsis of the utensils. It was observed that 30 % of the salons adequately use personal protective equipment for handling dyes and colorants.

**Conflicts de interest:** The manuscript was prepared and reviewed with the participation of all the authors, who declare that there

is no conflict of interest that could jeopardize the validity of the results presented.

## REFERENCES

- ALIBARDI, L.; COSSU, R. 2016. Pre-treatment of tannery sludge for sustainable landfilling. *Waste Management*. 52:202-211. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.008>
- AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, ACGIH. 2021. TLVs and BEIs: Threshold limit values for chemical substances and physical agent: Biological Exposure Indices. ACGIH. 190p.
- BAGHANIA, A.N.; ROSTAMI, R.; ARFAEINIA, H.; HAZRATI, S.; FAZLZADEH, M.; DELIKHOON, M. 2018. BTEX in indoor air of beauty salons: Risk assessment, levels and factors influencing their concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 159:102-108. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.044>
- CARABALLO-ARIAS, Y.; RODRÍGUEZ, A.R.; RIVERO, Á.J.; RANGEL, R.G.; BARRIOS COVARO, M. 2013. Riesgos laborales en trabajadores de barberías y peluquerías de economía informal. *Caracas, Venezuela. Ciencia & trabajo*. 15(46):18-23. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492013000100005>
- CARAZO FERNÁNDEZ, L.; FERNÁNDEZ ALVAREZ, R.; GONZÁLEZ-BARCALA, F.J.; RODRÍGUEZ PORTAL, J.A. 2013. Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*. 49(1):22-27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- CHANDRA KASHYAPA, G.; KUMAR SHARMAB, S.; KANT SINGHB, S. 2021. Prevalence and predictors of asthma, tuberculosis and chronic bronchitis among male tannery workers: A study of Kanpur City, India. *Clinical Epidemiology and Global Health*. 9:71-77. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2020.07.002>
- COHEN, M.D.; KARGACIN, B.; KLEIN, C.B.; COSTA, M. 1993. Mechanisms of Chromium carcinogenicity and toxicity. *Critical Reviews in Toxicology*. 23(3):255-281. <https://doi.org/10.3109/10408449309105012>
- CREMADES, L. 2006. Contaminación química de aire en espacios interiores, UPC PLUS. BCN. 76p.
- CUBEROS, E.; RODRÍGUEZ, A.I.; PRIETO-SUÁREZ, E. 2009. Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*. 11(2):278-289.
- ENSHASSI, A.; KOCHENDOERFER, B.; RIZQ, E. 2014. An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Revista ingeniería de construcción*. 29(3):234-254. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, E. 1992. Toxicocinética y evaluación de riesgos para la salud producidos por la exposición a los compuestos de cromo. *Medicina y Seguridad en el Trabajo*. 38:3-27.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC. 1995. NTC 3701. Higiene y Seguridad. Guía para la clasificación, registro y estadística de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. ICONTEC. 31p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC. 1997a. NTC 4116 Seguridad Industrial. Metodología para el análisis de tareas. ICONTEC. 19p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC. 1997b. NTC 4114 Seguridad Industrial. Realización de Inspecciones Planeadas. ICONTEC. 10p.
- INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, IARC. 1995. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol.62. Lyon (France). 423p.
- LONDOÑO CIRO, J. 1996. Higiene III. Factores de riesgo químico. Universidad del Quindío. 24p.
- LOZANO RAMÍREZ, T.; MONTERO MARTÍNEZ, R. 2015. Análisis de los riesgos ocupacionales que se originan en peluquerías y lugares de estéticas: proposiciones para su control. *El Hombre y la Máquina*. 46:59-71.
- MINISTERIO DE TRABAJO, MINTRABAJO. 2015. Decreto 1072 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. MinTrabajo. 326p. Disponible desde internet en: <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/0/DUR+Sector+Trabajo+Actualizado+a+15+de+abril++de+2016.pd/f/a32b1dcf-7a4e-8a37-ac16-c121928719c8> (con acceso el 21/04/2021).
- MINISTERIO DEL TRABAJO, MINTRABAJO; MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, MPSPS. 1990. Resolución 1792 DE 1990. Por la cual se adoptan valores límites permisibles para la exposición ocupacional al ruido. 2p.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, NIOSH. 1994. Particulates not otherwise regulated, total: Method 0500. Fourth edition. NIOSH

- Manual of Analytical Methods NMAM. 3p.
21. ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, ISO. 2018. ISO 45001 Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo - requisitos con orientación para su uso. ISO (Suiza). 60p. Disponible desde internet en: <https://www.unidadvictimas.gov.co/sites/default/files/documentosbiblioteca/iso-45001-norma-internacional.pdf> (con acceso el 14/01/2021).
  22. QIU, Y.; YANG, F.-A.; LAI, W. 2019. The impact of indoor air pollution on health outcomes and cognitive abilities: empirical evidence from China. *Population and Environment*. 40:388-410.  
<https://doi.org/10.1007/s11111-019-00317-6>
  23. RANGEL CORDOVA, A.A.; ISARAIN CHÁVEZ, E.; MALDONADO VEGA, M. 2015. Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de un pasivo ambiental. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 31(4):427-437.
  24. UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR. 2022. Occupational Noise Exposure. Disponible desde Internet en: <https://www.osha.gov/noise>



# Territorio y minería: la necesidad de precisar un enfoque para su abordaje

## Territory and mining: the need to specify a focus for their approach

Adriana Posada-Arrubla<sup>1\*</sup> ; Daniela Flórez-Portilla<sup>2</sup> ; Laura Daniela Torres-Camacho<sup>2</sup> ; Ricardo Viana-Ríos<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Docente-Investigadora, independiente, Medellín, Colombia; e-mail: [adriaposada@yahoo.es](mailto:adriaposada@yahoo.es)

<sup>2</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá, Colombia; e-mail: [daniiportilla77@gmail.com](mailto:daniiportilla77@gmail.com), [lau\\_torres704@hotmail.com](mailto:lau_torres704@hotmail.com)

<sup>3</sup>Banco de Información Minera del Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia; e-mail: [rvianarios@gmail.com](mailto:rvianarios@gmail.com)

\*autor de correspondencia: [adriaposada@yahoo.es](mailto:adriaposada@yahoo.es)

**Cómo citar:** Posada-Arrubla, A.; Flórez-Portilla, D.; Torres-Camacho, L.D.; Viana-Ríos, R. 2022. Territorio y minera: la necesidad de precisar un enfoque para su abordaje. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2305. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2305>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** diciembre 1 de 2021

**Aceptado:** julio 6 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Las actividades sobre el planeta cambian y también la forma de observarlas, pero frente a la cantidad de situaciones que se circunscriben alrededor de las actividades extractivas, es conveniente, para todas las partes implicadas, buscar una mayor precisión en el enfoque sobre estos asuntos complejos; por eso, el objetivo de este escrito es aportar ideas, para ajustar el enfoque territorial de la actividad minera, con miras al desarrollo sostenible. Para ello, se utilizó una metodología aplicada a un caso real en Colombia, que permite expresar un enfoque combinado, en el cual, el espacio responde al dónde; la actividad minera representa el qué; la gradualidad del tiempo define el cuándo y, el desarrollo sostenible, proyectado en conjunto con los actores, define el para qué. Se logró una ubicación y, a la vez, representación multiescalar, a través de una región de influencia minera. Para mostrar interrelaciones, se realizó una caracterización minera sobre esos cuatro aspectos esenciales: lugar, actividad, tiempo y objetivo. También, se definió una trayectoria multitemporal para la gradualidad de las acciones en el tiempo y, desde la perspectiva comunitaria, se llevó a cabo la integración de propuestas organizadas en cuatro conjuntos. Se concluye que, para una minería más justa y mejor, nos conviene ampliar el radio de observación, considerar el pasado, presente y futuro y mirar desde la óptica de otros. Esto significa, cambiar las perspectivas, trazar nuevos horizontes e integrar acciones hacia objetivos comunes, que minimicen conflictos y potencien oportunidades más equitativas en las relaciones socioambientales.

Palabras clave: Desarrollo sostenible; Geografía aplicada; Minería sostenible; Ordenamiento Minero; Ordenamiento Territorial.

### ABSTRACT

Activities on our planet change, as does the way of observing them. But in the face of the number of situations that are circumscribed around extractive activities, it is convenient for all parties involved, to seek greater precision in the approach to these complex issues; therefore, that is why the purpose of this text is to provide ideas, so as to adjust the territorial approach of the mining activity, leading to sustainable development. To do this a methodology was applied to a real case in Colombia, where space pertains to the location; mining activity represents the purpose; the gradual progression of time defines when, and sustainable development projects are the goal. A multi-location and representation were achieved, a mining characterization on four essential aspects to show interrelations, as well as a multi-temporal trajectory for the gradual progression of actions over time, and, from the community perspective, the integration of proposals in four sets. It is concluded that, for fairer and better mining, it is convenient for us to expand the radius of observation, to consider the past, present and future, adopts others viewpoints. This means changing perspectives, drawing new horizons and integrating actions towards common objectives that minimize conflicts and enhance more equitable opportunities in socio-environmental relations.

Keywords: Applied geography; Mining regulation; Sustainable development; Sustainable mining; Territorial planning.

## INTRODUCCIÓN

La minería en el pasado fue muy diferente a lo que hoy se conoce y, en el futuro, por supuesto, también será distinta. La minería es una actividad que ha acompañado el desarrollo de la existencia humana. Como antecedente, la historia de la interacción humana con los recursos minerales se inició en África, en el paleolítico medio, es decir, hace 300.000 años (Salazar S. & Vilches, 2014). Lamentablemente, en la región de los Andes, son pocas las evidencias arqueológicas e históricas sobre la minería precolombina; sin embargo, en la modernidad, se registran datos de América Latina, al posicionarse con la actividad extractiva, hasta el punto que, en 1990, era el destino principal de la inversión minera mundial, con el 82 %, concentrado en cinco países: Perú, Chile, Brasil, México y Colombia (Martínez Espinosa, 2019).

Respecto a Colombia, Campuzano Cuartas (1994) realizó un compendio sobre la minería, estableciendo que, históricamente, no fue un asunto central, sino un subtema parcialmente perceptible al interior de la historia del desarrollo económico del país. De aquí, se deduce que el vector para ir enmarcando el análisis de la actividad minera debe ser el desarrollo, pero actualizado en su versión evolucionada, es decir, en el marco del desarrollo sostenible.

De otra parte, en un contexto global y con el ánimo de evidenciar cómo cambia la forma de ver una misma actividad, es oportuno mencionar otro tipo de minería, que ya no solo se realiza en tierra firme o en el océano, sino en el espacio, por fuera de la tierra: se trata de aquella minería que es realizada en los asteroides, la que, según Marinho Amorín & Reis Rochoael (2019), representa la oportunidad de una actividad con continuidad renovada, para no empezar de cero, sino evitar los errores ya cometidos, al poder llevarla a cabo, de una mejor manera, en los cuerpos celestes.

Es así, como en el trasegar de la minería en el tiempo y en diferentes lugares, se hace necesario ir puliendo la forma de abordarla, de interpretar la actividad y de darle un enfoque más integrador, que comprenda diferentes miradas, escalas, saberes y necesidades. Para empezar, es clave remitirse a la etimología de la palabra enfoque, explicada como la acción de dirigir la atención hacia un asunto (Diccionario etimológico de Chile, 2021); tal idea específica está en coincidencia directa con uno de los cuatro significados proporcionados por la RAE (2021), sobre el enfoque, mientras que, los otros tres significados del concepto, se apoyan en la fotografía, explicándolo como la captación de una imagen central sobre un plano, gracias a la concentración de la luz en ella.

Con ello, se deduce que, de una manera simple y concreta, es desde la perspectiva de la fotografía, como se puede entender el enfoque. Ahora, desde la fotografía, Rigat (2019) explica que el enfoque se ha modificado de lo manual a lo digital, es decir, cambia el uso de la tecnología, pero, de cualquier modo, el acontecimiento en un tiempo-espacio real que se quiere captar sigue siendo el mismo, que se representa en una imagen.

Además de lo anterior, es preciso considerar que la acción de darle enfoque a algo, para lograr una imagen objetivo, también ha ido cambiando. Un ejemplo de ello, es la ecografía que, como medio de diagnóstico médico, corresponde a una especialidad de la imagenología y, en vez de una imagen explícita y directa, lo que utiliza son ecos o sonidos emitidos por ondas de ultrasonido, como base para generar la imagen requerida (Águila Carbelo *et al.* 2019).

Otros ejemplos sobre el enfoque, se encuentran en disciplinas que trabajan temas territoriales. En el caso de la geografía, como ciencia híbrida, sus enfoques, según Cuadra (2014), pueden ser general-sistemática, regional, ecológica, económica, humana, cultural, cuantitativa, humanista y ambiental, entre otros, dependiendo del paradigma que se quiera establecer. Otro ejemplo es en la agricultura, donde se buscan redes de innovación multiescalar (Samper, 2019). Por lo tanto, cada enfoque utiliza un modo, procedimiento, método y respuesta particular frente a una situación, en un tiempo-espacio determinado.

En particular, el enfoque territorial, según Morales Barragán & Jiménez López (2018), comprende como fundamentos a los actores, a las dimensiones territoriales y a las escalas espaciales en niveles, mientras que para Carvajal Lombana (2017), incluye la visión holística del territorio, y, por ende, una visión sistemática planeada para corto, mediano y largo plazo, como parte del uso eficiente del territorio, para su administración inteligente. En todo caso, el enfoque territorial no es algo simple, es complejo, en tanto exige precisión para observar variadas relaciones entre escalas, dimensiones, objetivos, actores, actividades e intereses.

