





REVISTA DE INVESTIGACIÓN AGRARIA Y AMBIENTAL

VOLUMEN 17 NÚMERO 1 – (ENERO - JUNIO DE 2026)

E-ISSN 2145-6453
ISSN 2145-6097



Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Volumen 17, Número 1 – (Enero - Junio de 2026) – e-ISSN 2145-6453 - ISSN 2145-6097

CUERPO DIRECTIVO

JAIME ALBERTO LEAL AFANADOR

Rector UNAD

CONSTANZA ABADÍA GARCÍA

Vicerrector Académica y de Investigación

EDGAR GUILLERMO RODRÍGUEZ

Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

LEONARDO YUNDA PERLAZA

Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

JULIA ALBA ANGEL OSORIO

Vicerrector de Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria

LEONARDO EVEMELETH SANCHEZ

TORRES

Vicerrector de Relaciones Internacionales

JORDANO SALAMANCA BASTIDAS

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

JUAN SEBASTIÁN CHIRIVÍ SALOMÓN

Líder Nacional de Investigación

CAROLINA GUTIERREZ

Líder Nacional de Investigación Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

EQUIPO EDITORIAL

GERARDO OJEDA

Director Editor

MARGARITA ROSA

BONILLA OSPINA

Co-editora

COMITÉ EDITORIAL

JORDI SARDANS

Investigador – Unidad de Ecología Global CREAF-CSIC
Universitat Autònoma de Barcelona, España.

JÖRG BACHMANN

Institut für Bodenkunde. Leibniz
Universität Hannover, Alemania.

ABÍLIO SOBRAL

Centro de Química.
Universidade de Coimbra, Portugal.

ELISABETE FIGUEIREDO

Departamento de Ciências Sociais, Políticas e do Território.
Universidade de Aveiro, Portugal.

XAVIER DOMENE

Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals - CREAF.
Universitat Autònoma de Barcelona, España.

FILIPA BESSA

Centro de Ciências do Mar e do Ambiente - MARE.
Universidade de Coimbra, Portugal.

MARCELO GANDINI

Facultad de Agronomía.
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

HENRY ZÚÑIGA BENÍTEZ

Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Antioquia, Colombia.

CARLOS ABANTO RODRÍGUEZ

Manejo integral del bosque y servicios ecosistémicos.
Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Perú.

SUSANA RODRÍGUEZ BURITICÁ

Ecología Espacial. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia.

ROLANDO TITO BACCA IBARRA

Departamento de Sanidad Vegetal.
Universidad del Tolima, Colombia.

FERNANDO FERNÁNDEZ MÉNDEZ

Facultad de Ingeniería Forestal.
Universidad del Tolima, Colombia.

JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ

Departamento de Ciencias Forestales.
Colegio de Posgraduados, México.

EDGAR JOSÉ JAIMES CÁRDENAS

Facultad de Agronomía.
Universidad de Los Andes, Venezuela.

MARTÍN ORLANDO PULIDO

MEDELLÍN

Departamento de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

Corrección de estilo

Hipertexto - Netizen

Diseño y diagramación

Hipertexto - Netizen

Información, correspondencia, suscripciones y canje Revista de investigación agraria y ambiental

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 Sur N. 14-23 Bogotá, Colombia

Teléfonos: (571) 344 3700 ext. 1529 e-mail: riaa@unad.edu.co

La revista puede consultarse en su versión electrónica en:

<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/issue/archive>

PRESENTACIÓN

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) es un proyecto editorial de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), que surge en el año 2009 con el fin de comunicar los resultados de investigaciones originales en el área agraria y ambiental realizadas por personas, grupos o instituciones tanto nacionales como internacionales. Con el fin de mantener y afianzar la confianza entre investigadores y público interesado en las temáticas de RIAA, la revista busca su inclusión en prestigiosas bases de datos y sistemas de indexación tanto nacionales como internacionales.

Misión

La misión de RIAA es fomentar la comunicación y colaboración entre investigadores nacionales e internacionales a través de la divulgación y transferencia de conocimiento relacionado con las ciencias agrarias y del medio ambiente, con el fin de fortalecer la generación de nuevo conocimiento.

Público al que se dirige

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) es una publicación oficial de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), destinada a publicar artículos resultantes de las investigaciones originales en el área agraria y ambiental y en las áreas de conocimiento afines, en temas relacionados con los avances en producción animal, agricultura y uso sostenible de los recursos naturales. Como ejemplos de áreas afines citamos, entre otras, ética, ecología, sociología, geo- grafía, historia, derecho, educación y economía, cuando se ocupan de perspectivas del desarrollo, de estilos de agricultura, de historia agraria, de desarrollo sustentable, de bioética y ética ambiental, de educación ambiental y extensión rural, de política agraria y ambiental, de legislación ambiental, forestal y agraria o de contribuciones significativas e innovadoras con visión sistémica, interdisciplinaria y/o transdisciplinaria. La publicación circula en formato impreso y en forma electrónica con acceso libre.

Periodicidad

RIAA es una publicación semestral (Enero-Junio y Julio-Diciembre).



CESIÓN DE DERECHOS

RIAA, al momento de recibir la postulación de un manuscrito por parte de su autor, ya sea a través de correo electrónico o postal, considera que puede publicarse en formatos físicos y/o electrónicos y facilitar su inclusión en bases de datos, hemerotecas y demás procesos de indexación.

Se autoriza la reproducción y citación del material de la revista, siempre y cuando se indique de manera explícita el nombre de la revista, los autores, el título del artículo, volumen, número y páginas.

Las ideas y conceptos expresados en los artículos son responsabilidad de los autores y en ningún caso reflejan las políticas institucionales de la UNAD.

INDEXACIONES

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental es indexada en las siguientes bases de datos especializadas.

 Publindex Indexación - Homologación	La Base Bibliográfica Nacional - BBN Publindex , que hace parte del Sistema Nacional de Indexación y Homologación, es dirigida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias. Está constituida por la información integrada por las revistas especializadas de CT+I sobre su producción, donde se hace visible para consulta en línea la información bibliográfica recolectada de los documentos hasta el nivel de resumen.
 www.cabi.org CAB Abstracts	CABI es una organización intergubernamental sin fines de lucro, que proporciona información y servicios de carácter científico en el mundo desarrollado y en desarrollo. CAB Abstracts: es una base de datos que ayuda a documentar la literatura publicada en el mundo, en: agricultura, medio ambiente, ciencias veterinarias, ciencias vegetales, micología y parasitología, economía aplicada, ciencias de la alimentación, salud humana, nutrición y temas relacionados.
 Veterinary Science Database	The veterinary Science Database cubre todos los aspectos de la medicina veterinaria y las enfermedades de los animales domésticos y salvajes por antropodos, helmintos, protozoos y hongos.
 Fuente Académica Plus EBSCOhost	Environment index: Base de datos de información en temáticas relacionadas con: agricultura, ciencias del mar y agua dulce, ecología de ecosistemas, geografía, energía, fuentes renovables de energía, recursos naturales, contaminación y gestión de residuos, tecnología ambiental, legislación ambiental, políticas públicas, planificación urbana e impactos sociales. Fuente Académica Plus es una base de datos que abarca las principales disciplinas académicas, ofrece revistas en español y portugués para la investigación académica. Ofrece muchas revistas de calidad de América Latina, Portugal y España, incluyendo el texto completo activo de 13 títulos A1 de Qualis.
	ACADEMIC SEARCH COMPLETE ofrece una gran colección de revistas académicas multidisciplinarias en texto completo, proporcionando a los usuarios acceso a información crítica de muchas fuentes únicas. Además, incluye texto completo revisado por pares. El contenido académico cubre una amplia gama de importantes áreas incluyendo antropología, ingeniería, derecho, ciencias y muchas más.
	REDIB (RED IBEROAMERICANA DE INNOVACIÓN Y CONOCIMIENTO CIENTÍFICO) es una plataforma para la agregación de contenidos científicos y académicos en formato electrónico en el espacio Iberoamericano. REDIB proporciona acceso y facilita la difusión y ejecución del trabajo científico. Los destinatarios de esta información son tanto la comunidad académica y sociedad en general, así como los responsables de la política científica y aquellos encargados de ponerla en práctica y analizarla.
	PERIÓDICA es una base de datos bibliográfica creada en 1978 en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La base de datos se actualiza diariamente y más de 10 mil registros son agregados cada año. Ofrece alrededor de 336 mil registros bibliográficos de artículos originales, informes técnicos, estudios de caso, estadísticas y otros documentos publicados en cerca de 1 500 revistas de América Latina y el Caribe, especializadas en ciencia y tecnología.
	Dialnet es una base de datos de acceso libre, creada por la Universidad de La Rioja (España), que difunde producción científica hispana.
	BASE es uno de los motores de búsqueda más voluminosos del mundo, especialmente para recursos web académicos. BASE proporciona más de 120 millones de documentos de más de 6,000 fuentes. Puede acceder a los textos completos de aproximadamente el 60% de los documentos indexados de forma gratuita (Acceso abierto). BASE es operado por la Biblioteca de la Universidad de Bielefeld.
	GALE Academic Onefile proporciona millones de artículos de más de 17,000 revistas académicas y otras fuentes autorizadas, incluidos videos de BBC Worldwide Learning a miles de podcasts y transcripciones de CNN. Incluye más de 11,000 revistas revisadas por pares (más de 8,000 en texto completo) y conjuntos de referencias importantes, como Gale Encyclopaedia of Science y Encyclopaedia of World Biography.
	Google Académico proporciona una forma sencilla de realizar búsquedas amplias de literatura académica. Desde un solo lugar, puede buscar en muchas disciplinas y fuentes: artículos, tesis, libros, resúmenes y opiniones judiciales, de editoriales académicas, sociedades profesionales, repositorios en línea, universidades y otros sitios web. Google Scholar lo ayuda a encontrar trabajos relevantes en el mundo de la investigación académica.