Ahora, para no perder de vista el fin perseguido al promover un enfoque territorial, se acude a revisar la variación que ha tenido la perspectiva del desarrollo, sobre el cual, Iturralde Durán (2019) diferencia el cambio de su enfoque por épocas: primero, el de crecimiento, luego, el de desarrollo social, visto desde la economía; posteriormente, el desarrollo sostenible y, ahora, el desarrollo humano sostenible. Precisando un poco más respecto al enfoque sobre el desarrollo en América Latina, Cáliz R. (2016) sostiene que ha migrado hacia un modelo socialmente justo y ecológicamente sustentable; por ello, se insiste en que, ahora y a futuro, la actividad minera no puede ser concebida solamente desde una perspectiva de desarrollo puro, pues, necesariamente, debe ir evolucionando en el marco de un desarrollo sostenible.

Explícitamente no es común encontrar un enfoque territorial aplicado a la actividad minera, pero existe un hito en Colombia, jalonado por la necesidad de coordinar entre los interesados, todo lo relativo al proceso de dicha actividad y es el establecido, en el 2018, por la Corte Constitucional, en sentencia SU-095, donde expresa que, para el enfoque territorial de la actividad minera:

“Deben considerarse las situaciones, características, necesidades, y especificidades ambientales, regionales, económicas, culturales y sociales de los territorios y las comunidades, propendiendo por su sostenibilidad ambiental, económica y social y, el fortalecimiento de los entes territoriales”.

Pasando al problema planteado aquí, recae en los enfoques simples o solo descriptivos de la actividad minera, que carecen de una meta integradora o que buscan lograr solo una parte del proceso, como podría ser una licencia ambiental, o la licencia minera, o una mirada desde la perspectiva ambiental exclusiva, o desde la social como conflicto, o desde la empresarial para la captación exclusiva de utilidades. Incluso, se encuentran posiciones enfrentadas, como las del WBG (2020), para quienes el proceso de apoyo a las acciones contra el cambio climático requerirá, cada vez más, el consumo de minerales e irá en aumento hacia el 2050, mientras que el proyecto Seas at Risk (2021), impulsa la eliminación de la minería hacia el mismo 2050, para que no exista ni en tierra firme, ni en el lecho marino.

Muchos de los enfoques actuales sobre la actividad minera, se concentran en los conflictos sociales, o ambientales, o en ambos. Al respecto, Poveda Bonilla (2021) señala que, durante el super ciclo de los precios de los commodities, la conflictividad social asociada a la minería fue alimentada, entre otras causas, por la insuficiente presencia del Estado en los territorios, la débil institucionalidad ambiental y social, la deficiente implementación de los mecanismos de participación indígena y ciudadana, los problemas en la distribución y uso de las rentas mineras y los impactos ambientales potenciales y reales.

Desde otra posición, Fernández-Labbé (2020) establece que son los conflictos socioambientales de la minería los que impulsan procesos de cambio para mejorar la actividad, de manera integral y, simultáneamente, en todos los aspectos. Por su parte, desde el ordenamiento territorial, Viana Rios (2018) expresa que es posible conciliar y racionalizar el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables, dada la necesidad de conservar el ambiente y mejorar las condiciones sociales y económicas de los territorios.

Puesto que existe un vacío en el enfoque para optimizar lo relacionado con la actividad minera, surge la pregunta de investigación del artículo: ¿Cómo ajustar un enfoque territorial de la actividad minera que aporte al desarrollo sostenible? Una forma de buscar la respuesta es precisar sobre lo que se sugiere buscar o encontrar. Y lo que se quiere encontrar es el enfoque sobre algo, que podría denominarse **X**, para lograr una situación, que debe conducir a un **Y**.

Entonces, por un lado, el enfoque no debe ser genérico sobre la minería, sino sobre la actividad minera, que funciona como el **X**. Por otro lado, el fin del enfoque no debe ser solo para el desarrollo, sino para el desarrollo sostenible, que funciona como el **Y**. A partir de esta premisa, se traza el objetivo de este artículo, como el de aportar ideas, que permitan ajustar un enfoque territorial de la actividad minera, conducente al desarrollo sostenible.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El método sugerido y, al mismo tiempo, llevado a cabo como aplicación, utiliza las siguientes cuatro claves, para un enfoque territorial de la minería: el espacio, el objeto o centro del abordaje, el tiempo y el objetivo o fin.

Para cada una de estas claves, se presenta una precisión: el espacio debe ser multiescalar, puesto que varias escalas georeferenciables ayudan a concebir interrelaciones; el centro del abordaje es el que se requiera profundizar, en este caso, es la actividad minera; el tiempo debe ser multitemporal, ya que varios momentos ayudan a trazar trayectoria gradual de dinámicas; al evolucionar la actividad minera, en el marco del desarrollo sostenible, el objetivo de esta actividad pasa de ser solo extractivista a ser una actividad con altos estándares técnicos y con responsabilidad socioambiental.

Para hacer más entendible el objetivo trazado en este artículo, se presenta una aplicación en un caso real de Colombia, como parte de una investigación en el grupo de Investigaciones geográficas para el desarrollo territorial, de Ingeniería Geográfica y Ambiental de la U.D.C.A. Se trata del caso Soacha-Cundinamarca, municipio que corresponde al distrito minero de mediana producción de la Sabana de Bogotá, donde afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, que permiten la extracción de gravas y arenas (Pulido González, 2019). En esta aplicación, se tomaron en cuenta las cuatro claves metodológicas sugeridas para un enfoque territorial, explicadas, paso a paso, como metodología.

**Contexto o ubicación de la actividad minera de forma multiescalar.** Un asunto es que la actividad minera se desarrolle en un polígono o sitio específico con coordenadas particulares, pero otro es, que el enfoque territorial debe considerar escalas diversas, debido a que esta actividad comprende un encadenamiento de procesos que van más allá del sitio de su extracción en bruto. Como parte del mercado, el material extraído pasa de sitio en sitio, hasta llegar a su destino final y, en este tránsito, va contando, como producción y comercialización, ya no solo local, sino regional, departamental o nacional. El lugar minero, se puede circunscribir en una variedad de espacios que, dependiendo de sus atributos, tiene funciones diferentes. La técnica utilizada para lograr un contexto multiescalar es la ofrecida por los sistemas de geoposicionamiento.

**El centro del foco o el objeto a enfocar: la actividad minera.** Puede ser explicada mediante cuatro aspectos básicos: ambientales, técnicos, económicos y sociales. Los ambientales, en sus componentes físicos y bióticos, en cuanto a los impactos que recaen sobre ellos; los técnicos, entendidos, en este caso, como aquellos relacionados con el tipo de minería y con el estado de los títulos mineros; los económicos, que expresan el estatus de la minería a nivel local y regional, las condiciones de la actividad primaria extractiva, la estructura empresarial de los productores legales, la generación de empleo y el manejo de las regalías y como un aspecto de gran importancia, los sociales, que atañen a los grupos de población relacionados, a los conflictos sociales derivados, a los actores de la minería y a la participación comunitaria en las decisiones de impacto colectivo.

Para obtener esta información, se recurre a la agencia nacional de minería que, como autoridad minera nacional, suministra los datos relevantes, a través de su página Web, específicamente, en el portal **ANNA minería**, de donde se descarga en Excel, una base de datos que contiene la información sobre los titulares, la etapa minera, el

tipo de título, los minerales y el periodo de vigencia del contrato de concesión.

**Trayectoria temporal de las pretensiones para la actividad minera.** Considerar el momento histórico, en el cual, se está abordando y se pretende proyectar la actividad minera, es esencial. Es obvio que todo cambia, pero hay vectores y tendencias que pueden ser indicativos claves para no solo mejorar los procesos de la actividad minera, propiamente dicha, sino para enmarcar esa mejora en los ideales y expectativas de los actores implicados. Así como existen tendencias sobre oferta y demanda, también hay trayectorias trazadas por regulaciones públicas y por situaciones socioambientales. En ese entramado de temporalidades es preciso definir unos periodos de tiempo específicos, que permitan encuadrar una gradualidad para el proceso, que conduce a las mejoras. Los periodos de tiempo no corresponden exactamente a los establecidos en la vigencia de los títulos mineros, ya que son de muy largo plazo y al incluir la posibilidad de concertar decisiones con diversos actores, es preferible considerar tiempos de tipo político, como los periodos de gobierno locales, para que la actividad se integre, de mejor manera, con las políticas territoriales. Se estableció un horizonte de tres periodos de gobierno, en el cual, el inmediato plazo, es el que cierra el periodo actual; el corto plazo, corresponde al periodo de gobierno que sigue y, el mediano, es el tercer periodo de gobierno.

**El desarrollo sostenible como objetivo interpretado desde la visión de los actores sociales.** Dado que el desarrollo sostenible es un asunto que enmarca la toma de decisiones territoriales, el cruce de las diferentes dinámicas generaliza la perspectiva macro, pero la situación micro, está representada por la palabra de los actores sociales. Por ello, las diferentes propuestas, planes, programas y proyectos planteados por los actores, se discute de manera participativa y se ubica en una escala temporo-espacial. En este caso, la comunidad estuvo representada por miembros del consejo territorial, algunos jóvenes ambientalistas, líderes de grupos sociales que trabajan en pro de una minería mejor y algunos mineros tradicionales del municipio. El taller fue informal y llevado a cabo de manera presencial, enfrentando varias dificultades propias de la pandemia. Se buscó responder, de manera genérica, a varias preguntas sobre el dónde y el cómo de la actividad minera. Para ello, se recurrió al uso del instrumento cartografía social, considerando mapas de escala local y regional. También, se utilizó el método de escenarios factibles, deseados y concertados, para ubicar las propuestas, de manera gradual, en los tres periodos ya mencionados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el mismo orden en que se plantearon las cuatro claves para el enfoque territorial de la actividad minera, se presentan, paso a paso, los resultados obtenidos en la aplicación elegida, de manera que, se pueda responder al dónde, cómo, cuándo y con quién. De esta manera, se está haciendo una relación paralela entre estas preguntas y el lugar, la acción, el tiempo y la participación de los actores, respectivamente.

**Contexto multiescalar de la actividad minera de Soacha-Cundinamarca.** Con la transformación urbana de la capital colombiana y de su entorno, desde los años 70, aumentó la demanda de materiales de construcción, incentivando las actividades de extracción en zonas periféricas del sur de Bogotá, como Soacha, lo que implicó la proliferación de minas para la extracción de arenas, gravas y arcillas. Algunas de estas minas, se desarrollaron amparadas en la ley, cumpliendo con la normatividad técnica y ambiental, pero otras, se llevaron a cabo de manera informal, ilegal y antitécnica (SAB, 2020). Por su parte, la resolución 1499 del MADS (2018), que determina las zonas compatibles de la minería en la Sabana de Bogotá, establece en los polígonos 4 y 6, las áreas del municipio de Soacha en las que se pueden desarrollar actividades mineras. De acuerdo con ello, la minería en Soacha se potencia en un contexto endógeno, por sus particularidades internas y en un contexto exógeno, por la dinámica de la oferta y la demanda regional.

Para poder establecer la relación de una actividad en movimiento con otros territorios y con otras actividades que se dan en diferentes momentos, se diseñó una región de influencia minera. El caso se sintetizó, considerando tres tipos de atributos regionales: ambientales, sociales y económicos. Tales atributos permiten ver a Soacha asociado al territorio comprendido por: las cuencas de los ríos Bogotá y Sumapaz, la Sabana de Bogotá, el primer anillo de influencia de Bogotá, la región metropolitana Bogotá-Cundinamarca, la región administrativa y de planificación especial -RAPE- y la subregión Sibaté-Soacha. De este traslape, surge la figura 1.

Se dedujo, entonces, que la región dominante para expresar las interrelaciones de la actividad minera de Soacha es la sabana de Bogotá. Al interior, se observan encadenamientos productivos incidiendo en el desarrollo desde el punto de vista de la oferta y demanda de materiales de construcción, en un ámbito geográfico, donde se captaron interrelaciones clasificadas en cuatro tipos: Fuertes-Débiles; Continuas-Discontinuas; Positiva-Negativa; Significativa-Insuficiente.

**El centro del foco o el objeto: la actividad minera en Soacha-Cundinamarca.** Con los datos extraídos desde el portal de la ANM, se establecieron varias particularidades respecto al caso estudiado. Soacha ocupa el décimo puesto de producción, a nivel departamental, principalmente, por extracción de recebo, con 1.167.395 m<sup>3</sup>; de gravas, con 658.38 m<sup>3</sup> y de arenas, con 550.044 m<sup>3</sup>. Cuenta el municipio con 61 títulos mineros, que ocupan un área de 5051.32 ha, que representa el 27,5 % de su área total (Figura 2). El estado de estos títulos, que operan desde los años 90, están clasificados entre grande (2 %), mediana (51 %) y pequeña minería (47 %): 30 activos, en la modalidad de contratos de concesión L-685; 19, en contratos de concesión D-2655; 9, en licencia de explotación; 1, en licencia de exploración y 2, en licencia especial de materiales de construcción. Además, existen 22 propuestas en evaluación, para títulos de pequeña minería, que ocupan un área de 916, 6928 ha.

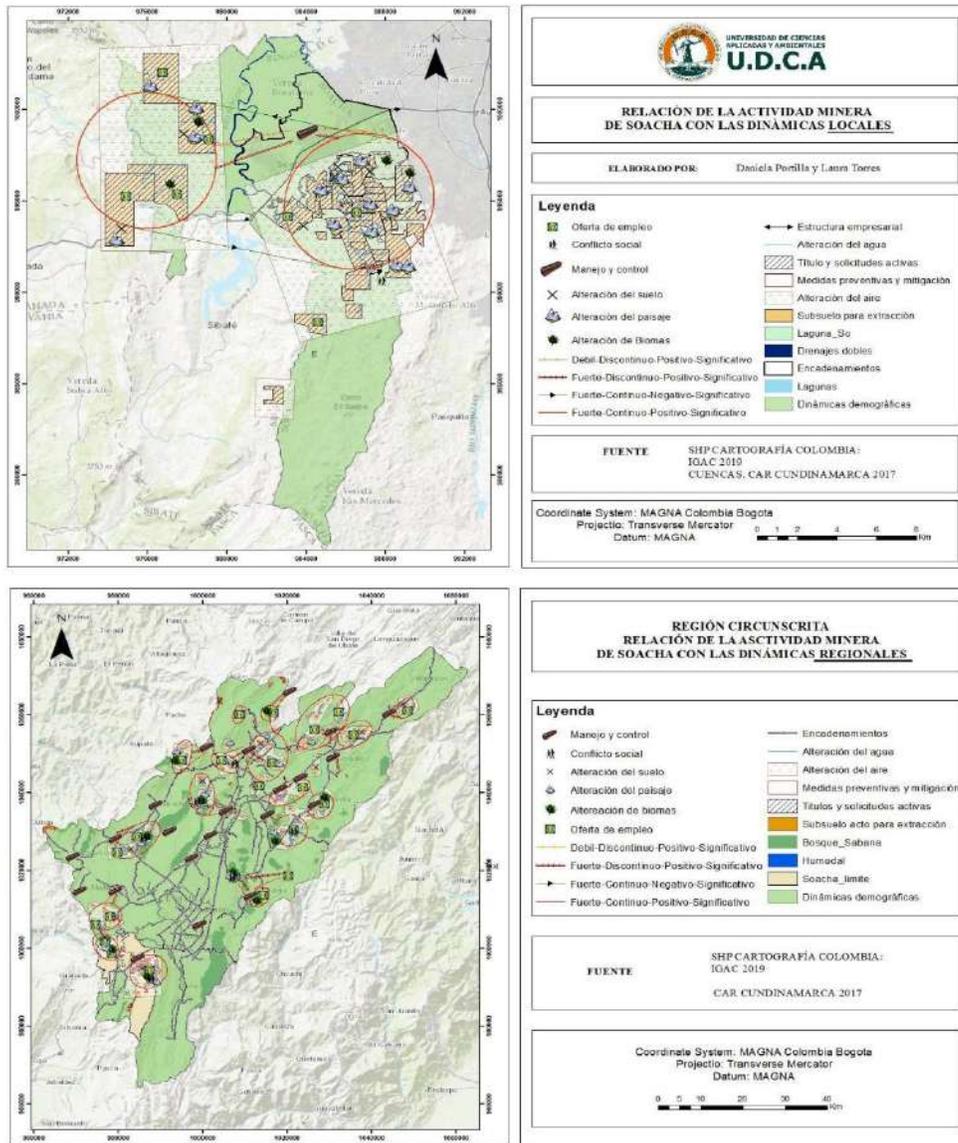


Figura 1. Región minera que circunscribe a Soacha-Cundinamarca y expresión de las relaciones locales y regionales de la actividad minera.

Por otra parte, la Contraloría de Cundinamarca (2018) estableció que en Soacha existen 136 explotaciones ilegales, correspondientes al 20 % de la explotación ilícita en el Departamento; entonces, al comparar las cifras de ilegalidad contra las de legalidad de la actividad minera, se infiere a que el camino por recorrer aún es largo y que hace falta gestión territorial y minera, para evitar mayores problemas socioambientales, en el futuro. A partir de la revisión de información, se identifica que las entidades mineras y ambientales competentes son insuficientes en el control; falta compromiso socioambiental por parte de algunos explotadores minero y hay proliferación de explotaciones ilegales.

La caracterización de la actividad minera propiamente dicha, se realizó en los cuatro aspectos básicos sugeridos, combinándolos con la tipología de dinámicas locales y regionales, tal como se muestra en la figura 3, en donde se observa, que en Soacha existen unas

dinámicas más significativas que otras, vistas en positivo y también en negativo y de donde se deduce la necesidad de considerar asuntos claves, como disponibilidad de agua, legalización de la actividad, armonización con planes de desarrollo territorial, participación comunitaria y gestión de proyectos, a través de recursos de regalías.

**Tratamiento de la escala temporal, mediado por la participación comunitaria.** Dada las condiciones para la oferta ya mencionada, en los polígonos mineros que comparte Soacha con Bogotá y Bojacá, se podría realizar un análisis tendencial de la disponibilidad del material a largo plazo, similar al que realizaron la UPME & UNAL (2014), desde la óptica pública, para escenarios prospectivos; sin embargo, en el enfoque territorial, la variable tiempo juega un papel crucial, cuando es enlazada con los deseos y satisfactores de todos los actores asociados a la minería.

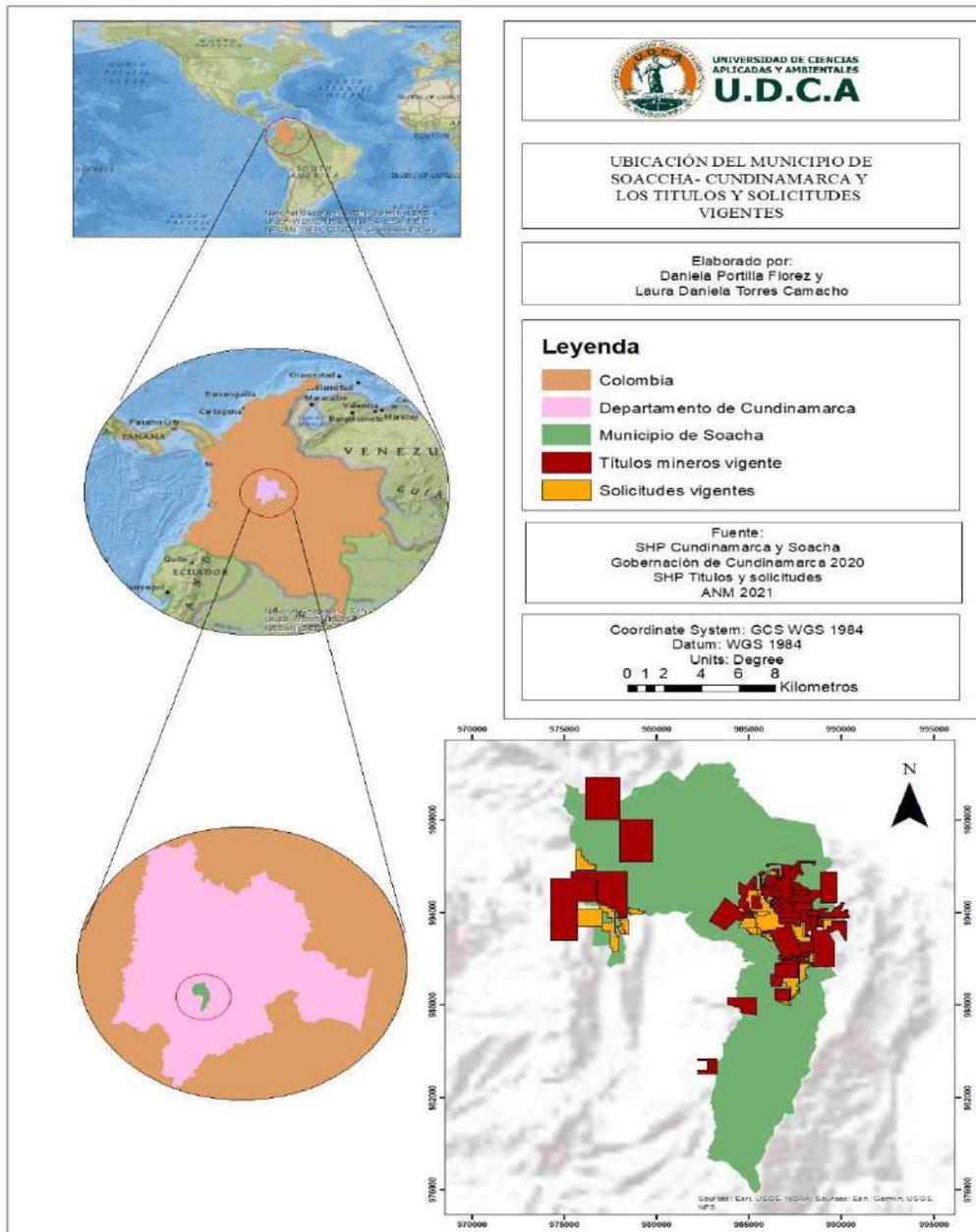


Figura 2. Ubicación del municipio de Soacha-Cundinamarca y de los títulos y solicitudes vigentes en su territorio.

Es por ello que, para el tratamiento de la escala multitemporal, se consideró una gradualidad en el tiempo, trazada por los períodos de gobierno locales en Colombia, de manera tal, que se propicie la inclusión de propuestas comunitarias en las políticas y directrices locales, regionales y nacionales, en cada cuatrienio. Dado que el taller se realizó justo en la mitad del actual periodo de gobierno, se definió como el inmediato plazo al resto del periodo actual, es decir, 2022 y 2023; el corto plazo, entre 2024 y 2027 y el mediano plazo, desde el 2028 hasta el 2031.

**El desarrollo sostenible como objetivo interpretado desde la visión de los actores sociales.** Las acciones graduales particulares sobre la actividad minera en Soacha fueron discutidas y propuestas en el taller comunitario, ya mencionado. Tales acciones, se concentran

en los siguientes cuatro conjuntos que se trazan, de manera gradual, para avanzar en cada periodo de gobierno: participación comunitaria permanente; aplicación de altos estándares técnicos, ambientales y sociales; mitigación de impactos y coordinación local y regional integral.

En la figura 4, se sintetizan las propuestas resultantes, después de pasar por el filtro de personas especializadas en minería. Los participantes en el taller enfatizaron en la necesidad de garantizar que la actividad minera en Soacha, se realice adecuadamente, desde el punto de vista técnico y ambiental, estableciendo las medidas necesarias para prevenir, mitigar, reducir y compensar los impactos negativos, que esta conlleva.

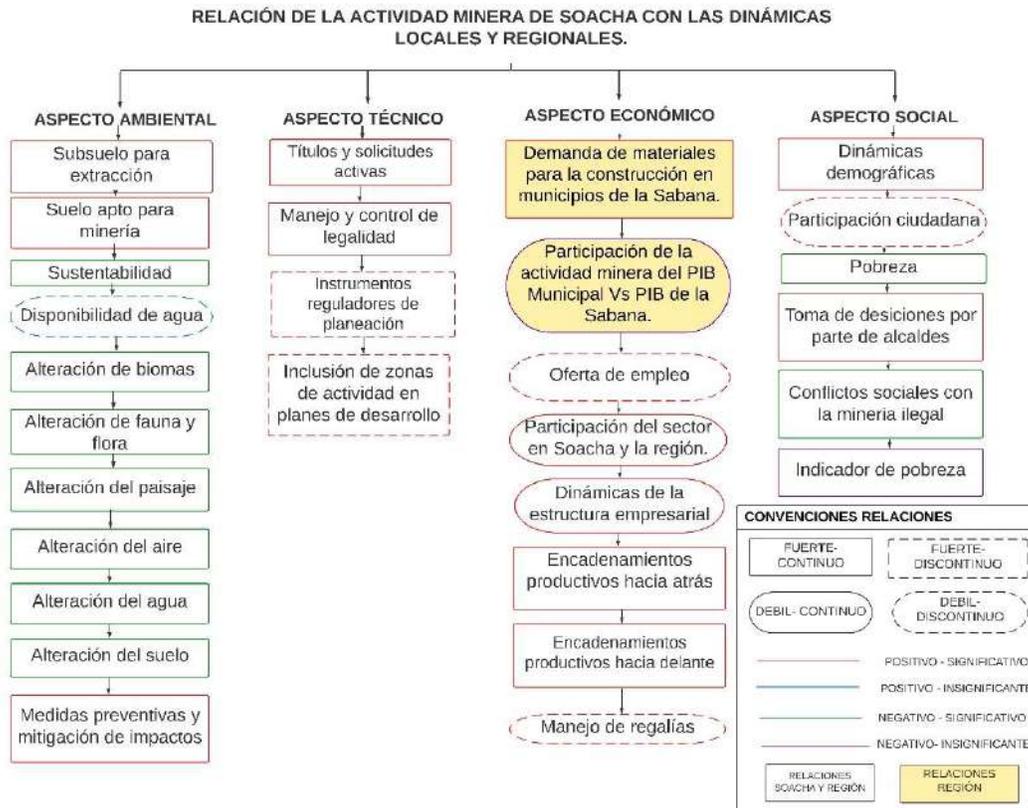


Figura 3. Aspectos básicos de la actividad minera y tipología de dinámicas locales y regionales, aplicada desde Soacha-Cundinamarca.