 	<p>ProQuest conserva amplia y variada información, tanto de archivos históricos, como de los avances científicos actuales y maneja tecnologías digitales que optimizan la búsqueda, intercambio y gestión de la información. THE AGRICULTURAL & ENVIRONMENTAL Science Database de ProQuest es un recurso interdisciplinario de contenido de texto completo junto con la indexación experta de la literatura mundial en estos campos y disciplinas relacionadas. Cuenta con revistas revisadas por pares, publicaciones comerciales, revistas, literatura gris, documentos de trabajo, documentos de conferencias y procedimientos. Además, la base de datos de ciencias agrícolas y ambientales incluye declaraciones y resúmenes de impacto ambiental en texto completo y AGRICOLA, la base de datos bibliográfica de literatura científica agrícola líder en el mundo. La base de datos proporciona una solución única para la investigación agrícola y disciplinas afines que incluyen: economía agrícola, ciencias animales y veterinarias, acuicultura y pesca, agricultura y sistemas agrícolas, alimentación y nutrición humana, silvicultura, y ciencias vegetales.</p>
	<p>OCLC (Online Computer Library Centre) es una cooperativa de 72,035 bibliotecas de 171 países con el doble objetivo de mejorar el acceso a la información y reducir el costo de las bibliotecas. El CRAI de la URV se unió a OCLC en mayo de 2014 cooperando con Worldcat Local. Más de 1.4 millones de artículos con acceso de un clic al texto completo (cuando los recursos están suscritos por la URV o son de acceso abierto) o las referencias bibliográficas que permiten ubicar u ordenar el artículo a través del servicio de préstamo interbibliotecario. Además, más de 40 millones de elementos digitales de fuentes confiables como Google Books y archivadores y repositorios digitales líderes como OAIster, ArchiveGrid y HathiTrust y con más de 25 millones de libros en bibliotecas de todo el mundo.</p>
	<p>Directory of Open Access Journals (DOAJ) lista revistas de acceso libre, científicas y académicas, que cumplan con estándares de alta calidad al utilizar la revisión por pares o control de calidad editorial y que sean gratuitas para todos al momento de su publicación, sobre la base de la definición de acceso libre adoptada en la Budapest Open Access Initiative (BOAI).¹² El objetivo del DOAJ es "incrementar la visibilidad y facilitar el uso de revistas científicas y académicas de acceso libre, de manera que se promueve su mayor uso e impacto. Debido a que el acceso libre es un fenómeno mundial, el DOAJ incluye publicaciones de todo el mundo en muchos idiomas. Es posible navegar por las revistas o buscar por artículos en el interior de muchas revistas, por medio de una interfaz. En mayo de 2009, la base de datos bibliográfica contenía 4.177 revistas, de las cuales 1.531 estaban catalogadas a nivel de artículo.</p>
	<p>AmeliCA es una infraestructura de comunicación para la publicación académica y la ciencia abierta, sostenida de forma cooperativa y centrada en el modelo de publicación sin fines de lucro para conservar la naturaleza académica y abierta de la comunicación científica. AmeliCA (premio Sparc a la innovación 2019) es impulsada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y liderada por el Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc) y un conjunto de instituciones académicas.</p>
	<p>Open Academic Journals Index (OAJI) es una base de datos de texto completo de revistas científicas de acceso abierto. Fundador - International Network Center for Fundamental and Applied Research, Estados Unidos. La misión es desarrollar una plataforma internacional para indexar las revistas científicas de acceso abierto. El Índice Global Actual de la Revista (CGIJ) OAJI se crea teniendo en cuenta las tendencias y los desafíos mundiales actuales en el campo de la indexación de las revistas científicas. CGIJ OAJI considera las bases de datos de citas cienciométricas (WoS, Scopus), así como la base de datos básica de acceso abierto (DOAJ).</p>
	<p>ROAD es un servicio ofrecido por el Centro Internacional ISSN con el apoyo del Sector de Comunicación e Información de la UNESCO. Lanzado en diciembre de 2013, ROAD ofrece acceso gratuito a los registros bibliográficos de ISSN que describen los recursos académicos en Acceso Abierto: revistas, series monográficas, actas de congresos, repositorios académicos y blogs académicos. Estos registros, creados por la red ISSN (89 centros nacionales en todo el mundo + el Centro Internacional), se enriquecen con información extraída de bases de datos de indexación y abstracción, directorios (DOAJ, Latindex, registro de Keepers) e indicadores de revistas (Scopus).</p>
	<p>Galardón obtenido por RIAA en el año 2018 como una de las revistas colombianas con mayor visibilidad internacional</p>

REVISORES ACADÉMICOS

Volumen 17, Número 1, año 2025..

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental – RIAA, reconoce a los revisores su tiempo y esfuerzo para evaluar los trabajos que se someten a esta revista. Gracias por su destacada colaboración y sus valiosas aportaciones.

Bertha Mazón; Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Betsabé León, Universidad Nacional de Cañete, Perú

Bryam Mateus, Universidad de Los Andes, Colombia

Carlos Miguel Morelly, Drummond LTD, Colombia

Carmen Callejas Hervás, Universidad Complutense de Madrid, España

Claudia Falcon, Intituto Tecnológico de Sonora, México

Corina Graciano, Universidad Nacional de la Plata, Argentina

David Romero, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Eduardo Duque, Centro Nacional de Investigadores de Café, Colombia

Elizabeth Hernández Domínguez, Tecnológico Nacional de México, Campus Acatayucan, México

Enrique Maldonado, Universidad de Talca, Chile

Fanny Adabel González, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

Fernando Casanoves, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

Francisco Muñoz, Universidad Surcolombiana, Colombia

Glafigo Torres, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México

Humberto Vinicio Carrión, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

Jeison Rosero, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Colombia

Jesús Hernán Camacho, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jhony Benavides, Universidad del Valle, Colombia

Jimena Ampuero, Universidad Viña del Mar, Chile

Jorge Enrique Trilleras Vásquez, Universidad del Atlántico, Colombia

Jorge Ivelic, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile

Juan David Parra Quintero, Fundación Universitaria Navarra, Colombia

Juan Villanueva, Universidad Nacional Hemilio Valdizán, Perú

Luis Edgar Tarazona, Universidad Internacional del Trópico Americano, Colombia

Luis Gómez, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Luis Ruiz, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Luz Elena Mateo, Instituto Politécnico Nacional, México

Manuel Avilés, Universidad de Sevilla, España

Marco Gutiérrez, Instituto Tecnológico de Sonora, México

María Narváez, Universidad de Cartagena, Colombia

María Teresa González, Universidad Complutense de Madrid, España

Mariauxi González, Universidad del Atlántico, Colombia

Mateus Castañeda Vargas, Universidad de Antioquia, Colombia

Nataly de la Pava, Universidad del Magdalena, Colombia

Oscar López, Universidad Central del Ecuador, Ecuador

Pablo Domínguez, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México

Paola Olaya, Universidad ICESI, Colombia

Ronald Santos, Universidad Autónoma de Yucatán, México

Seir Antonio Salazar, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia

Slendy Rodríguez, University of Tartu, Estonia

Steven Hidalgo, Universidad del Bío-Bío, Chile

Wendy Reyes, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

ÍNDICE

Editorial

Director Editorial – Editor in chief: Gerardo Ojeda. Coeditora - Coeditor: Margarita Bonilla

10

Área Agrícola

1. EFECTO DE LA INOCULACIÓN CON TRES MICROORGANISMOS SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ARVEJA (*Pisum sativum L.*) BAJO DÉFICIT HÍDRICO

INOCULATION EFFECT OF THREE MICROORGANISMS ON GROWTH AND YIELD OF PEA (*Pisum sativum L.*) UNDER WATER DEFICIT

11

Diana Marcela Arias-Aguirre, John Wilson Martínez-Osorio, Óscar Humberto Alvarado-Sanabria

2. EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN EN EL CONTROL DEL RAJADO DE TALLOS EN ALSTROEMERIA VARIEDAD 'Bali'

EVALUATION OF DIFFERENT FERTILIZATION STRATEGIES IN THE CONTROL OF STEM CRACKING IN ALSTROEMERIA VARIETY 'Bali'

35

Javier Giovanni Álvarez-Herrera, Marilcen Jaime-Guerrero, Laura María Patiño-Serrano

3. GERMINACIÓN CONIDIAL Y CRECIMIENTO MICELIAL IN VITRO DE *Trichoderma koningiopsis* (TH003) CON AGROQUÍMICOS DE PAPA

CONIDIAL GERMINATION AND IN VITRO MYCELIAL GROWTH OF *Trichoderma koningiopsis* (TH003) WITH POTATO AGROCHEMICALS

55

Blanca Lucía Botina-Azaín, Camilo Rubén Beltrán-Acosta, Yimmy Alexander Zapata-Narváez

4. INFLUENCIA DE LA REGIÓN Y TOSTIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DE CAFÉS COLOMBIANOS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

INFLUENCE OF THE REGION AND ROASTING IN THE IDENTIFICATION OF FUNCTIONAL GROUPS OF COLOMBIAN COFFEES BY INFRARED SPECTROSCOPY

73

Diego Enrique Ochoa Flórez, Daniel Salvador Durán Osorio, Yanine Yubisay Trujillo Navarro

5. APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CASCARILLA DE CACAO (*Theobroma cacao L.*) PARA LA ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN EN LA MICROEMPRESA DE CHOCOLATES FUENTES

COMPREHENSIVE USE OF COCOA SHELL (*Theobroma cacao L.*) FOR THE PRODUCTION OF AN INFUSION AT THE FUENTES CHOCOLATE MICROENTERPRISE

97

Frank Guillermo Intriago Flor, Luis Miguel Viteri Castro, Kerly Estefanía Alvarado Vásquez

Área Pecuaria

6. MARCADORES MOLECULARES Y DIVERSIDAD GENÉTICA EN CONEJOS: HERRAMIENTAS PARA LA MEJORA Y CONSERVACIÓN

MOLECULAR MARKERS AND GENETIC DIVERSITY IN RABBITS: TOOLS FOR IMPROVEMENT AND CONSERVATION

119

Karen Daniela Sandoval Chila, Camila Andrea Lozada González, Martha Lucía Posada Buitrago

Área Ambiental

7. ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGRO-PAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO: IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL

QUANTITATIVE ETHNOBOTANY IN AGRO-LANDSCAPES OF THE COLOMBIAN CARIBBEAN: IMPLICATIONS FOR THE CONSERVATION OF TROPICAL DRY FOREST (TDF)

151

Liliana Zuluaga Zuluaga, Adelina Rosa Caballero López, Jaime Andrés Arias Rojas, Darwin Fabián Lombo Ortiz, Milton Rivera Rojas

8. CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

CARBON CAPTURE IN SOILS UNDER THREE PLANT COVERS IN THE BOYACÁ PÁRAMOS COMPLEX

183

Jorge Augusto Vásquez González, Germán Eduardo Cely Reyes, Pablo Antonio Serrano Cely

Área Pecuaria

9. DINÁMICA TEMPORAL DE LOS HÁBITOS TRÓFICOS E INCIDENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN BAGRES (Ariidae) EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA, PACÍFICO COLOMBIANO	221
TEMPORAL DYNAMICS OF TROPHIC HABITS AND MICROPLASTIC INCIDENCE IN CATFISH (Ariidae) IN THE BAY OF BUENAVENTURA, COLOMBIAN PACIFIC	
José Vivas-Sánchez, Diego Gamboa-García, Guillermo Duque	
10. ANÁLISIS GEOESPACIAL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA	243
GEOSPATIAL ANALYSIS OF PHYSICOQUIMICAL PARAMETERS OF GROUNDWATER IN THE MINING CORRIDOR OF CESAR, COLOMBIA	
Moisés Oswaldo Bustamante Rua, Cristian Antonio Daza Álvarez, Daniela López Rugeles, Viviana Melo López, Vanessa García Leoz	
11. IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: ESTUDIO DE CASO EN LA CUENCA DEL RÍO BACHÉ, HUILA (2004-2024)	267
IMPACT OF LAND USE CHANGE ON SURFACE RUNOFF AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY: A CASE STUDY IN THE BACHÉ RIVER BASIN, HUILA (2004-2024)	
Heider Fernando Losada Losada, Juan Guillermo Popayán-Hernández	
12. EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL DEL MUNICIPIO DE AIPE DURANTE LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS: RELACIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS RESERVAS NATURALES DE LA SOCIEDAD CIVIL EN COLOMBIA	295
MULTITEMPORAL ASSESSMENT OF VEGETATION COVER IN THE MUNICIPALITY OF AIPE AND ITS RELATIONSHIP WITH CIVIL SOCIETY NATURE RESERVES: A 30-YEAR HISTORY	
Diego Alejandro Tello-Ochoa, María Daniela Pulido-Osorio, Carmen Elena Barragán-Ruiz	
13. ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS DE CHIRPS Y WORLDCLIM EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA, MÉXICO	319
SPATIO TEMPORAL ANALYSIS OF MONTHLY PRECIPITATION AND TEMPERATURE ESTIMATES FROM CHIRPS AND WORLDCLIM IN THE SONORA RIVER BASIN, MEXICO	
Ildefonso Narváez-Ortiz, Rocío Alexandra Ortiz-Paz, Claudio César Hernández-Vásquez	
CÓMO CITAR - HOW TO CITE	345
INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES – GUIDE FOR AUTHORS	347



EDITORIAL

Estimados lectores

Reciban un cordial saludo. Queremos agradecer su preferencia por la Revista de Investigación Agraria y Ambiental - RIAA para la difusión de su investigación, desde las varias áreas de conocimiento que acogemos en este número: Agraria, Pecuaria y Ambiental.

De acuerdo con nuestros principios de acceso libre a la información científica, continuamos con nuestra política de acceso abierto y gratuito de todos nuestros artículos, gracias al respaldo institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Agradecemos profundamente a todos nuestros lectores el apoyo recibido durante los últimos 16 años. Hemos mantenido un crecimiento constante, con contenidos que reflejan los desarrollos tecnológicos actuales. ¡Gracias a ustedes! nuestros queridos investigadores y lectores.

En el presente volumen, los lectores podrán disfrutar de artículos pertenecientes a las tres líneas principales de investigación de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA. En el caso del área agrícola, presentamos artículos relacionados con inoculación de cultivos, estrategias de fertilización y tratamientos postcosecha de productos agrícolas. En el área pecuaria presentamos un artículo relacionado con la cunicultura. Finalmente, en el área ambiental presentamos siete artículos sobre conservación de bosque, captura de carbono, microplásticos, agua subterránea, cambio de suelo, reservas naturales y parámetros climáticos.

Esperamos que los artículos presentados aquí, representen un aporte significativo al conocimiento de las diferentes áreas del saber incluidas en la revista.

¡Saludos cordiales!

Gerardo Ojeda

Editor en jefe – Editor-in-chief

Margarita Bonilla

Co-editora – Co-editor



EFECTO DE LA INOCULACIÓN CON TRES MICROORGANISMOS SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) BAJO DÉFICIT HÍDRICO

INOCULATION EFFECT OF THREE MICROORGANISMS ON GROWTH AND YIELD OF PEA (*Pisum sativum* L.) UNDER WATER DEFICIT

Diana Marcela Arias-Aguirre ¹

John Wilson Martínez-Osorio ²

Oscar Humberto Alvarado-Sanabria ³

Citación: Arias-Aguirre, D. M., Martínez-Osorio, J. W. y Alvarado-Sanabria, O. H. (2026). Efecto de la inoculación con tres microorganismos sobre el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 11 – 34. <https://doi.org/10.22490/21456453.8974>

¹ Ingeniero Agrónomo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. diana.arias03@uptc.edu.co

² Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. john.martinez@uptc.edu.co

³ Ph. D (c). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. ohalvarados@unal.edu.co

RESUMEN

Contextualización: La arveja es una leguminosa de importancia comercial en Colombia que se destaca por su contenido nutricional. Por lo tanto, es importante buscar estrategias que permitan mejorar el rendimiento de esta especie en condiciones de estrés por déficit hídrico en el suelo.

Vacío de conocimiento: Se desconoce el efecto de múltiples microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM) en el cultivo de arveja variedad Santa Isabel sometido a diferentes condiciones de riego.

Propósito: Determinar el efecto de tres PGPM en el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L. variedad Santa Isabel) en condiciones hídricas óptimas y bajo estrés hídrico.

Metodología: Se llevó a cabo un diseño factorial en bolsas plásticas de 60 litros en

donde se evaluó la inoculación en semilla con *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* y la aplicación de riego durante el ciclo del cultivo de 50 % o 100 % de la capacidad de campo (CC).

Resultados y conclusiones: La inoculación de PGPM en las semillas no mitigó los efectos del estrés hídrico al 50 % CC en la variedad Santa Isabel. La inoculación con *Pseudomonas fluorescens* resulta prometedora en condiciones más favorables de riego (100 % CC) al incrementar el peso seco de raíz, el uso eficiente del agua de riego y el rendimiento en vaina verde y en grano seco.

Palabras clave: conductancia estomática, estimulantes de crecimiento vegetal, estrés de sequía, rizósfera.

ABSTRACT

Contextualization: The pea crop is a commercially important legume in Colombia that stands out for its nutritional content. Therefore, it is important to pursue strategies to improve the yield of this species under conditions of water deficit stress in the soil.

Knowledge gap: The effect of multiple plant growth promoting microorganisms (PGPM) on the pea crop variety Santa Isabel subjected to different irrigation conditions is unknown.

Purpose: To determine the effect of three PGPM on pea plant (*Pisum sativum* L. var. Santa Isabel) growth and yield under optimal and water stress conditions.

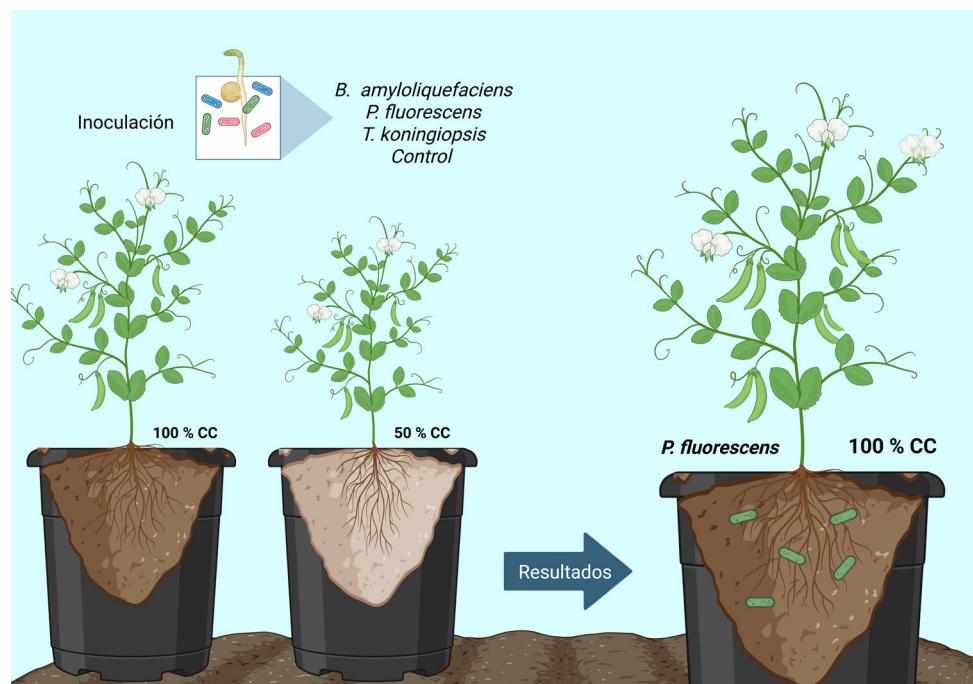
Methodology: A factorial design was carried out in 60 liter plastic bags where seed

inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* and *Trichoderma koningiopsis* and irrigation application during the crop cycle of 50 % or 100 % of field capacity (CC) were evaluated.