	<b>PARTICIPACIÓN CIUDADANA PERMANENTE</b>	<b>APLICACIÓN DE ALTOS ESTÁNDARES TÉCNICOS, AMBIENTALES Y SOCIALES</b>	<b>MITIGACIÓN DE IMPACTOS DERIVADOS DE LA ACTIVIDAD MINERA</b>	<b>COORDINACIÓN INTEGRAL ENTRE ACTORES LOCALES Y REGIONALES</b>
<b>INMEDIATO PLAZO:</b> 1ER. PERIODO DE GOBIERNO: 2022 Y 2023 (MITAD DEL PERIODO)	-Diseñar e implementar estrategias sociales. -Fortalecer mecanismos de participación activa y permanente	-Avanzar en concomimientos de ciencias. -Verificar esquemas de áreas mineras.	-Estrategias integrales y articuladas de comunicación -Estrategias territoriales	-Articulación de gobiernos. -Implementar medidas de unificación de interpretaciones jurídicas
<b>CORTO PLAZO:</b> 2º. PERIODO DE GOBIERNO: 2024 AL 2027	-Aprovechar los mecanismos de participación y concertación. -Implementar metodologías participativas	-Implementar estrategias económicas. -Formalización de títulos.	-Fortalecimiento del SIMCO en la integración de SIG. -Sector minero adopción al C.C.	-Incorporar el sector en procesos de O.T. -Coordinar el desarrollo del capital humano.
<b>MEDIANO PLAZO:</b> 3ER. PERIODO GOBIERNO: 2028 AL 2031	-Fomentar espacios de diálogos y toma de decisiones -Impulsar espacios educativos	-Estructura de financiamiento. -Propuestas de financiamiento.	-Reconocimiento y gestión de impactos. -Remediación ambiental	-Coordinar fortalecimiento de cualificaciones profesionales. -Articulación de gobiernos locales, regionales y nacionales.

Figura 4. Propuesta de acciones graduales, con participación comunitaria, conducentes al logro del objetivo general.

En general, la comunidad espera más del instrumento plan de ordenamiento territorial del municipio, ya que, a la fecha, no proporciona lineamientos claros para la planeación, el manejo y control de la actividad minera. La comunidad concluye que la falta de articulación con los instrumentos de planeación y las políticas sectoriales, de ámbito regional y nacional, ocasiona, por un lado, trabas para el desarrollo de un sector que puede ser importante en el crecimiento del municipio y, por otro, el desarrollo de una

actividad aún con dificultades técnicas y ambientales, que genera desconfianza y pone en riesgo al municipio, por el deterioro ambiental del entorno.

Como parte de la discusión de este artículo, se consideran, además, algunas posiciones para apoyar el futuro de la actividad minera que, desde ópticas diferentes, conducen a caminos similares. Para la CEPAL (2019), la minería sigue siendo una importante actividad

en crecimiento y sugieren un manejo inteligente y sostenible, que respete las regulaciones climáticas en cada país. De manera similar, para la APTA (2021), el futuro de la minería es que sea inteligente y sustentable, en consonancia con el concepto de Green Climate Smart Mining - minería verde climáticamente inteligente-. Ambas posiciones corresponden a lo que Dufey (2020) identifica como la necesidad de visibilizar los aspectos sociales y ambientales, en cada uno de los eslabones de la cadena productiva de la actividad minera.

Colombia, en particular, ya hace parte del grupo de países de la Alliance for Responsible Mining -ARM- y cuenta con su observatorio colombiano de minería -OCMI-, lo cual, hace que se vaya trazando una tendencia cada vez más acertada sobre el manejo y el enfoque de la actividad. Además, con el propósito de generar estrategias para promover una minería con sentido social, recientemente la ANM (2021), exige a los titulares mineros un instrumento denominado plan de gestión social, con el que se pretende prevenir y mitigar los riesgos sociales y potenciar los beneficios y las oportunidades que genera la actividad minera.

Como conclusión principal, el enfoque territorial de la minería consiste en ampliar el foco del análisis de la actividad minera, haciendo un ejercicio de interrelaciones, al ubicarla en un plano multiescalar y al proyectar su devenir en el tiempo, en conjunto con los actores asociados, de manera tal, que se puedan plantear acciones graduales, capaces de aportar al desarrollo sostenible. Esta forma de ver o enfocar la actividad minera, aporta posibilidades para plantear mejoras más integrales, ya que los recursos mineros, el entorno ambiental y la población están ahí, pero si se enfocan con amplitud y en conjunto, se corren menos riesgos de equivocarse, al trazar directrices más armónicas y nítidas, donde los intereses y satisfactores de todos, pueden tener cabida.

Al interpretar los resultados obtenidos con la aplicación al caso real, se resolvieron varias inquietudes:

¿Cuál es el efecto del enfoque territorial? Se resalta la actividad minera en la escala regional, ya que la perspectiva multiescalar permite observar mejor las relaciones exógenas de la actividad, lo cual, redundando en la posibilidad de trazar líneas de acción por factores comunes compartidos, con los vecinos de la localidad. Activa la mente de los actores en el movimiento del tiempo hacia el pasado y hacia el futuro, puesto que la perspectiva multitemporal ayuda a establecer las dinámicas graduales y los cambios de la actividad, lo cual, aumenta las posibilidades de acierto en las propuestas frente a tendencias.

Desde el símil de la fotografía, cabe esta otra inquietud aplicada al enfoque de la minería: ¿qué diferencia hay entre el enfoque manual y el digital? Dado que los supuestos generan conflictos para la toma de decisiones y para las ejecuciones de las acciones, la precisión de la imagen, mediada por las nuevas tecnologías de posicionamiento, minimiza el error. Además, las posibilidades de transmitir la información sobre la actividad minera, a través de diferentes canales, ayuda a enriquecer los argumentos y a una sana discusión en el diálogo de saberes, que incluye, el conocimiento explícito y el tácito, conducente a acuerdos más objetivos.

En términos de utilidad del enfoque territorial, ¿para qué les sirve a las empresas mineras, a las instituciones mineras, a los actores sociales relacionados con la minería o a los investigadores sobre temas mineros? Para mantener presente el desarrollo sostenible, para tejer redes endógenas y exógenas, que permitan minimizar impactos y mejorar la actividad, para comprender su devenir y sus cambios, para guardar las proporciones necesarias en el tratamiento de conflictos y para trazar un futuro común, donde todos podamos ganar.

A modo propositivo y para finalizar, así como la evolución del ordenamiento territorial es la gestión territorial (Posada-Arrubla, 2020), la evolución de los planes mineros debe ser la gestión minera con enfoque territorial, en donde los planes de desarrollo territorial tengan presente a los planes mineros y, a su vez, los planes mineros incluyan los tópicos más relevantes e integradores de los planes de desarrollo territorial. En esta evolución, los gobiernos pueden liderar políticas sostenibles, que abarquen la participación ciudadana en la reducción o mitigación de impactos generados por la actividad minera; además, promover beneficios sociales y económicos, fortaleciendo encadenamientos productivos, inversiones externas y generación de empleo.

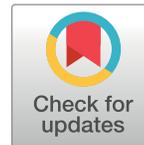
Conflicto de Intereses: El artículo fue preparado y revisado por los autores, quienes declaran haber originado el artículo y no presentan conflicto de intereses.

## REFERENCIAS

1. AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA, ANM. 2021. Resolución 263. Por la cual se adoptan los términos de referencia aplicables para la elaboración de los programas y proyectos de gestión social en la ejecución de los proyectos mineros. Colombia. 7p. Disponible desde Internet en: <https://www.https://www.anm.gov.co/sites/default/files/resolucion-263-del-25-mayo-2021.pdf>
2. ÁGUILA CARBELO, M.; ESQUIVEL SOSA, L.; RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, C. 2019. Historia y desarrollo del ultrasonido en la imagenología. Acta Médica del Centro. 13(4):601-615.
3. ANDES PACIFIC TECHNOLOGY ACCESS, APTA. 2021. Minería del futuro para una operación inteligente y sustentable. CORFO. Chile. 49p.
4. CÁLIX R., J.Á. 2016. Los enfoques de desarrollo en América Latina-hacia una transformación social-ecológica. FES Transformación. Análisis. 34p.
5. CAMPUZANO CUARTAS, R. 1994. Bibliografía de la historia minera colombiana: balance y perspectivas. Historia y sociedad. 1:27-55.
6. CARVAJAL LOMBANA, D.M. 2017. Del enfoque territorial, sus características y posibles inconvenientes en su aplicación en el marco del acuerdo de paz. Universitas estudiantes. 16:57-76

7. COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, CEPAL. 2019. Minería para un futuro bajo en carbono: oportunidades y desafíos para el desarrollo sostenible. Serie Seminarios y Conferencias 90. Chile. 89p.
8. CONTRALORÍA DE CUNDINAMARCA. 2018. Diagnostico Minero en Cundinamarca. 278p.
9. CORTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. 2018. Sentencia SU-095. Exploración y explotación de recursos naturales no renovables del subsuelo deben ser adoptadas por autoridades nacionales en coordinación y concurrencia de las autoridades territoriales. Disponible desde Internet en: <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2018/SU095-18.htm> (con acceso 11/04/2021).
10. CUADRA, D.E. 2014. Los enfoques de la geografía en su evolución como ciencia. *Revista Geográfica Digital*. 11(21):1-22. <http://dx.doi.org/10.30972/geo.11212186>
11. DICCIONARIO ETIMOLÓGICO DE CHILE. 2021. Enfoque. Disponible desde Internet en: <http://etimologias.dechile.net/?enfoque> (con acceso 18/11/2021).
12. DUFEY, A. 2020. Iniciativas para transparentar los aspectos ambientales y sociales en las cadenas de abastecimiento de la minería: tendencias internacionales y desafíos para los países andinos. CEPAL (Chile). 101p.
13. FERNÁNDEZ-LABBÉ, J. 2020. El territorio como espacio contradictorio: promesas y conflictos en torno a la actividad extractiva en Ecuador, Colombia, Perú y Chile. *EURE*. 46(137):225-246. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612020000100225>
14. ITURRALDE DURÁN, C. 2019. Los paradigmas del desarrollo y su evolución: Del enfoque económico al multidisciplinario Retos: *Revista de Ciencias de la Administración y Economía*. 9(17):7-23. <https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.01>
15. MARINHO AMORÍN, H.; REIS ROCHAEL, C.E. 2019. Minerales espaciales: cosas de nadie en beneficio de todos. *Derecho PUCP*. 83:89-131. <https://doi.org/10.18800/derechopucp.201902.004>
16. MARTÍNEZ ESPINOSA, M.I. 2019. El extractivismo minero en América Latina: planteamientos, paralelismos y presunciones desde el caso de Guatemala. *Perfiles latinoamericanos*. 27(53):1-26. <https://doi.org/10.18504/pl2753-001-2019>
17. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS. 2018. Resolución 1499. Por la cual se modifica la Resolución 2001 de 2016 a través de la cual se determinaron las zonas compatibles con las actividades mineras en la Sabana de Bogotá y se adoptan otras determinaciones. Disponible desde Internet en: <https://acmineria.com.co/normativa/resolucion-1499-de-2018-zonas-compatibles-sabana-de-bogota/> (con acceso 25/10/2021).
18. MORALES BARRAGÁN, F.; JIMÉNEZ LÓPEZ, F. 2018. Fundamentos del enfoque territorial: actores, dimensiones, escalas espaciales y sus niveles. Universidad nacional autónoma de México. 93p.
19. POSADA-ARRUBLA, A. 2020. La gestión territorial requiere coherencia. Una comprobación en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 23(2):e1599 <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1599>
20. POVEDA BONILLA, R. 2021. Estudio comparativo de la gobernanza de los conflictos asociados a la minería del cobre en Chile, el Ecuador y el Perú. CEPAL (Santiago). 71p.
21. PULIDO GONZÁLEZ, O. 2019. Arenas y gravas. En: Prieto Rincón, G.; Guatame Aponte, C.L.; Cárdenas, S.C. (eds.). *Recursos minerales de Colombia*. Vol. 1. Servicio Geológico Colombiano (Bogotá). p.11-44.
22. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, RAE. 2021. Enfoque. Disponible desde Internet en: <https://dle.rae.es/enfoque> (con acceso 18/11/2021).
23. RIGAT, L. 2019. De lo fotográfico a la fotografía digital contemporánea: la imagen en el intercambio discursivo. *Revista científica de cine y fotografía-Fotocinema*. 18:193-213. <https://doi.org/10.24310/Fotocinema.2019.v0i18.5532>
24. SALAZAR S., D.; VILCHES, F. 2014. La arqueología de la minería en el centro-sur andino: Balance y perspectivas. *Estudios Atacameños*. 48:5-21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-10432014000200003>
25. SAMPER, M. 2019. Pertinencia del enfoque territorial para abordar las interacciones entre sistemas territoriales de agricultura familiar, agrobiodiversidad y cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales*. 53(2):189-198. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.11>
26. SEAS AT RISK. 2021. Breaking free from mining: A 2050 blueprint for a world without mining – on land and in the deep sea. Brussels. 75p.
27. SECRETARÍA DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, SAB. 2020. Minería en el sur de Bogotá. 11p. Disponible desde Internet en: [https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/mineria\\_en\\_el\\_sur\\_de\\_bogota\\_01-09-2020.pdf](https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/mineria_en_el_sur_de_bogota_01-09-2020.pdf) (con acceso 25/10/2021).

28. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME; UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COLOMBIA, UNAL. 2014. Simulación y evaluación del impacto de estrategias en el desarrollo del sector minero 2014 – 2032. Disponible desde Internet en: [http://www.upme.gov.co/SeccionMineria\\_sp/SIMULACION\\_Y\\_EVALUACION\\_DEL\\_IMPACTO\\_DE\\_LAS ESTRATEGIAS\\_DEL\\_SECTOR\\_MINERO\\_2014\\_2032.pdf](http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/SIMULACION_Y_EVALUACION_DEL_IMPACTO_DE_LAS ESTRATEGIAS_DEL_SECTOR_MINERO_2014_2032.pdf) (con acceso 23/09/2021).
29. VIANA RÍOS, R. 2018. Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 21(2):617-631. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>
30. WORLD BANK GROUP, WBG. 2020. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. Washington, DC. 112p.



# Los floricultivos de la Sabana de Bogotá y su relación con la avifauna: una mirada desde los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá

## The floricultural crops of the Bogota Savanna and their relationship with birdlife: a look from the municipalities of Madrid, El Rosal and Facatativa

Sergio Adolfo Sánchez-Ordoñez<sup>1\*</sup> ; Oscar Luis Pyszczek<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Facultad de Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: sersanchez@udca.edu.co; opyszczek@udca.edu.co

\*autor de correspondencia: sersanchez@udca.edu.co

**Cómo citar:** Sánchez-Ordoñez, S.A.; Pyszczek, O.L. 2022. Los floricultivos de la Sabana de Bogotá y su relación con la avifauna: una mirada desde los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1824. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1824>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** enero 1 de 2021

**Aceptado:** agosto 29 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

La supervivencia de un alto número de especies de aves que se encuentran en la Sabana de Bogotá, algunas de ellas endémicas, dependen, en gran medida, de las estrategias incorporadas en las actividades económicas desarrolladas, por ejemplo, las del sector floricultor -cultivos intensivos de flores-, que provee parte del alimento de la avifauna. En las últimas décadas, se evidencia un sostenido incremento en la región de las fincas de floricultivos, generando, en algunos casos, conflictos por traslapes territoriales con la avifauna. En tal sentido, el presente artículo procura analizar la expansión del sector floricultor, en tres municipios de la Sabana de Bogotá: Madrid, El Rosal y Facatativá, relacionándolos con las percepciones sociales de los trabajadores de emprendimientos de floricultivos y su rol en la protección ecológica de las diversas especies de aves, tanto endémicas como migratorias, que llegan a esta parte del territorio colombiano. La metodología implementada correspondió a un diseño mixto, sustentado en la aplicación de tres fases principales: la detección del incremento de los cultivos de flores en los municipios en estudio, mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales; la implementación de encuestas sociales a los trabajadores de los emprendimientos relacionadas con la avifauna presente en las fincas y el análisis socioambiental de la

situación en el área de estudio. El fin del trabajo es el de evidenciar la responsabilidad de los emprendimientos floricultores en la protección de la avifauna de la Sabana de Bogotá.

Palabras clave: Avifauna; Floricultivo; Impacto ambiental; Representaciones Sociales; Sostenibilidad.

### ABSTRACT

The survival of a high number of bird species found in the Bogota Savanna, some of them endemic, depend to a great extent on the strategies incorporated in the economic activities developed, such as, those of the floriculture sector -intensive crops of flowers-, which provides part of the food of the birdlife. In recent decades, there has been a sustained increase in the region of floriculture farms, generating, in some cases, conflicts due to territorial overlaps with birdlife. In this sense, this article attempts to analyze the expansion of the floriculture sector in three municipalities of the Bogota Savanna: Madrid, El Rosal and Facatativá, relating them to the social representations of the workers of floricultural enterprises and their role in the ecological protection of the various species of birds, both endemic and migratory, that arrive in this part of the Colombian territory. The implemented methodology has had a mixed design

based on the application of three main phases: the detection of the increase in flower crops in the municipalities under study through the multitemporal analysis of satellite images, the implementation of social surveys to the workers of the enterprises related to the avifauna present on the farms and the socio-environmental analysis of the situation in the municipalities of Madrid, El Rosal and Facatativá in relation to the topic discussed. The purpose of the work is to demonstrate the responsibility of flower companies in the protection of the birdlife of the Bogota Savanna.

Keyword: Birdlife; Environmental impact; Floriculture; Social Representations; Sustainability.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, Colombia ocupa el primer puesto en la producción y exportación de claveles y el segundo en exportación de flores, a nivel mundial, siendo el principal proveedor de Estados Unidos, con más del 70 % del mercado (Amaya-Espinel *et al.* 2018). De las aproximadamente 7.500 hectáreas dedicadas al cultivo de flores en Colombia, más del 70 % se encuentran en la Sabana de Bogotá (Sepúlveda Calderón, 2014). Esto, evidencia condiciones geográficas favorables, propiciando la presencia de más de 230 empresas en el norte y occidente de la Sabana (Camacho-Reyes & Reina-Salgado, 2006). Simultáneamente, se registró un alto índice de especies de aves endémicas, residentes y migratorias en este sector (Osorio-Olarte, 2012).

La Sabana de Bogotá es hogar transitorio o fijo de más de 663 especies de aves, de las cuales, 26 están dentro de la categoría de especies prioritarias para su conservación, según el Instituto de investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y Bird Life International, como consecuencia del riesgo inminente de extinción devenido de la desaparición de los hábitats (Franco *et al.* 2009), como lo son la Tingua moteada *Gallinula melanops bogotensis*, en peligro crítico CR; la Tingua bogotana *Rallus semiplumbeus* y el Pato turrio *Oxyura jamaicensis andina*, en peligro EN (Amaya-Espinel *et al.* 2018; Renjifo *et al.* 2016). La gestión de esta situación, que radica en el traslape de las áreas floricultoras con los territorios autóctono o de migración de aves, incluye, indefectiblemente, a quienes se encuentran en campo: los trabajadores de floricultivos, cuyas concepciones sobre la avifauna resultan fundamentales para diseñar vías de acción paliativas.

Se entiende como floricultivos a un tipo de agricultura intensiva, es decir, la domesticación vegetal que "(...) constituye un proceso de producción a través del cual la naturaleza es transformada para controlar la disposición de los recursos" (Díaz Guillén, 2010); una actividad humana y económica primaria, que busca obtener flores, principalmente, como materiales de ornamentación, involucrando el accionar de numerosas personas, poseyendo un fuerte anclaje territorial intensivo, mediante el asentamiento de fincas floricultoras e impactando de manera sensible en el entorno ecológico, dado que las flores y las semillas resultan alimentos para numerosas especies. La floricultura representa una actividad dinámica y moderna dentro de la agricultura colombiana, con 45 años de desarrollo

(Arteaga Sarmiento *et al.* 2019), constituyéndose en un sector clave en la Sabana de Bogotá, en materia de empleo, desarrollo rural y comercio exterior.

Al transformar el entorno, estos emprendimientos se insertan en los ecosistemas preexistentes, cabiéndoles la responsabilidad, junto con las administraciones locales y demás niveles de la protección de la avifauna endémica y migratoria del sector de la Sabana de Bogotá, a fin de conciliar el interés económico con el ambiental (Vucetich *et al.* 2018).

La investigación pretendió analizar la expansión del sector floricultor, en tres municipios de la Sabana de Bogotá: Madrid, El Rosal y Facatativá, relacionándolos con las percepciones sociales de los trabajadores de emprendimientos de floricultivos y su rol en la protección ecológica de las diversas especies de aves (Rosales Salinas *et al.* 2018; Mena-Vásconez *et al.* 2018).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El área de estudio, se ubica en la Sabana de Bogotá, con una superficie general de 300 km<sup>2</sup>, entre los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá, con una altura en promedio de 2.650 m s.n.m. (Rippstein *et al.* 2001). Su régimen pluviométrico oscila entre temporadas secas a lluviosas, sin ningún tipo de regularidad dentro de la zona. Por lo general, los meses secos tienen una ocurrencia de diciembre a marzo, mientras que las temporadas de lluvias ocurren de abril a mayo, continuando con un periodo entre junio y agosto, meses con oscilaciones térmicas, caracterizadas por fuertes vientos. La temperatura promedio de la zona es de 9 °C (Hurtado Montoya & Mesa Sánchez, 2015).

En lo que respecta a la topografía de la región, presentan zonas llanas encerradas por la cordillera de los Andes, es decir, rodeada de una gran cadena de montañas, que conceden las características climáticas y topográficas adecuadas, para que allí se pueda llevar a cabo la actividad de los floricultivos (Molina-Gómez *et al.* 2018).

En este contexto espacial, la investigación contempló tres etapas metodológicas: 1) Procesamiento de imágenes satelitales de los años 1999, 2010 y 2020, para la identificación de los cambios en la cobertura del suelo; 2) Diseño de encuestas y su aplicación en trabajadores de las fincas de floricultivos y 3) Análisis socioambiental.

**Procesamiento de imágenes satelitales.** Comprendió el análisis multitemporal de imágenes satelitales del área de los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá, suministradas por el software Google Earth. Los criterios que se han tenido en cuenta para seleccionar las imágenes fueron: cobertura total o parcial del área de estudio, inexistencia de nubosidad en la zona de interés y resolución espacial óptima, con un tamaño de pixel menor o igual a 1 m.

Con base en los criterios establecidos, se seleccionaron imágenes correspondientes a 1999, 2010 y 2020, insertándose los polígonos correspondientes a la ubicación de floricultivos. Para la obtención de coberturas del suelo, se utilizó la fuente suministrada por el

Geoportal, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (2022).

**Diseño de encuestas y su aplicación en trabajadores de las fincas de floricultivos.** El diseño de la encuesta, se llevó a cabo mediante las herramientas web Google Forms, facilitando la tabulación de la información y la construcción de gráficos. Para calcular la muestra representativa de la encuesta, se utilizó el programa web Netquest, con un universo de 80 personas, heterogeneidad del 50 %, nivel de confianza del 95 % y 5 % de margen de error.

La encuesta, con preguntas de tipo cerrada, estuvo dirigida a los trabajadores de los emprendimientos de floricultivos, contemplando, en un primer momento, la ejecución de prueba piloto, a fin de verificar la pertinencia de las preguntas formuladas y, posterior a los ajustes, se realizó la ejecución oficial de las 67 encuestas a trabajadores de fincas de floricultivos, tanto a administrativos como a operarios.

**Síntesis Socioambiental.** Del diagnóstico y análisis de las fases previas, se esbozaron lineamientos necesarios de gestión socioambiental, tendientes a asegurar la conservación de las especies de avifauna.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los procedimientos metodológicos explicados previamente permitieron la obtención de los mapas de coberturas y la evolución de floricultivos en el área de estudio (Figura 1 y 2), procediéndose a analizar la estructura del paisaje en cada temporalidad, arrojando las métricas de los polígonos de floricultivos con relación al área general, para estimar el área utilizada y la distribución de floricultivos en los años referidos.

**Dinámica de coberturas de los floricultivos año 1999.** Los polígonos de las coberturas del suelo (Figura 1) demuestran que para 1999, las fincas floricultoras estaban en una etapa incipiente, donde existía una concentración de los establecimientos de

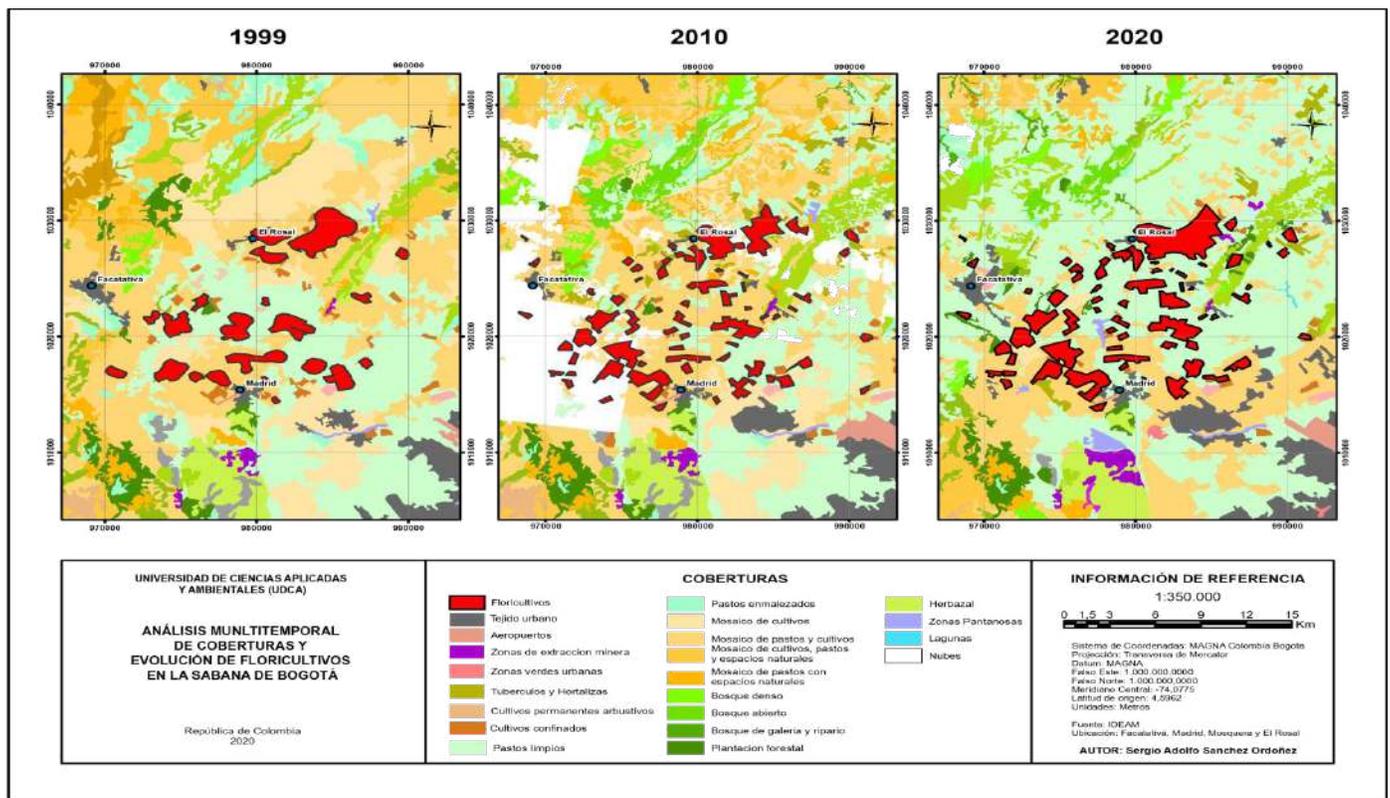


Figura 1. Análisis multitemporal de coberturas y evolución de floricultivos en la sabana de Bogotá. Elaborado a partir de la información disponible en el IDEAM (2022) y Google Earth (2022).

floricultivos en la zona. Esta temporalidad muestra una métrica de 21 polígonos delimitados, que equivalen a 41,69 km<sup>2</sup>, sobre el área general de estudio de 300 km<sup>2</sup>.