Results and conclusions: PGPM inoculation of seeds did not mitigate the effects of water stress at 50 %CC on the variety Santa Isabel. *Pseudomonas fluorescens* inoculation is promising under more favorable irrigation conditions (100 %CC) by increasing root dry weight, irrigation use efficiency and green pod and dry grain yield.

Keywords: stomatal conductance, plant growth stimulants, drought stress, rhizosphere.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, creado en <https://biorender.com/e07u090>

1 INTRODUCCIÓN

El agua es esencial en todas las etapas de crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que permite el transporte, absorción de nutrientes y procesos como la fotosíntesis (Sánchez-Díaz & Aguirreolea, 2013). Cuando las plantas no obtienen agua para satisfacer sus requerimientos hídricos se genera estrés por déficit hídrico, que ocurre comúnmente por fenómenos de sequías que surgen a menudo en ciertas regiones, como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2023). Este estrés es una tensión abiotíca que puede reducir significativamente el rendimiento de

los cultivos, ocasionando pérdidas económicas para los productores.

El estrés hídrico o por sequía afecta múltiples parámetros fisiológicos y morfológicos en las plantas, situación que desencadena reducciones del rendimiento. En *Pisum sativum* L. se han reportado reducciones en parámetros como el contenido de clorofila, número de hojas por planta, número de vainas, peso fresco y seco de la raíz, debido al estrés por sequía (Kausar et al., 2023), lo que indica la susceptibilidad de esta especie al estrés por déficit hídrico.

La arveja o guisante (*Pisum sativum* L.) es una leguminosa consumida a nivel mundial, tanto en fresco como en seco. Para 2023 la producción de arveja seca en el mundo fue de 13 763 334 toneladas en un área de 7 407 979 ha (FAO, 2025). Este cultivo destaca por sus efectos en la salud, gracias a su contenido de proteína y a sus propiedades benéficas para los sistemas cardiovascular y gastrointestinal (Dahl et al., 2012). En Colombia, este cultivo representa una importante fuente de ingresos para agricultores en los departamentos de Nariño, Cundinamarca y Boyacá, que para el año 2022 fueron los principales productores a nivel nacional (Agronet, 2024). Estudios en Nariño reportan que por lo general los productores de arveja de las áreas evaluadas son minifundistas (Torres-Martínez et al., 2020).

En el contexto agrícola actual, este cultivo ha demostrado gran potencial en cuanto a sostenibilidad ambiental, debido a que permite la fijación de nitrógeno atmosférico gracias a la simbiosis con los rizobios; se estima que mediante este mecanismo se pueden fijar hasta 75 kg de nitrógeno $ha^{-1} año^{-1}$ (Garaté y Bonilla, 2013). Esta condición permitiría hacer un uso más eficiente de los recursos como los fertilizantes y, por lo tanto, reducir costos de producción asociados al uso de los mismos.

En ese mismo contexto de sostenibilidad ambiental, el uso de hongos y bacterias como microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM, Plant Growth Promoting Microorganism) ha exhibido múltiples beneficios asociados a la germinación, el crecimiento y el rendimiento de diferentes

especies cultivables, incluso en condiciones estresantes como la salinidad y el déficit hídrico (Bakhshandeh et al., 2020). Diversos autores han reportado que dichos beneficios tienen varios mecanismos, como la síntesis y regulación de hormonas (Akbari et al., 2024), la expresión de genes, la actividad enzimática y el aumento en el contenido de nitrógeno y fósforo (El-Esawi et al., 2018), entre otros. La implementación de PGPM en la agricultura moderna se convierte en una estrategia prometedora al incrementar el rendimiento con menores recursos económicos.

Arshad et al. (2008) han reportado que la inoculación de *Pseudomonas fluorescens* a la semilla de arveja aumenta el número de vainas y el rendimiento de las plantas respecto a plantas no inoculadas con o sin estrés por déficit hídrico en diferentes etapas fenológicas. Mientras que la inoculación de *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 ha exhibido un aumento en la biomasa de plantas de alfalfa al incrementar parámetros como peso seco y fresco de brotes y raíces, así como el contenido de clorofila a con o sin estrés por sequía (Han et al., 2022). Por otro lado, You et al. (2022) reportan que *Trichoderma koningiopsis* ha exhibido un efecto positivo como control biológico y de promoción del crecimiento mediante la producción de compuestos orgánicos volátiles (COVs) que pueden aumentar de forma significativa variables como longitud radicular, peso fresco e incluso el contenido de clorofila en plantas de *Arabidopsis thaliana*, respecto a plantas sin el contacto con estos COVs.

Aunque el uso de PGPM beneficia el crecimiento y rendimiento de la arveja, existen

escasas investigaciones que evalúen la interacción del déficit hídrico y la inoculación con microorganismos en arveja variedad Santa Isabel, pese a ser una de las variedades más cultivadas en el territorio nacional. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación

es determinar el efecto de los microorganismos *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* sobre el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) en condiciones hídricas óptimas y bajo estrés hídrico.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. koningiopsis* en arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Santa Isabel bajo déficit hídrico se evaluó en un ensayo bajo cubierta plástica en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), ubicada en Tunja, Boyacá, Colombia, con coordenadas geográficas 5° 33' 14.36" N y 73° 21' 29.71" O, a una altitud de 2711 m. La temperatura promedio durante el ciclo de cultivo fue de 18,06 °C.

Desinfección de semillas

Las semillas de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Santa Isabel se lavaron con agua destilada estéril y se llevó a cabo el proceso de desinfección descrito por Moreno-Conn et al. (2014) para las semillas de este cultivo. Se sumergieron en etanol al 85 % durante 20 segundos y luego en hipoclorito de sodio al 2 % durante 2 minutos; seguidamente fueron enjuagadas 5 veces con agua destilada estéril para evitar que quedaran residuos de dichas soluciones y se viera afectada la inoculación de los PGPM.

Inoculación de microorganismos

Las semillas de arveja fueron inoculadas con productos comerciales, cuyos ingredientes activos corresponden a los microorganismos promotores de crecimiento vegetal: *Bacillus amyloliquefaciens*, cepa QST713 en una concentración de 1×10^9 UFC g⁻¹, *Pseudomonas fluorescens* con 1×10^9 UFC ml⁻¹ y *Trichoderma koningiopsis* con 1×10^6 conidios ml⁻¹. Las semillas fueron sumergidas durante 30 minutos en 50 ml de solución con los diferentes inóculos. En el tratamiento control (sin inoculación de PGPM), las semillas fueron sumergidas en agua destilada estéril durante 30 minutos.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial con 8 tratamientos y 5 repeticiones, para un total de 40 unidades experimentales (UE). Cada UE consistió en una planta sembrada en bolsa plástica de 60 litros con sustrato (se usó un suelo franco arenoso con un 25 % de cascarrilla de arroz (m/m)). El primer factor correspondió al microorganismo inoculado en la

semilla (*Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis*) o la ausencia de este (control). El segundo factor fue el régimen de riego (100 % y 50 % de humedad), donde el 100 % corresponde a la humedad necesaria para que el sustrato se encuentre a capacidad de campo (1 L por bolsa plástica) y 50 % a la mitad de dicho

volumen (0,5 L por bolsa plástica). Todas las plantas se regaron al 100 % CC desde la siembra hasta los 15 días después de la siembra (dds), momento luego del cual comenzaron los tratamientos de riego. La frecuencia de riego en el experimento fue cada 3 días. Los tratamientos se describen con detalle en la tabla 1.

Tabla 1.

Tratamientos aplicados en la investigación

Tratamientos	Factores	
	Microorganismo inoculado	Régimen de riego (% CC)
Control (100 %)	Sin inoculación	100
<i>B. amyloliquefaciens</i> (100 %)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	100
<i>P. fluorescens</i> (100 %)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	100
<i>T. koningiopsis</i> (100 %)	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	100
Control (50 %)	Sin inoculación	50
<i>B. amyloliquefaciens</i> (50 %)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	50
<i>P. fluorescens</i> (50 %)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	50
<i>T. koningiopsis</i> (50 %)	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	50

% CC: Porcentaje de humedad volumétrica a capacidad de campo del sustrato.

Fuente: autores.

Variables relacionadas con el estado hídrico de las plantas

Las mediciones de las variables mencionadas a continuación se realizaron en la hoja más joven totalmente expandida de la parte media del dosel de la planta entre las 9 y 12 horas del día. La conductancia estomática

(gs) ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) se determinó cada 15 días mediante un porómetro (DECAGON Devices Inc., Pullman, SC-1) y el potencial hídrico (Ψ_h) de la hoja al medio día, en dos ocasiones, con la cámara de presión Scholander (Model 615, PMS Instrument Company, Albany, OR, USA). Estas variables se midieron previo a la siguiente aplicación de riego.

Por otro lado, cada 15 días se determinó el contenido relativo de clorofila (SPAD) mediante un fluorómetro no modulado (MultispeQ V2.0, PhotosynQ) de acuerdo con Kuhlgert et al. (2016), hasta llegar a la madurez de cosecha del cultivo.

Variables relacionadas con el crecimiento

Cuando las plantas de arveja alcanzaron la madurez de cosecha se determinó la longitud del tallo (cm) y la longitud de la raíz (cm). Se llevó a cabo un análisis de partición en el cual se determinó el peso seco (g) de las estípulas, foliolos, tallos y raíz de las plantas. Las muestras se secaron a 75 °C durante 48 horas en estufa de secado (Dies, D480 FU, Colombia) y se pesaron en una balanza digital (Sartorius Spain S.A., Acculab, VIC 612) con 0,01 g de precisión.

El área foliar se determinó teniendo en cuenta el área de estípulas y foliolos; para las estípulas se tomaron imágenes fotográficas que se analizaron mediante las diferentes configuraciones del *software* libre ImageJ, mientras que para los foliolos se siguió la metodología descrita por Galindo (2006).

Variables relacionadas con el rendimiento

Se determinó el rendimiento en vaina verde (g planta^{-1}) y rendimiento en grano seco (g planta^{-1}), así como el componente de rendimiento número de vainas por planta. También se determinó el uso eficiente del agua de riego (IWUE), siguiendo la ecuación 1 de El-Hendawy et al. (2008):

$$IWUE = \frac{GY}{I} \quad (1)$$

donde: GY es el rendimiento en grano (g planta^{-1}) e I es la cantidad de riego aplicada (mm planta^{-1}).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó la prueba Durbin-Watson para determinar la correlación de los residuos, la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la de homogeneidad de varianza de Bartlett. Luego se realizó un análisis de varianza ANOVA y pruebas de Tukey ($p \leq 0,05$). Para las variables que no cumplieron con los supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianza se realizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis y la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$). El análisis estadístico se realizó con la herramienta R versión 4.3.1 (R Core Team, 2024).

3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado hídrico

En condiciones de estrés hídrico usualmente ocurren cierres estomáticos para evitar la pérdida de agua, sin embargo, dicha estrategia interfiere con el intercambio gaseoso y en consecuencia con el proceso de fotosíntesis (Osakabe et al., 2014). Este fue el caso del presente estudio donde el estrés hídrico disminuyó significativamente la conductancia estomática a los 43, 57 y 85 días después de siembra (Tabla 2). Sin embargo, dicho efecto no presentó interacción con la inoculación con microorganismos (Tabla 2). Los microorganismos afectaron significativamente la conductancia estomática a los 15 y 43 días después de la siembra (dds), donde las plantas del tratamiento control y las inoculadas con *B. amyloliquefaciens* presentaron similar conductancia estomática (Figura 1). La inoculación con *P. fluorescens* redujo la conductancia estomática en estos dos momentos entre el 17,54 % y el 25,03 % respecto al control. Mientras que *T. koningiopsis* la redujo entre el 14,09 % y el 22,33 %, respecto al control.

Estos resultados indican un cierre de los estomas de plantas inoculadas con *P. fluorescens* y *T. koningiopsis*. Esta condición puede estar influenciada por la síntesis de ABA por estos microorganismos, ya que esta hormona regula el cierre estomático (Devireddy et al., 2021). De forma similar, Mekureyaw et al. (2022) reportaron que plantas de tomate en condiciones de sequía e inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* G20-18 presenta-

ron conductancia estomática más baja que plantas sin inocular, lo que concuerda con los resultados obtenidos.

El contenido relativo de clorofila estuvo en un rango de $34,92 \pm 3,40$ y $50,77 \pm 3,11$ SPAD en el tiempo (15, 29, 43, 57, 71 y 85 dds) y no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos (datos no mostrados). Estos resultados contrastan con otros estudios en arveja, en los que el contenido de clorofila se incrementaba a medida que aumentaba la capacidad de retención de agua del suelo (10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %) durante 7 y 14 días (Al-Quraan et al., 2021). Por otro lado, la investigación de Juzoán et al. (2019) reporta que el contenido de clorofila en arveja aumenta en el tiempo, situación contrastante a la de este experimento con la variedad Santa Isabel.

En cuanto al potencial hídrico de hoja al mediodía (Ψ_h), la interacción entre los factores no fue significativa. Sin embargo, sí hubo diferencias significativas para el régimen de riego: plantas al 100 % CC obtuvieron mayor potencial hídrico a los 64 dds (Tabla 3). Esto puede significar que el cierre estomático no fue suficiente para evitar la pérdida de agua y posiblemente disminuyó la turgencia celular, uno de los componentes del potencial hídrico. Por otro lado, el potencial osmótico también pudo haber disminuido como una estrategia para evitar la pérdida de agua (Basu et al., 2016). Estos resultados confirman que un riego de 50 % CC afecta el estado hídrico de la planta de arveja variedad Santa Isabel. Sin embargo, no se considera severo, ya que las plantas continuaron su desarrollo hasta

la madurez de cosecha y su disminución se considera un mecanismo para evitar la pér-

dida de turgor y continuar con la absorción de agua en condiciones de estrés hídrico.

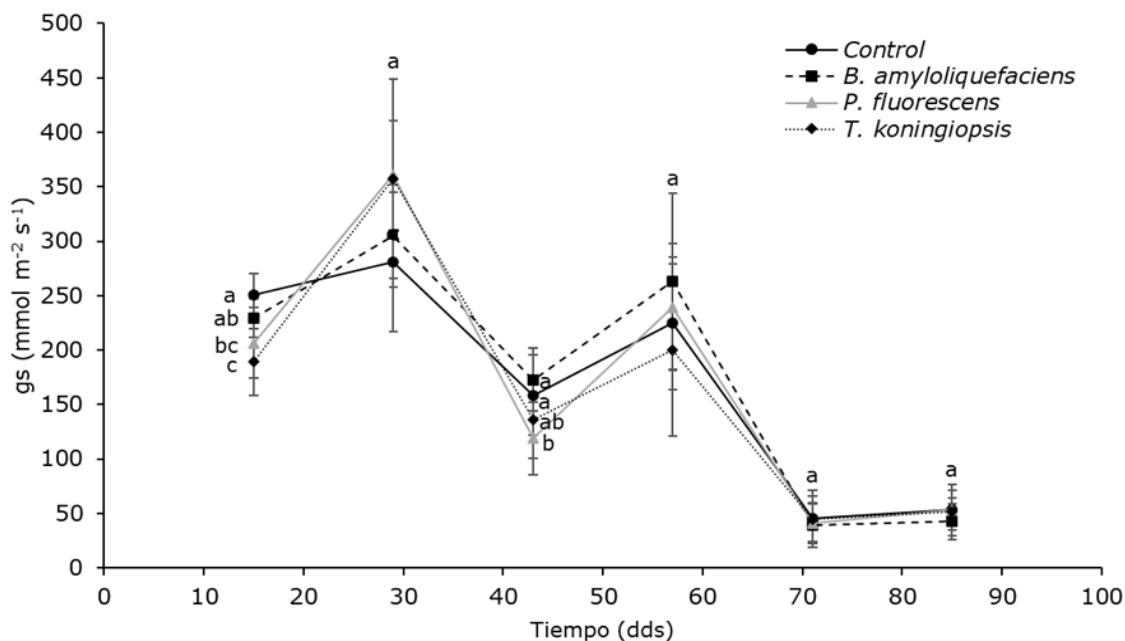


Figura 1. Conductancia estomática (gs) de plantas de arveja inoculadas con *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens*, *T. koningiopsis* y sin inoculación. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar (SD, $n=5$)

Fuente: autores.

Tabla 2.

p-valores para la variable conductancia estomática en plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tiempo (dds)	p-valores		
	Microorganismo inoculado	Régimen de riego	Interacción
15	8,013x10 ⁻⁵	0,4151	0,6586
29	0,03452	0,86504	0,96990
43	0,002832	0,006071	0,726368
57	0,09445	7,3x10 ⁻⁵	0,11949
71	0,90310	0,08409	0,97218
85	0,378908	0,003113	0,330995

Fuente: autores.

Tabla 3.

Potencial hídrico de hoja al medio día en arveja con régimen de riego óptimo y deficiente (50 % y 100 % CC)

Tiempo (dds)	Ψh (MPa)		p-valor		
	50 %	100 %	Microorganismo inoculado	Régimen de riego	Interacción
64	-1,78 ± 1,20 b	-1,60 ± 0,23 a	0,28042	0,01809	0,91014
85	-1,61 ± 0,15 a	-1,53 ± 0,15 a	0,1189	0,1021	0,1798

Las medias de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey (p ≤ 0,5).

Fuente: autores.

Crecimiento

La interacción entre los factores para el peso seco de los órganos aéreos (vástago) de las plantas (Tabla 4), la longitud del tallo y el área foliar fue significativa (Tabla 5). Sin embargo, el régimen de riego también afectó de forma significativa estas variables a pesar de las pocas diferencias en la conductancia estomática y el potencial hídrico. Plantas inoculadas con *P. fluorescens* bajo 100 % CC presentaron mayor peso seco de los órganos aéreos. Sin embargo, la inoculación con este PGPM a 50 % CC redujo significativamente el peso seco de tallos, hojas y estípulas en comparación a plantas inoculadas con *T. koningsp*sis. Este comportamiento, sumado a que la inoculación con PGPM de plantas bajo estrés hídrico no presentó diferencias estadísticas entre sí, indica que ninguno de los PGPM evaluados mitiga el impacto del estrés hídrico a 50 % CC en el crecimiento del vástagos para arveja variedad Santa Isabel.

Moreno (2009) establece que el contenido de agua afecta la expansión celular. Debido a la intensidad y prolongación del estrés, se infiere que dicho proceso se vio afectado, lo que se manifiesta en la reducción del área foliar y en el peso seco de tallos, hojas y estípulas. La reducción del área foliar también puede estar asociada a la senescencia de las hojas como resultado del estrés hídrico (Etienne et al., 2018). Estas situaciones desencadenan una disminución de la capacidad fotosintética de las plantas, lo que afecta de forma negativa la producción de biomasa y en consecuencia el rendimiento del cultivo (Figura 3). Los resultados obtenidos concuerdan con el estudio de Kausar et al. (2023), en el cual se determinó que el déficit hídrico redujo significativamente el peso seco del vástagos de arveja variedad Metior.

La sequía también puede desencadenar limitaciones o deficiencias nutricionales en las plantas al impedir el transporte y la ab-

sorción de nutrientes (Etienne et al., 2018). Al respecto, Prudent et al. (2016) determinaron que en *Pisum sativum* L. cv. Caméor, la absorción de nitrógeno, así como el crecimiento del vástago disminuye a medida que se reduce la disponibilidad de agua. Por lo que la reducida absorción de nitrógeno pue-

de estar relacionada con la baja producción de biomasa de las plantas bajo 50 % CC, ya que este nutriente es indispensable para la formación de proteínas, ácidos nucleicos, fitohormonas y metabolitos secundarios (Hawkesford et al., 2023).