**Dinámica de coberturas floricultivos año 2010.** Los polígonos de fincas floricultoras tuvieron una tendencia a la dispersión, por el incremento de actividad en la zona. Se evidencia el aumento de las

fincas, llegando a 59 polígonos, equivalentes a 56,21 km<sup>2</sup> (Figura 2). El porcentaje de incremento en el uso del suelo destinado a esta actividad, entre 1999 y 2010, fue del 16 %, generándose el detrimento de las coberturas de pastos y bosques en la zona.

**Dinámica de coberturas floricultivos año 2020.** Las métricas para este lapso, demuestran un cambio importante en el uso del suelo,

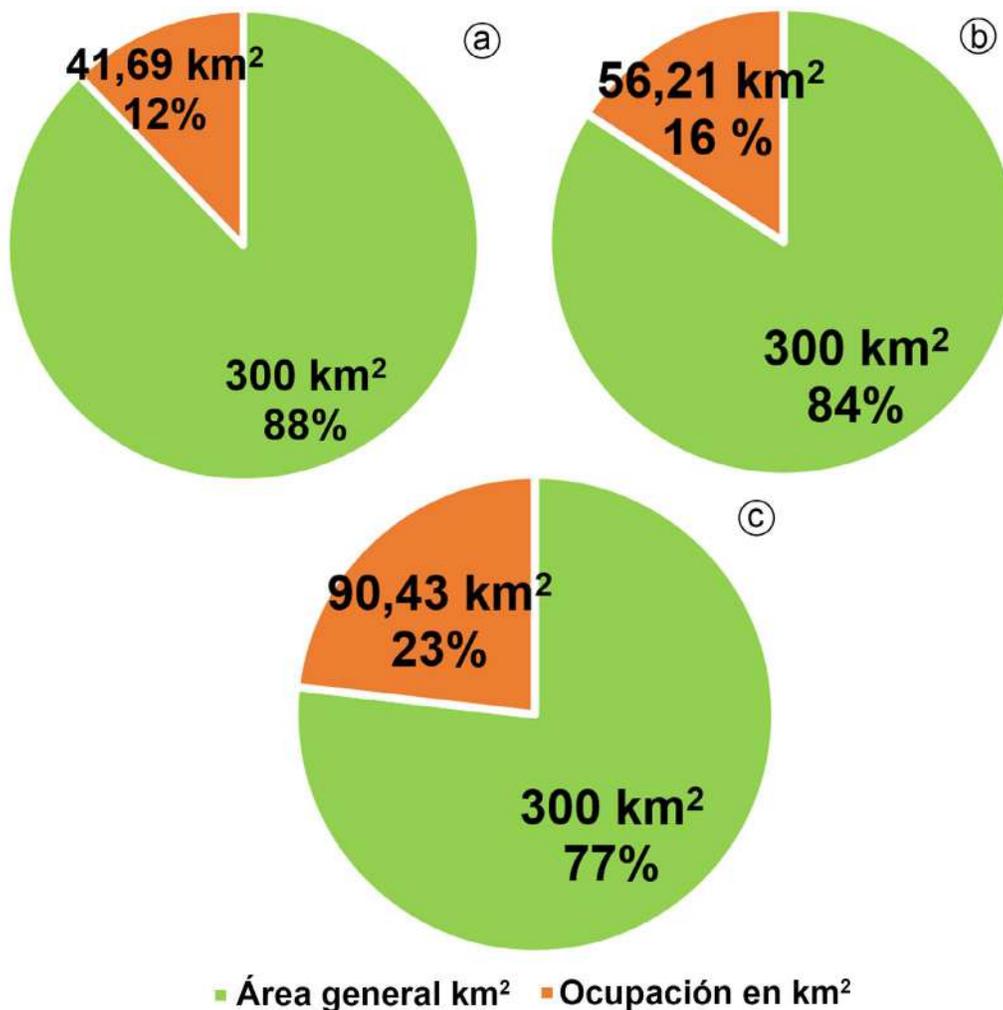


Figura 2. Ocupación en km<sup>2</sup> de polígonos floricultivos, con relación a la superficie total del área en estudio. a) 1999; b) 2010; c) 2020. Elaborado a partir de la información disponible en el IDEAM (2022) y Google Earth (2022).

dado por la intensificación de la presencia de establecimientos de floricultivos en la zona de estudio, al alcanzar en la década del 2010 al 2020, una ocupación de 90,43 km<sup>2</sup>, equivalentes a 70 polígonos (Figura 1 y 2).

En la figura 3, se observa la síntesis del incremento en los últimos 20 años de los polígonos de floricultivos. Hacia 1999, la cantidad de Km<sup>2</sup> de ocupación de los cultivos superaban ampliamente a la de polígonos de fincas, lo que sugiere un crecimiento en el área de los emprendimientos, con similar cantidad fincas productoras. La tendencia se revierte para el 2010, donde la cantidad de polígonos de floricultivos superan a la de superficie de ocupación, lo que se interpreta como una atomización de la producción. Para el 2020, se retorna a la expansión de la actividad en toda el área, con un incremento de alrededor de un 150 % de representatividad respecto al 2010.

En general, para 1999, se evidencia una agrupación de los floricultivos dentro de los puntos de polígonos señalados, mientras que, para 2010 y 2020, la dispersión de la actividad de las fincas resulta notable, motorizada por la expansión de las parcelas de

cultivos y el fomento oficial de estas actividades productivas, que adquieren un grado de especialización geoeconómica.

Las tendencias analizadas se explican, en gran medida, por las políticas ejecutadas hacia el sector floricultor en estos municipios, lo que ha derivado en una fuerte oferta de flores en calidad de exportación, representando el cambio en el uso del suelo en la zona.

La expansión de esta actividad económica supone la agudización de efectos e impactos ambientales preexistentes, tanto por la reducción y deterioro del espacio geográfico, que constituye el hábitat de diferentes especies de animales, entre ellas la avifauna y su sustento alimenticio o bien, por la contaminación de los lugares de anidación. Hasta la fecha, se reportan 235 especies de aves, de las cuales, 6 están bajo algún grado de amenaza, 46 son migratorias y 7 son endémicas -3 especies, 4 subespecies- (De la Zerda *et al.* 2018). Según Olivares (1969), en el departamento de Cundinamarca, en un futuro próximo, especies endémicas y migratorias están destinadas a desaparecer, por la acción productiva que ya para esa época -1969- era significativa.

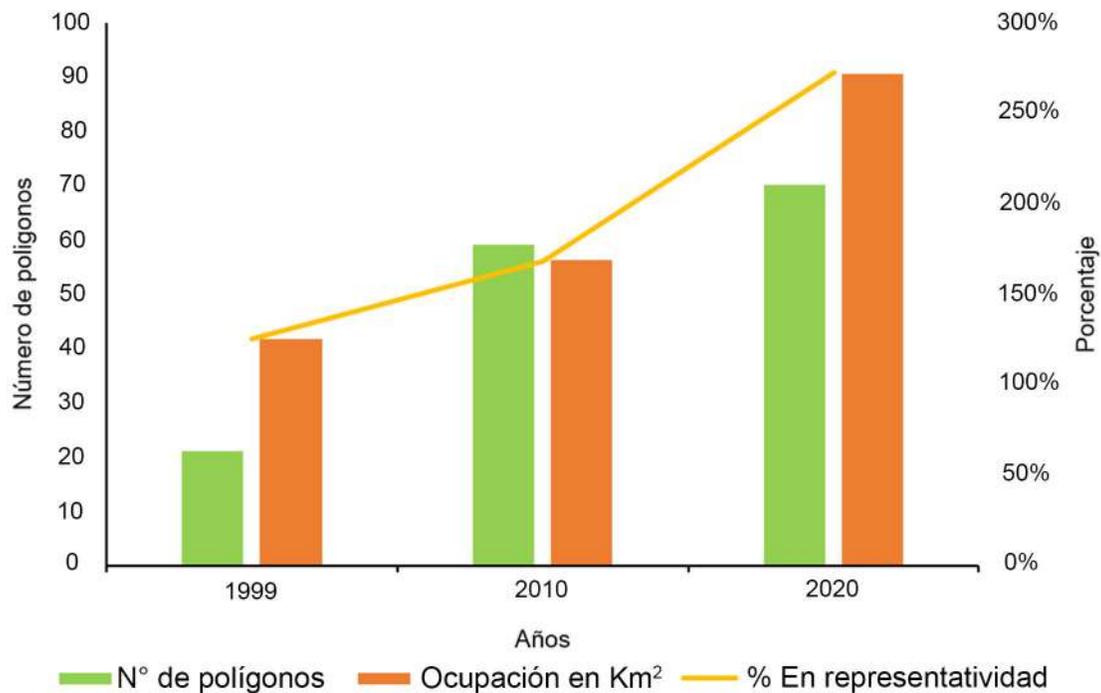


Figura 3. Análisis multitemporal de coberturas y evolución de los floricultivos en la Sabana de Bogotá. Elaborado a partir de la información disponible en el IDEAM (2022) y Google Earth (2022).

Por su parte, ASOCOLFLORES (Asociación colombiana de exportadores de flores), manifiesta literalmente en su plan de sostenibilidad que:

“La Tingua, ave acuática y endémica, impactada por la contaminación en la sábana, se ha convertido en el icono de la ruta de la sostenibilidad, en la que temas relacionados con la conservación de suelos y uso responsable de fertilizantes, manejo integrado de basuras, reducción de plaguicidas, conservación de la biodiversidad, huella de carbono, medición del uso de los recursos y los impactos asociados, entre otros, garantizan un mejor desempeño socioambiental de los cultivos” (Asocolflores, 2021).

Simultáneo a los impactos ambientales, la relevancia socioeconómica de la floricultura se ha incrementado en el área de estudio, conformando uno de los principales rubros de empleos y principal ingreso de un tercio de los hogares de la zona (Arteaga Sarmiento *et al.* 2019). Entonces, ante la relevancia geoeconómica de los floricultivos y el traslape con los territorios de la avifauna, la responsabilidad empresarial ¿contempla estrategias de sensibilización y gestión socioambiental paliativa de la situación?

#### **Análisis de encuestas a trabajadores de floricultivos de los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá, Cundinamarca.**

Los tres municipios seleccionados para el estudio tienen en común el gran desarrollo y especialización de su producción de flores. Las encuestas diseñadas e implementadas fueron dirigidas al personal que trabaja en las fincas, dado que, el conocimiento y la ejecución de sus labores en campo, los convierten en eslabones fundamentales para la gestión tendiente a la preservación de las especies de avifauna.

Por ende, sus características sociodemográficas y percepciones, concepciones y representaciones adquieren relevancia, reflejándose en los datos de la figura 4.

La mayor cantidad de encuestados predomina en el municipio de Madrid, con un 51,7 %, reflejando el mayor porcentaje de empleados en este sector económico. Esto se explica, por el hecho de que este municipio fue el punto de partida de las políticas económicas de las administraciones de la década de los años 70, impulsadas, en un primer momento, con el “Plan Vallejo” de expansión de cultivo de flores, afianzadas con la creación del “Fondo de Promoción para las Exportaciones (Pro-Expo)”, llevada a cabo bajo el gobierno de “Transformación Nacional” (1966-1970), impulsada por el entonces presidente Carlos Lleras Restrepo (González-Cubillos, 2009).