Tabla 4.

Peso seco de tallos, hojas y estípulas de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tratamiento	Peso seco (g)		
	Tallos	Hojas	Estípulas
<i>Control (100 %)</i>	3,19 ± 1,79 abc	4,07 ± 0,83 b	3,58 ± 1,12 abc
<i>B. amyloliquefaciens (100 %)</i>	4,58 ± 2,30 a	4,66 ± 1,86 b	3,89 ± 1,51 a
<i>P. fluorescens (100 %)</i>	5,51 ± 1,93 a	5,75 ± 1,46 abc	4,49 ± 1,04 a
<i>T. koningiopsis (100 %)</i>	3,22 ± 0,88 ab	4,06 ± 0,99 bc	3,19 ± 0,79 ab
<i>Control (50 %)</i>	2,07 ± 0,60 c	2,02 ± 0,74 de	1,68 ± 0,57 d
<i>B. amyloliquefaciens (50 %)</i>	2,47 ± 1,00 bc	3,30 ± 1,05 cde	2,77 ± 0,76 cd
<i>P. fluorescens (50 %)</i>	1,75 ± 0,44 c	1,62 ± 0,55 e	1,71 ± 0,36 d
<i>T. koningiopsis (50 %)</i>	2,37 ± 0,39 bc	2,88 ± 0,65 d	2,05 ± 0,81 bcd
<i>p-valor interacción</i>	0,0009479	0,0001866	0,0002169
<i>p-valor microorganismo inoculado</i>	0,5038	0,8633	0,8764
<i>p-valor régimen de riego</i>	1,038x10 ⁻⁵	2,754x10 ⁻⁷	3,668x10 ⁻⁷

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon (p ≤ 0,05).

Fuente: autores.

Tabla 5.

Longitud del tallo, longitud radical y área foliar de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tratamiento	Longitud (cm)		Área foliar (cm ²)
	Tallo	Radical	
<i>Control (100 %)</i>	111,1 ± 11,04 a	23,46 ± 5,48 a	624,29 ± 60,36 ab
<i>B. amyloliquefaciens (100 %)</i>	120,0 ± 7,08 a	23,38 ± 4,69 a	752,72 ± 22,71 a
<i>P. fluorescens (100 %)</i>	120,1 ± 25,69 abc	21,92 ± 5,59 a	745,08 ± 102,40 a
<i>T. koningiopsis (100 %)</i>	111,3 ± 9,83 ab	18,46 ± 3,23 a	541,51 ± 197,41 abc
<i>Control (50 %)</i>	78,6 ± 12,15 c	19,68 ± 2,73 a	440,45 ± 107,78 d
<i>B. amyloliquefaciens (50 %)</i>	100,5 ± 22,32 bcd	22,34 ± 4,88 a	461,71 ± 142,83 bcd
<i>P. fluorescens (50 %)</i>	88,6 ± 8,06 cd	23,76 ± 2,43 a	386,78 ± 110,13 cd
<i>T. koningiopsis (50 %)</i>	89,0 ± 36,99 cd	22,72 ± 3,55 a	464,82 ± 75,61 cd
<i>p-valor interacción</i>	0,001773	0,1884	0,000408
<i>p-valor microorganismo inoculado</i>	0,7157	0,5767	0,355
<i>p-valor régimen de riego</i>	3,732x10 ⁻⁶	0,8129	3,278x10 ⁻⁶

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon (p ≤ 0,05). La variable longitud radical se analizó según la prueba de Tukey (p ≤ 0,05).

Fuente: autores.

A diferencia del peso seco de los órganos aéreos de las plantas, el comportamiento del peso seco de la raíz fue afectado solo por la inoculación con los PGPM. En la figura 2 se evidencia el aumento significativo del peso seco de la raíz de plantas inoculadas con *Pseudomonas fluorescens*, respecto a plantas sin inoculación (los *p*-valores para la interacción entre factores, el factor microor-

ganismo inoculado y el factor régimen de riego fueron 0,259380, 0,009619, 0,814722, respectivamente).

En el cultivo de arveja se ha reportado que *Pseudomonas fluorescens* SPB2137gfp sintetiza auxinas, específicamente AIA e incluso puede suprimir el efecto inhibidor del aluminio en el crecimiento radicular (Belimov et al., 2022). La producción de auxi-

nas por *Pseudomonas fluorescens* podría explicar el aumento del peso seco de la raíz. Estudios en fríjol demuestran que el AIA producido por *Pseudomonas putida* GR12-2 estimula el crecimiento radicular, aumentando el número de raíces adventicias (Patten & Glick, 2002). Por otro lado, la longitud radical no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 5), pero la longitud aérea sí. Esto se corrobora al analizar la relación peso seco del vástago (peso seco de tallos, hojas y estípulas): peso seco de la

raíz y la relación área foliar: peso seco de la raíz (Tabla 6), evidenciando que las plantas sometidas a estrés hídrico limitaron el crecimiento aéreo para que sus reservas se destinaran al crecimiento radical y así continuar la búsqueda de agua y nutrientes. Este efecto es aún más marcado con la inoculación de *Pseudomonas fluorescens*. Esta relación entre el crecimiento aéreo y el crecimiento de la raíz concuerda con Moreno (2009) como uno de los principales efectos del estrés hídrico en las plantas.

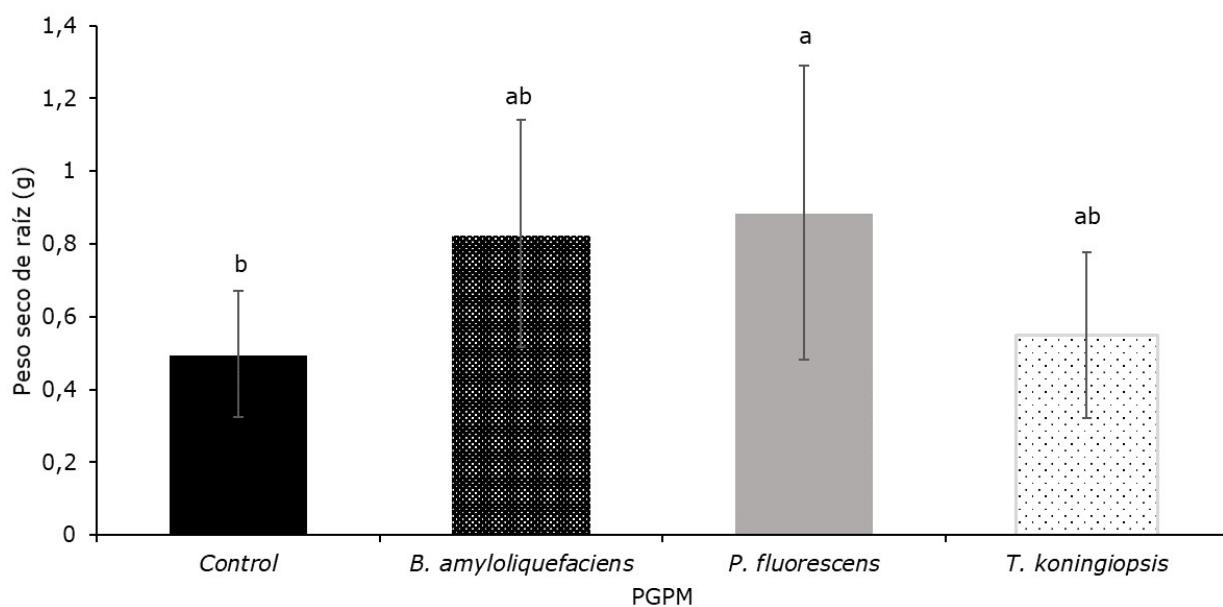


Figura 2. Peso seco de raíz de plantas de arveja inoculadas con los microorganismos *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens*, *T. koningiopsis* y en ausencia de estos. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar ($n=5$)

Fuente: autores.

Tabla 6.

Relación peso seco vástago:raíz y área foliar:peso seco de raíz

Tratamiento	Relaciones	
	Vástago: raíz (g g ⁻¹)	Área foliar: raíz (cm ² g ⁻¹)
<i>Control</i> (100 %)	20,36 ± 11,11 a	1490,63 ± 707,05 a
<i>B. amyloliquefaciens</i> (100 %)	16,15 ± 3,10 bc	885,59 ± 222,01 abc
<i>P. fluorescens</i> (100 %)	17,36 ± 14,98 abc	1069,83 ± 740,78 abc
<i>T. koningiopsis</i> (100 %)	26,23 ± 11,36 ab	1278,80 ± 755,67 ab
<i>Control</i> (50 %)	11,29 ± 4,82 cd	847,68 ± 188,15 bc
<i>B. amyloliquefaciens</i> (50 %)	11,81 ± 6,93 abcd	793,43 ± 394,97 abc
<i>P. fluorescens</i> (50 %)	6,78 ± 3,00 d	381,27 ± 381,92 c
<i>T. koningiopsis</i> (50 %)	12,02 ± 3,29 bc	827,80 ± 229,56 bc
<i>p</i> -valor interacción	0,00271	0,04709
<i>p</i> -valor microorganismo inoculado	0,2038	0,5099
<i>p</i> -valor régimen de riego	0,0001525	0,002677

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon (p ≤ 0,05).

Fuente: autores.

Rendimiento

El rendimiento en vaina verde presentó diferencias significativas con la interacción de los factores (p = 0,0001365). La inoculación con *Pseudomonas fluorescens* aumentó

el rendimiento en vaina verde de las plantas en condiciones de riego al 100 % CC (Figura 3). La inoculación con los demás PGPM no incrementó el rendimiento bajo ninguno de los regímenes de riego evaluados.