En tal sentido, el proceso de expansión de la floricultura, en esta área, se dio a partir de la voluntad política de satisfacer las necesidades internacionales, sobre todo la norteamericana, en la demanda de flores, aspecto que se mantiene en la actualidad. Cabe mencionar que la zona es una de las regiones que posee las características adecuadas para llevar a cabo actividades agrícolas tipo I y tipo II, dentro de las cuales, se encuentra el cultivo de flores. El clima, la precipitación y la fertilidad del suelo constituyen elementos claves, que propician la mayor presencia de los floricultivos, generando la mayor concentración de fincas dedicadas a esta actividad agrícola en el área y la atracción laboral de personas de los municipios aledaños, quienes buscan asentarse en las zonas urbanas (González-Cubillos, 2009).

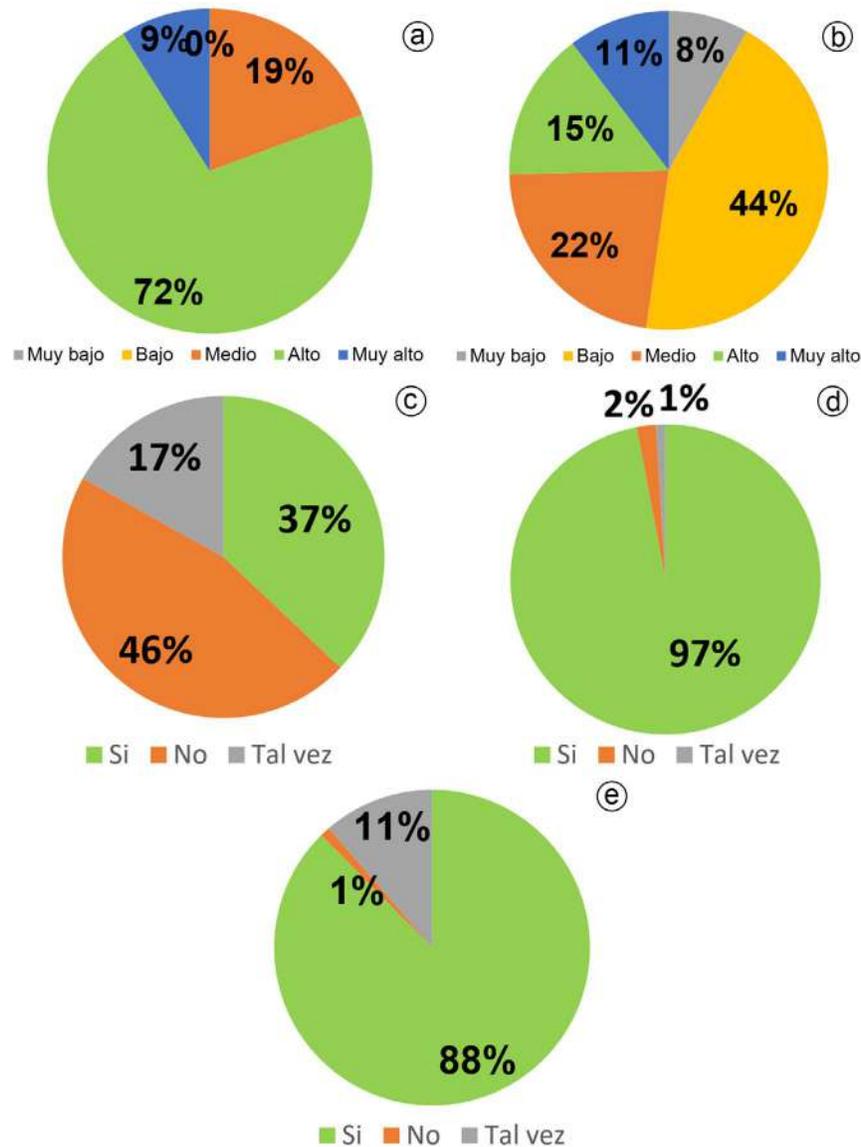


Figura 4. Resultado gráfico de encuestas dirigidas a trabajadores de los floricultivos - Sabana de Bogotá (2020). a) Interés por la avifauna, la conservación y el ambiente; b) Conocimiento sobre las especies de aves que se encuentran en las fincas floricultoras; c) Posibilidad de identificar las aves más comunes; d) Importancia de la conservación de los ecosistemas donde habitan las aves en la Sabana de Bogotá; e) Interés en adquirir conocimientos sobre temáticas de las aves y su conservación en la Sabana de Bogotá.

La mayoría de los trabajadores encuestados, se concentran en tres de las principales empresas exportadoras de flores. El incremento de superficie de floricultivos no se correlaciona con una mayor diversidad de empresas en el sector sino, por el contrario, con una mayor cantidad de predios adquiridos por las ya existentes.

Los rangos de edades de los encuestados oscilan en un poco más del 60 %, entre los 25 y 40 años, ubicados dentro de la población joven-adulta, con experiencia y habilidades adquiridas dentro del sector que, por ende, son contratados con mayor facilidad para desarrollar la producción florícola (Yong, 2004).

Simultáneamente, el 43,7 % de las personas que respondieron la encuesta, mencionan que no llevan más de 5 años trabajando en esta actividad, seguido por un 20,7 %, que lo han llevado a cabo

entre 15 y 20 años, por lo que un punto importante a considerar en la gestión sostenible es la permanencia y la estabilidad laboral en los emprendimientos de floricultivos, dado que ello representa una limitación en la continuidad en los procesos de capacitación, en sostenibilidad y conservación. La no continuidad en los puestos de trabajo es contraproducente a mediano y largo plazo para el establecimiento de políticas y planes internos de mejora en las empresas floricultoras (Valero & Camacho Reyes, 2006). Estos aspectos resultan de importancia, dado que existe una correlación entre edades de los trabajadores, permanencia laboral en las empresas y voluntad de proteger la avifauna. Por lo general, los trabajadores más jóvenes evidencian mayor dinamismo laboral y menor interés en el conocimiento y protección de las aves. La situación, se invierte al analizar las características de los trabajadores más adultos.

Los trabajadores de los floricultivos son los conocedores de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en el lugar de cultivo y, a la vez, los destinatarios de las gestiones tendientes a poner en marcha acciones que faciliten la implementación de estrategias de sostenibilidad con las especies de aves, que habitan dichas zonas. El 73,6 % de la totalidad de los encuestados conforman auxiliares de campo para la producción, teniendo un contacto directo con las especies de aves, por ende, actores claves para para la implementación de estrategias dirigidas a la conservación en estos lugares tan importantes para la biodiversidad nacional (Tamayo-Quintero & Cruz-Bernate, 2014). El 67 % de los encuestados posee un interés alto y un 8 % muy alto por la avifauna, su conservación y por el ambiente en general, viendo con favorabilidad las acciones tendientes hacia la preservación de especies de aves.

Si bien, el interés por la conservación de la avifauna es elevado, no es así respecto al conocimiento de las especies. El 42,7 y un 33,7 % de los encuestados manifestaron un bajo o medio conocimiento de las aves, respectivamente, con las que habitualmente o en algún momento de su actividad tienen encuentro. Las razones que explican estos resultados son múltiples, pero resalta el hecho de que muchos trabajadores de estas empresas no residen en el sector y, además, no poseen el hábito de observación de la avifauna local (Camelo-Mendoza *et al.* 2016).

Existe un amplio porcentaje (el 67 % del total de los encuestados), que no tienen conocimiento sobre las aves endémicas que componen la zona. Sin la identificación de las especies, no hay un conocimiento verdadero de los problemas asociados a estas poblaciones (Rosselli *et al.* 2017).

Al margen de los aspectos comentados, los trabajadores respaldan con un rotundo 97,8 %, el interés de conocer sobre aves locales, concretamente, en saber más sobre procesos de conservación del ambiente, en el que viven cada una de las aves de la zona. El 98,9 % de los encuestados no solo se interesan por los procesos de conservación, sino que lo consideran importante para mantener un equilibrio entre la producción y las especies que se encuentran allí.

Es de destacar, nuevamente, que los encuestados con mayor permanencia en el sector floricultor tienden a estar más interesados en conocer sobre las aves y la conservación de sus hábitats naturales, lo que explica que el 90 % de los mismos, estén mayormente interesados en aprender y conocer de las aves del sector. Este aspecto, se ve corroborado por lo manifestado por la Amaya-Espinell *et al.* (2018), quienes aseguran que el grupo que presenta interés dentro de los trabajadores del sector floricultor y, en general, en la población bogotana, son los adultos y adultos mayores, quienes se muestran más preocupados a la hora de establecer las medidas que se deben tomar para mejorar las condiciones de vida de las aves de la Sabana de Bogotá.

En cuanto a las estrategias de manejo sostenible por parte de los encargados operativos del sector floricultor en la Sabana de Bogotá, éstas deben equilibrar producción con manejo sostenible y ambientalmente amigables, de los predios y fincas. El sector de

la producción y explotación del campo debe ser el responsable de brindar los recursos necesarios para que se mitigue el impacto que, hasta el momento, se ha generado en el ecosistema de la Sabana de Bogotá (Rosselli *et al.* 2017).

En el contexto descrito, los encuestados evidencian la importancia de que el mismo sector floricultor sea el que busque mejorar las condiciones de las especies que allí habitan, evitando impactos negativos al ambiente a futuro (Donald *et al.* 2001).

En conclusión, en cuanto las percepciones centrales que se pueden identificar en la encuesta implementada, caben mencionar:

- La presencia de los emprendimientos de floricultivos en la zona permean la vida cotidiana de los trabajadores y sus familias, que lo perciben como actividades económicas vinculadas con la tradición de los municipios.
- Existe una relación directa entre tiempo de permanencia en los emprendimientos de floricultores de los trabajadores y la sensibilidad para atender la protección de la diversidad de avifauna.
- La movilidad y el dinamismo en cuanto a los trabajadores de los emprendimientos de floricultivos poseen una relación inversamente proporcional a las percepciones consolidadas y el interés por las prácticas sostenibles y protección de la biodiversidad.
- La percepción referida a la protección por parte de los emprendimientos de floricultivos a la avifauna local y migratoria es como mínimo relativa, donde no son perceptibles mayormente la implementación cotidiana de estas prácticas o bien resultan ambiguas.

### Síntesis socioambiental de los floricultivos y la avifauna.

Según la bibliografía especializada:

“Entre los múltiples factores citados como contribuyentes a las reducciones poblacionales, la pérdida de hábitat, tanto en las áreas de reproducción como en las de no-reproducción, es un tema recurrente y dominante. La expansión urbana acelerada y sin planeación de Bogotá y de la Sabana de Bogotá en los últimos 50 años ha dado como resultado la notable reducción y deterioro de los humedales” (Chaparro-Herrera & Ochoa, 2015).

En tal sentido, la dinámica socioambiental en el área en estudio y el incremento de las áreas sembradas con flores ha traído, como principal consecuencia, el desplazamiento obligado de varios grupos importantes de aves, entre ellas, endémicas y migratorias hacia otros sitios, donde el alimento y su hábitat escasean, lo que se refleja en el menor avistamiento de las aves y a la reducción de la biodiversidad en avifauna (Olivares, 1969).

## REFERENCIAS

La llegada de personas foráneas, la pavimentación de caminos rurales, la proliferación de los invernaderos y el mayor flujo de camiones y transportes encargados del traslado de la producción contribuyen en los efectos adversos, que impactan en la avifauna. Sumado a esto, la carencia de capacitación y de sensibilización por parte de los trabajadores de los floricultivos, coadyuvan a la implementación parcial de los protocolos de sostenibilidad ambiental dentro de las fincas que los poseen o los que toman, como base, las directivas emanadas desde ASOCOLFLORES.

En los últimos años, los procesos de producción agrícola y sus impactos reales y potenciales evidenciaron la responsabilidad ambiental que debería prevalecer hacia el interior de las empresas. La conciliación entre los intereses económicos con los ambientales, con amplia participación de los actores sociales involucrados podrían ser desencadenantes de sinergias tendientes a mitigar los impactos.

Resulta necesario que las fincas y las empresas dedicadas a la producción de flores, generen intrínsecamente procesos sostenibles y amigables con el ambiente. El aprendizaje y la apropiación del conocimiento referida a la avifauna local, tanto migrante como endémica, será el primer paso para lograrlo. La comprensión sobre las mejoras funcionales aplicables al sector y sus impactos, probablemente, ayuden a mejorar las condiciones de habitabilidad de las especies de aves que allí se encuentran y de convertirse en casos exitosos, se podrían replicar en emprendimientos de producción de flores de otras latitudes de Colombia e, incluso, para otros cultivos, protegiéndose la biodiversidad del país.

La Responsabilidad Ambiental Empresarial (RAE) entendida como:

“El conjunto de acciones voluntarias que adelanta una organización, sin importar su actividad económica, para contribuir en la reducción del impacto ambiental, incidiendo en el manejo equilibrado de los recursos naturales y (...) aportar al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes” (CAR & Anzola, 2017), adquiere mayor relevancia.

Son múltiples los obstáculos que se deben superar con celeridad para visibilizar resultados adecuados, como la transformación de los procesos de producción en las empresas, la introducción de criterios de gestión basados en la sostenibilidad y la resistencia de los funcionarios de los emprendimientos a ciertas acciones de capacitación y sensibilización, argumentando restricciones en el tiempo y dinero para ejecutarlo.

**Agradecimientos.** A los trabajadores de las fincas floricultoras de los municipios de Madrid, El Rosal y Facatativá, por su colaboración y disposición para la ejecución de la propuesta de investigación. **Conflictos de intereses:** Este artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

1. AMAYA-ESPINEL, J.D.; MORALES-ROZO, A.; MORENO-SALAZAR, N.; CAMARGO, P.; OCAMPO, D.; DAVID, S. 2018. Caracterización de aves asociadas a los cultivos de flores de la Sabana de Bogotá y el Oriente Antioqueño. Asociación Bogotana de Ornitología. <http://doi.org/10.15472/seqoeq>
2. ARTEAGA SARMIENTO, W.J.; ARÉVALO DAZA, C.E.; MOLANO PEDRAZA, J.A. 2019. Proceso logístico de las pymes floricultoras - Provincia Sabana Centro. *Revista Venezolana de Gerencia*. 24(88):1029-1048. <https://doi.org/10.37960/revista.v24i88.30162>
3. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE EXPORTADORES DE FLORES, ASOCOLFLORES. 2021. Sostenibilidad. Disponible desde Internet en: <https://asocolflores.org/es/sostenibilidad/>
4. CAMACHO-REYES, K.; REINA-SALGADO, M. 2006. La Globalización contrariada. Trabajo, territorio y dominación en la floricultura de la sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Sociología*. 27:127-149.
5. CAMELO-MENDOZA, L.M.; MARTÍNEZ-PEÑA, M.L.; OVALLE SERRANO, H.; JAIMES, V.I. 2016. Conservación ex situ de la vegetación acuática de humedales de la sabana de Bogotá. *Biota Colombiana*. 17(1):3-26. <https://doi.org/10.21068/c2016s01a01>
6. CHAPARRO-HERRERA, S.; OCHOA, D. 2015. Aves de los Humedales de Bogotá, Aportes para su Conservación. Asociación Bogotana de Ornitología -ABO (Bogotá D.C., Colombia). 92p.
7. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR.; ANZOLA, G.A. 2017. Responsabilidad Ambiental Empresarial - RAE: ¿Obligación o compromiso? Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11786/35813>
8. DE LA ZERDA, S.; ROSSELLI, L.; STILES HURD, F.G. 2018. Las aves de la Sabana de Bogotá. Cambios revelados por monitoreos a largo plazo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humbolt Colombia. Disponible desde Internet en: <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2017/cap3/304/#seccion1>
9. DÍAZ GUILLÉN, F. 2010. El proceso de domesticación de las plantas. *Casa del tiempo*. 28:66-70.
10. DONALD, P.F.; GREEN, R.E.; HEATH, M.F. 2001. Agricultural intensification and the collapse of Europe's farm-

- land bird populations. *Proceedings of the royal society B*. 268:25-29.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1325>
11. FRANCO, A.M.; AMAYA-ESPINEL, J.D.; UMAÑA, A.M.; BAPTISTE, M.P.; CORTÉS, O. 2009. Especies focales de aves de Cundinamarca: estrategias para la conservación. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (Bogotá, D.C.). 144p.
  12. GONZÁLEZ-CUBILLOS, R.E. 2009. Implicaciones de la floricultura en las transformaciones espaciales de Madrid (Cundinamarca) a partir de 1970. *Perspectiva Geográfica*. 14:219-240.
  13. GOOGLE EARTH. 2022. Globo terraqueo. Disponible desde Internet en:  
<https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>
  14. HURTADO MONTOYA, A.F.; MESA SÁNCHEZ, Ó.J. 2015. Cambio climático y variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*. 12(24):131-150.  
<http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>
  15. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. 2022. Geoportail. Disponible desde Internet en:  
<http://www.ideam.gov.co/geoportail>
  16. MENA-VÁSCONEZ, P.; VOS, J.; OMMEN, P.V.; BOELEN, R. 2018. Flores, acaparamiento del agua y responsabilidad empresarial social: certificación de la producción de rosas y reclamos por la justicia ambiental en el Ecuador. *Cuadernos de Geografía*. 101:189-214.  
<https://doi.org/10.7203/CGUV.101.13727>
  17. MOLINA-GÓMEZ, F.A.; RUGE, J.C.; CAMACHO-TAUTA, J. 2018. Variabilidad espacial un suelo arcilloso del sector Sabana Centro para la confiabilidad de asentamientos por consolidación primaria: caso de estudio Campus Nueva Granada. *Ingeniería y Ciencia*. 14(27):179-205.  
<https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.27.8>
  18. OLIVARES, A. 1969. Aves de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, D.C.). 425p.
  19. OSORIO-OLARTE, J. 2012. Aves migratorias neotropicales en parques y jardines de Bogotá: 1945 – 2005. *Revista Nodo*. 6(12):67-82.
  20. RENJIFO, L.M.; AMAYA-VILLARREAL, A.M.; BURBANO-GIRÓN, J.; VELÁSQUEZ-TIBATÁ, J. 2016. Libro rojo de aves de Colombia, Vol. II: Ecosistemas abiertos, secos, insulares, acuáticos con-continuales, marinos, tierras altas del Darién y Sierra Nevada de Santa Marta y bosques húmedos del centro, norte y oriente del país. Editorial Pontificia Universidad Javeriana; Instituto Alexander von Humboldt (Bogotá, D.C.). 564p.
  21. RIPPSTEIN, G.; ESCOBAR, G.; MOTTA, F. 2001. Agroecología y Biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (Cali). 302p.
  22. ROSALES SALINAS, I.G.; AVITIA RODRÍGUEZ, J.A.; RAMÍREZ HERNÁNDEZ, J.J. 2018. Externalidades sociales de la floricultura en el sur del estado de México: efectos de los agroquímicos en la salud. En: Pérez-Campuzano, E.; Mota-Flore, V.E. (eds) *Agenda Pública para el desarrollo regional. La metropolización y la Sostenibilidad (Volumen II): Impacto socio-ambiental, territorios sostenibles y desarrollo regional desde el turismo*. Universidad Nacional Autónoma de México; Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. (México). p.224-236.
  23. ROSSELLI, L.; DE LA ZERDA, S.; CANDIL, J. 2017. Cambios en la avifauna de un relicto de bosque en la franja periurbana de Bogotá a lo largo de catorce años. *Acta Biológica Colombiana*. 22(2):181-190.  
<https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.60688>
  24. SEPÚLVEDA CALDERÓN, M. 2014. Análisis de eficiencia técnica y estudio de casos en los cultivos de flores de la Sabana de Bogotá. *Pensamiento y Gestión*. 36:291-326.
  25. TAMAYO-QUINTERO, J.; CRUZ-BERNATE, L. 2014. Avifauna en dos parches de bosque seco del departamento del Valle Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*. 15(1):118-125.
  26. VALERO, E.A.; CAMACHO REYES, K. 2006. El lado oscuro en las prácticas de responsabilidad social corporativa del sector floricultor. *Innovar*. 16(27):73-90.
  27. VUCETICH, J.A.; BURNHAM, D.; MACDONALD, E.A.; BRUSKOTTER, J.T.; MARCHINI, S.; ZIMMERMANN, A.; MACDONALD, D.W. 2018. Just conservation: What is it and should we pursue it? *Biological Conservation*. 221:23-33.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.022>
  28. YONG, A. 2004. El cultivo del rosal y su propagación. *Cultivos Tropicales*. 25(2):53-67.

## Pares evaluadores

El Comité Editorial y el Comité Científico desean expresar sus agradecimientos a todas las personas que colaboraron en la evaluación de manuscritos, entre los meses de julio a diciembre de 2022. Nuestra gratitud a su invaluable colaboración.

En reconocimiento publicamos a continuación sus nombres:

1. Ph.D. Fredy Armando Aguilar Aguilar, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, **Colombia**
2. Ph.D. Yani Cristina Aranguren Diaz, Universidad Simón Bolívar, Cúcuta, **Colombia**
3. Ph.D. Alesandro Bail, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, **Brasil**
4. Ph.D. Jorge Ulises Blandón Díaz, Universidad Nacional Agraria, Managua, **Nicaragua**
5. Ph.D. Israel Cantú Silva, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, **México**
6. Postdoc. Gregorio Guadalupe Carbajal Arizaga, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, **México**
7. M.Sc. Liz Zaida Castañeda Córdova, Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, **Perú**
8. Ph.D. Rosalía del Carmen Castelán Vega, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, **México**
9. Postdoc. Gloria Patricia Castillo Urquiza, Universidad del Magdalena, Santa Marta, **Colombia**
10. Ph.D. Laura Alejandra De la Rosa, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, **México**
11. Ph.D. Alberto Espinosa Cuéllar, Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales, Villa Clara, **Cuba**
12. Ph.D. Luis Hernando Estupiñan Bravo, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, **Colombia**
13. Postdoc. María Alejandra Favaro, Universidad Nacional del Litoral, Esperanza, **Argentina**
14. Ph.D. Juan Manuel Fernández, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, **Argentina**
15. Ph.D. Juan Fernández Labbé, Universidad Católica Silva Henríquez de Chile, Santiago, **Chile**
16. Ph.D. Víctor Julio Flórez Roncancio, Universidad Nacional de Colombia; Bogotá, **Colombia**
17. Ph.D. Luiz Augusto Gomes de Souza, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, **Brasil**
18. Ph.D. José González Piqueras, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, **España**
19. Postdoc. Lucila González Molina, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Texcoco, **México**
20. Ph.D. Darwin Yovanny Hernández Herrera, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
21. Ph.D. Joel Lara Reyna, Colegio de Postgraduados, Montecillo, **México**
22. M.Sc. Melissa Lis Gutiérrez, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
23. Ph.D. Deyanira Lobo Luján, Universidad Central de Venezuela, Caracas, **Venezuela**
24. Ph.D. Pedro Damián Ioeza Lara, Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, Michoacán, **México**
25. Ph.D. Jesús Enrique López Avendaño, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, **México**
26. Ph.D. Rocío Crystabel López González, Solena Ag, Guanajuato, **México**
27. Ph.D. Julia Luisetti, Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, **Argentina**
28. Ph.D. Tarsicio Medina Saavedra, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, **México**
29. Ph.D. Christian José Mendoza Castiblanco, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, **Colombia**
30. Ph.D. Italo Mendoza Haro, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, **Ecuador**
31. Ph.D. Donicer Montes Vergara, Universidad De Sucre, Sucre, **Colombia**
32. Ph.D. Llerme Navarro Vasquez, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, **Perú**
33. Postdoc. Martha Olivera Angel, Independiente, Medellín, **Colombia**
34. Ph.D. Martha Lucia Ortiz Moreno, Universidad de los Llanos, Villavicencio, **Colombia**
35. Ph.D. Gustavo Gabriel Ovando, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, **Argentina**
36. Ph.D. Rogelio Enrique Palacios Torres, Universidad del Papaloapan, Oaxaca, **México**
37. Ph.D. Paola Andrea Palmeros Suárez, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, **México**
38. c.Ph.D. Manuel Fabian Pantoja Guerra, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, **Colombia**
39. Ph.D. Pere Miguel Parés Casanova, Generalitat de Catalunya, Barcelona, **España**

40. Ph.D. Janeth Pérez García, Universidad CES, Medellín, **Colombia**
41. Postdoc. Claudia Ponce de León Hill, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, **México**
42. Ph.D. Yaquelin Puchades Izaguirre, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Santiago de Cuba, **Cuba**
43. M.Sc. Juan Quintanar Olguin, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Ciudad de México, **México**
44. Ph.D. Aldemar Reyes Trujillo, Universidad del Valle, Cali, **Colombia**
45. Ph.D. Gladys Rincón Polo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, **Ecuador**
46. M.Sc. Andres Felipe Rodriguez Vasquez, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, **Colombia**
47. Ph.D. Desiderio Rodríguez Velázquez, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, **México**
48. Ph.D. Reynaldo Rodríguez Gross, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Santiago de Cuba, **Cuba**
49. Ph.D. Jesús Romero Nápoles, Colegio de Postgraduados, Montecillo, **México**
50. Ph.D. Edgar Omar Rueda Puente, Universidad de Sonora, Hermosillo, **México**
51. Esp. Arcesio Salamanca Carreño, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, **Colombia**
52. Ph.D. Carlos Adolfo Salazar Camacho, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, **Colombia**
53. Ph.D. Mario Samper Kutschbach, Independiente, **Costa Rica**
54. Postdoc. Alvaro Sampieri Croda, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla de Zaragoza, **México**
55. M.Sc. Diana Beatriz Sánchez López, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Córdoba, **Colombia**
56. Postdoc. Salvatore Siciliano, Fundação Oswaldo Cruz, Río de Janeiro, **Brasil**
57. M.Sc. Jairo Hernán Solorza Bejarano, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, **Colombia**
58. Ph.D. José Manuel Zúñiga Vásquez, Universidad Autónoma Chapingo, Durango, **México**

# ¡Conoce nuestra oferta Académica!

## Facultades

- Ciencias
- Ciencias de la Educación
- Ciencias Administrativas y Comerciales
- Ciencias de la Salud
- Ciencias Agropecuarias
- Ciencias Jurídicas
- Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad



PREGRADO



POSGRADO



@somosudca



3182001447

# www.udca.edu.co

**Calle 222**  
Calle 222 # 55 - 37  
PBX (60 1) 6684700  
Bogotá, Colombia

**Avenida Boyacá**  
Avenida Boyacá # 66 A - 61  
PBX (60 1) 6684700 Ext. 501  
Bogotá, Colombia

**Alianza CTB - U.D.C.A**  
Carrera 21 # 53D - 35  
PBX (60 1) 3483061  
Bogotá, Colombia

¡ CONOCE NUESTRA  
NUEVA SEDE !

**CARTAGENA**

Barrio Pie del Cerro  
Cra. 31 No. 18B-55  
(60 1) 668 4700 ext 402