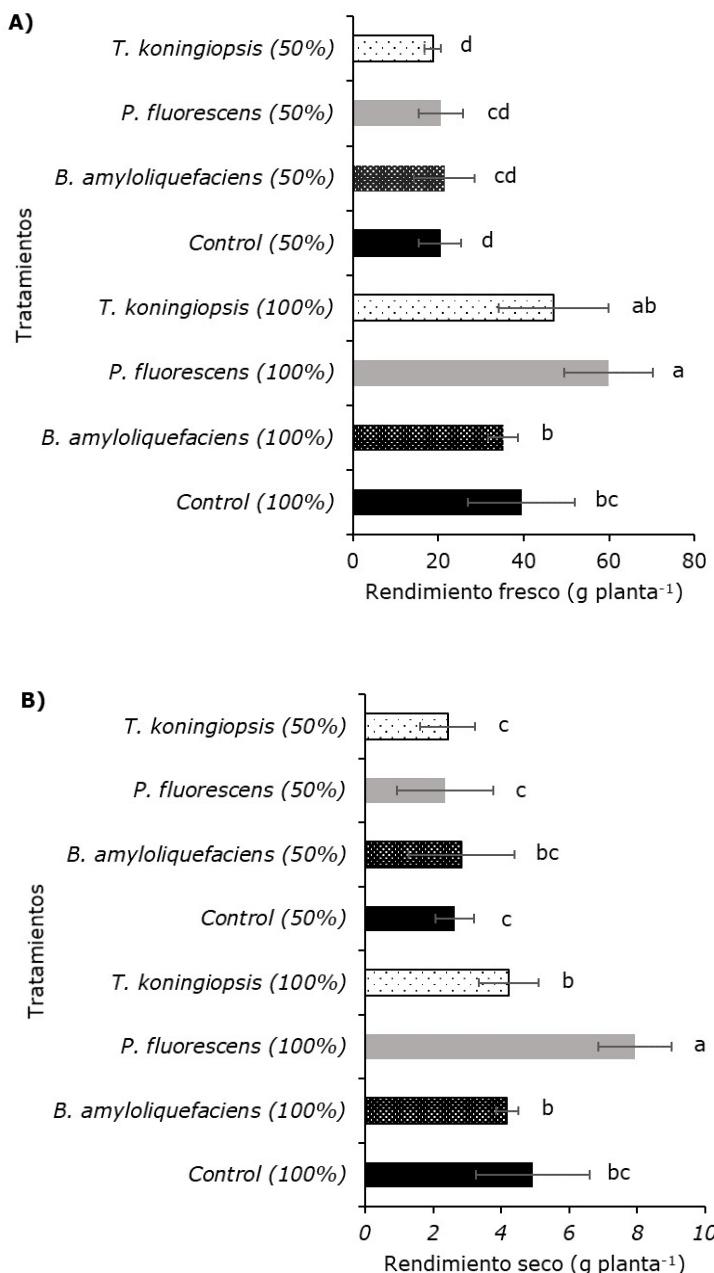


Figura 3. A) Rendimiento en fresco y B) Rendimiento en seco de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$).

Fuente: autores.

Arshad et al. (2008) determinaron que plantas de arveja inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* obtuvieron mayor ren-

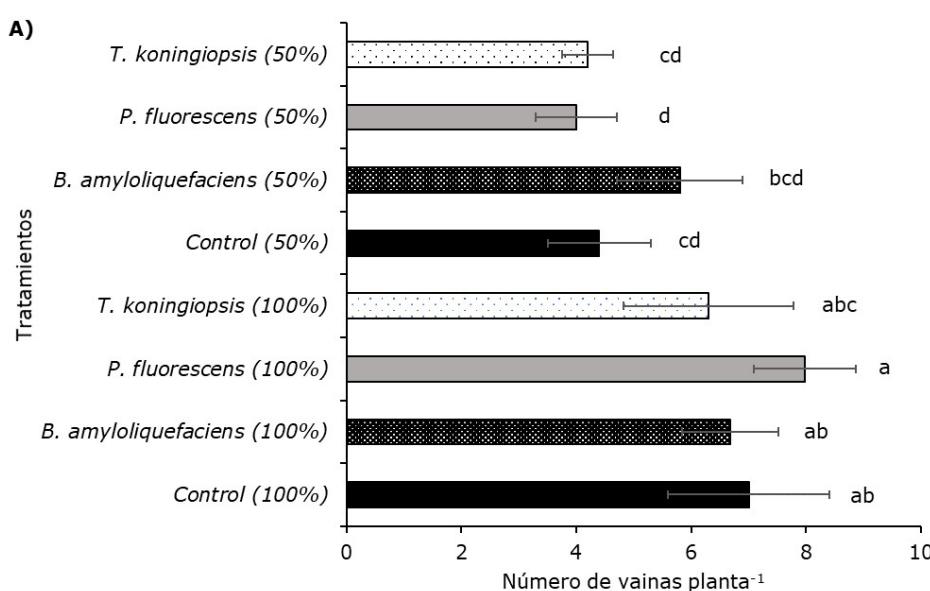
dimiento que plantas sin inocular con y sin estrés por déficit hídrico en diferentes etapas (vegetativa, floración y llenado de vai-

na), debido a que este PGPM contiene la enzima ACC-desaminasa y puede reducir los niveles de etileno de la planta y retrasar la maduración de las vainas. Esto ocurre debido a que la enzima ACC-desaminasa actúa sobre el ácido 1-amino-ciclopropano-1-carboxílico (ACC), el cual es un precursor de la biosíntesis del etileno; también se ha reportado que algunas especies y cepas de *Pseudomonas* utilizan la ACC como fuente de nitrógeno (Belimov et al., 2015). Los efectos de la ACC-desaminasa podrían ocurrir en un mejor llenado de vaina en *P. fluorescens* (100 %), sin embargo, el estrés hídrico en *P. fluorescens* (50 %) pudo ser muy prolongado e intenso, impidiendo dilucidar el efecto de la ACC-desaminasa en el llenado de las vainas.

Por otra parte, se ha reportado que la rizobacteria *Pseudomonas fluorescens* produce fitohormonas como AIA y ácido giberélico (GA) (Bhardwaj et al., 2024). La aplicación foliar de estos reguladores de crecimiento ha demostrado un aumento del rendimiento en diferentes variedades de arveja (Hussain et

al., 2020), por lo que, en este caso, el incremento del rendimiento puede estar relacionado con la síntesis de estos reguladores.

El rendimiento en fresco se relaciona directamente con el número de vainas por planta obtenido (coeficiente de correlación de Pearson de 0,78 con un p valor de $2,24 \times 10^{-9}$), ya que en la mayoría de los casos plantas con riego a 100 % CC poseen un número de vainas significativamente superior a plantas con 50 % CC ($p = 0,01757$) (Figura 4). Kausar et al. (2023) reportan el mismo comportamiento en las variedades Sarsabz y Metior bajo estrés hídrico similar al de la presente investigación (capacidad de campo del suelo al 50 %), puesto que no se presentaron diferencias significativas entre plantas regadas al 100 % con o sin PGPM. En contraste, Arshad et al. (2008) determinaron que la inoculación con *P. fluorescens* aumentaba significativamente el número de vainas, tanto en condiciones de estrés hídrico en diferentes etapas fenológicas como sin estrés hídrico.



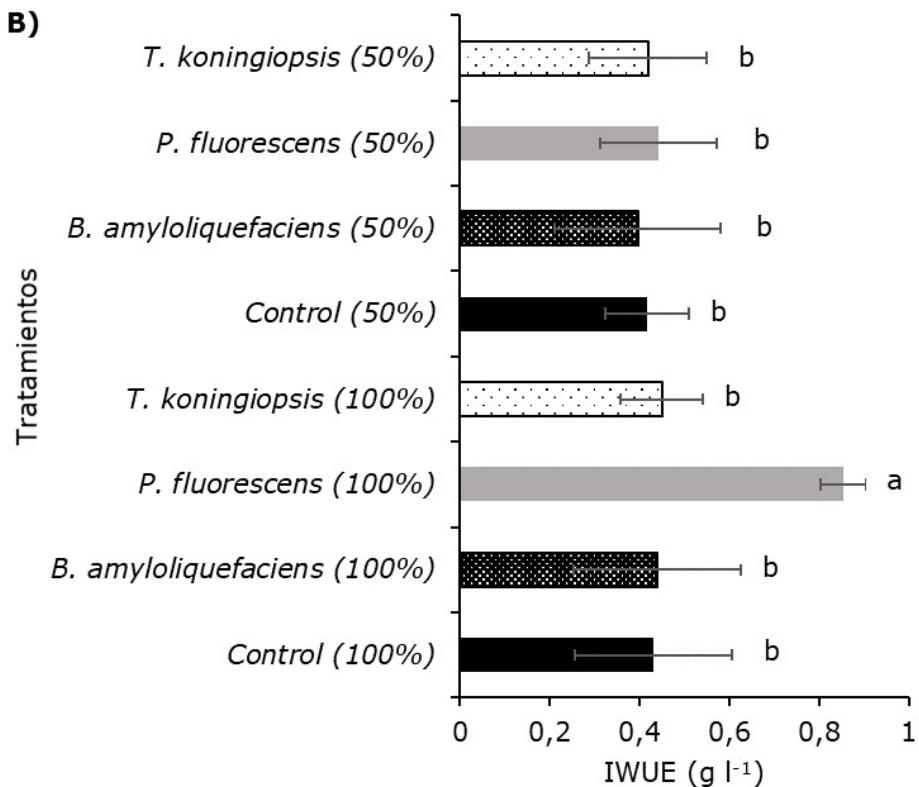


Figura 4. A) Número de vainas por planta de arveja y B) Uso eficiente del agua de riego en arveja inoculada con los PGPM y sin inoculación, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar ($n=5$)

Fuente: autores.

Respecto al rendimiento en seco, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0,001617$) donde el tratamiento *P. fluorescens* (100 %) presentó el mayor rendimiento en seco (Figura 3). Estos resultados, junto a los relacionados con el crecimiento, indican que la inoculación a la semilla con los PGPM evaluados no mitiga el estrés hídrico; sin embargo, la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* en condiciones de riego óptimo es prometedora al aumentar aproximadamente 3 g planta^{-1} respecto a plantas control. Empleando este microorga-

nismo se han reportado aumentos hasta de 6,4 g planta^{-1} en arveja sin déficit hídrico (Arshad et al., 2008).

El aumento en el rendimiento con la inoculación de este PGPM puede deberse a que algunas cepas de *P. fluorescens* tienen la capacidad de solubilizar fosfatos (Browne et al., 2009). Esta cualidad fertilizante podría ocasionar mayor rendimiento de plantas de arveja junto al adecuado suministro de riego, teniendo en cuenta que el fósforo es un macronutriente que cumple una función es-

tructural al ser parte de los ácidos nucleicos y contribuye con la fotosíntesis al ser parte de la molécula de ATP (Hawkesford et al., 2023). En maíz (*Zea mays* L. var *saccharata*), Zarei et al. (2019) reportan que la inoculación con las cepas P1, P3 y P8 de *Pseudomonas fluorescens* con habilidad de solubilizar fosfatos aumenta de forma significativa el rendimiento, tanto en mazorca como semillas en conserva, así como el uso eficiente del agua. Samavat et al. (2012) también encontraron que los aislados de *P. fluorescens* UTPF68 y UTPF109 tienen capacidad de solubilización de fosfato mineral y que la inoculación con este PGPM aumenta la absorción de fósforo y el contenido de nitrógeno en plantas de fríjol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Teniendo en cuenta el rendimiento en seco y la cantidad de agua de riego suministrada, se determinó que se presentaron diferencias significativas para el uso eficiente del agua de riego ($p = 0,0023068$). Plantas tratadas con *P. fluorescens* (100 %) fueron más eficientes en el uso del agua de riego ($0,85 \pm 0,05$), respecto a los demás tratamientos (Figura 4). Esto demuestra el potencial de este microorganismo para incrementar el rendimiento de esta especie, que a su vez se relaciona con el aumento de peso seco de la raíz de plantas inoculadas con *P. fluorescens*, ya que al aumentar la superficie aumenta la absorción y disponibilidad de recursos como agua y nutrientes.

4 CONCLUSIONES

Los PGPM *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* no mitigan el efecto del estrés hídrico a un 50 % CC; sin embargo, la inoculación de las semillas de arveja variedad Santa Isabel con *Pseudomonas fluorescens* resulta prometedora a un 100 % CC al incrementar el peso seco de raíz, el uso eficiente del agua de riego y el rendimiento.

Se sugiere realizar investigaciones con estos microorganismos en condiciones de cultivo a campo abierto y en otras variedades de arveja, para determinar si dichos microorganismos presentan el mismo comportamiento. Así mismo, evaluar su efecto en condiciones de estrés hídrico menos intenso y prolongado.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original, revisión y edición.

Autor 2: adquisición de recursos, supervisión, logística, revisión y edición.

Autor 3: conceptualización, metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación Manejo biológico de cultivos y la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), por el apoyo para el desarrollo del proyecto SGI

3652 “Efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. harzianum* en arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico en condiciones controladas en Tunja, Boyacá”.

FINANCIAMIENTO

El estudio se realizó en el marco del proyecto SGI 3652 “Efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. harzianum* en arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico en condiciones controladas en Tunja, Boyacá” financia-

do por la convocatoria 14 de 2023 - Jóvenes Investigadores 2024 - Aportando a la Agenda de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2030 de la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Agronet. (2024). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. ht-

[tps://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1](https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1)

Akbari, S. I., Prismantoro, D., Kusmoro, J., Hasan, R., Nurzaman, M., Rossiana, N. & Doni, F. (2024). Isolation, screening, and molecular characterization of indigenous *Trichoderma* isolates from West Java, Indonesia and their plant growth-promoting capability on rice plants (*Oryza sativa* L.). *Journal of King Saud University - Science*, 36(9), 103378. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2024.103378>

Al-Quraan, N. A., Al-Ajlouni, Z. I. & Qawasma, N. F. (2021). Physiological and biochemical characterization of the gaba shunt pathway in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings under drought stress. *Horticulturae*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060125>

Arshad, M., Shahroona, B. & Mahmood, T. (2008). Inoculation with *Pseudomonas* spp. Containing ACC-Deaminase Partially Eliminates the Effects of Drought Stress on Growth, Yield, and Ripening of Pea (*Pisum sativum* L.). *Pedosphere*, 18(5), 611-620. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60055-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60055-7)

Bakhshandeh, E., Gholamhosseini, M., Yaghoubian, Y. & Pirdashti, H. (2020). Plant growth promoting microorganisms can improve germination, seedling growth and potassium uptake of soybean under drought and salt stress. *Plant Growth Regulation*, 90, 123-136. <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00556-5>

Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A. & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5. Faculty of 1000

Ltd. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.7678.1>

Belimov, A. A., Dodd, I. C., Safronova, V. I., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Makarova, N. M., Davies, W. J. & Tikhonovich, I. A. (2015). Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well-watered and water-limited potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology*, 167(1), 11-25. <https://doi.org/10.1111/aab.12203>

Belimov, A. A., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Syrova, D. S., Kitaeva, A. B., Ulyanich, P. S., Yuzikhin, O. S., Sekste, E. A., Safronova, V. I., Vishnyakova, M. A., Tsyganov, V. E. & Tikhonovich, I. I. (2022). Rhizobacteria Mitigate the Negative Effect of Aluminum on Pea Growth by Immobilizing the Toxicant and Modulating Root Exudation. *Plants*, 11(18), 2416. <https://doi.org/10.3390/plants11182416>

Bhardwaj, T., Singh, R., Singh, H., Bhanwaria, R., Gandhi, S. G., Bhardwaj, R., Ahmad, A. & Ahmad, P. (2024). *Pseudomonas* consortium improves soil health and alleviates cadmium (Cd) toxicity in *Brassica juncea* L. via biochemical and *in silico* approaches. *Plant Stress*, 14, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100611>

Browne, P., Rice, O., Miller, S. H., Burke, J., Dowling, D. N., Morrissey, J. P. & O'Gara, F. (2009). Superior inorganic phosphate solubilization is linked to phylogeny within the *Pseudomonas fluorescens*

- complex. *Applied Soil Ecology*, 43(1), 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.06.010>
- Dahl, W. J., Foster, L. M. & Tyler, R. T. (2012). Review of the health benefits of peas (*Pisum sativum* L.). *British Journal of Nutrition*, 108, Issue S1. <https://doi.org/10.1017/S0007114512000852>
- Devireddy, A. R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y. & Mittler, R. (2021). Integration of reactive oxygen species and hormone signaling during abiotic stress. *Plant Journal*, 105(2), 459-476. <https://doi.org/10.1111/tpj.15010>
- El-Esawi, M. A., Alaraidh, I. A., Alsahli, A. A., Alamri, S. A., Ali, H. M. & Alayafi, A. A. (2018). *Bacillus firmus* (SW5) augments salt tolerance in soybean (*Glycine max* L.) by modulating root system architecture, antioxidant defense systems and stress-responsive genes expression. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.026>
- El-Hendawy, S. E., Adb El-Lattief, E. A., Ahmed, M. S., & Schmidhalter, U. (2008). Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*, 95(7), 836–844. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.008>
- Etienne, P., Diquelou, S., Prudent, M., Salon, C., Maillard, A. & Ourry, A. (2018). Macro and Micronutrient Storage in Plants and Their Remobilization When Facing Scarcity: The Case of Drought. *Agriculture, 8(1), 14. https://doi.org/10.3390/agriculture8010014*
- FAO. (2025). Cultivos y productos de ganadería: área cosechada y producción de guisantes secos en el mundo en 2023. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Licencia: CC-BY-4.0.
- Galindo, J. R. (2006). Desarrollo de un modelo explicativo de la productividad potencial del cultivo de arveja (*Pisum Sativum* L.) Var. Santa Isabel bajo condiciones de la Sabana de Bogotá. Agrosavia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35017>
- Garaté, A. y Bonilla, I. (2013). Nutrición mineral y producción vegetal. In J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2nd ed, 143-164. McGraw-Hill Interamericana de España, S.L.
- Han, L., Zhang, M., Du, L., Zhang, L. & Li, B. (2022). Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 on Photosynthesis and Antioxidant Characteristics of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) under Drought Stress. *Agronomy*, 12(9), 2177. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092177>
- Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K. & White, P. J. (2023). Chapter 6 - Functions of macronutrients. In Z. Rengel, I. Cakmak, & P. J. White (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (Fourth Edition), 201–281. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- Hussain, K., Anwer, S., Nawaz, K., Malik, M. F., Zainab, N., Nazeer, A., Bashir, Z., Ali, S.

S., Siddiqi, E. H., Bhatti, K. H. & Majeed, A. (2020). Effect of foliar applications of iaa and ga3 on growth, yield and quality of pea (*Pisum sativum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 52(2), 447-460. [https://doi.org/10.30848/PJB2020-2\(32\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-2(32))

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Water. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 551-712. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>

Juzoń, K., Czyczył-Mysza, I., Ostrowska, A., Marcińska, I. & Skrzypek, E. (2019). Chlorophyll fluorescence for prediction of yellow lupin (*Lupinus luteus* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) susceptibility to drought. *Photosynthetica*, 57(4), 950-959. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.102>

Kausar, A., Zahra, N., Zahra, H., Hafeez, M. B., Zafer, S., Shahzadi, A., Raza, A., Djalovic, I. & Prasad, P. V. (2023). Alleviation of drought stress through foliar application of thiamine in two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Signaling and Behavior*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2186045>

Kuhlgert, S., Austic, G., Zegarac, R., Osei-Bonsu, I., Hoh, D., Chilvers, M. I., Roth, M. G., Bi, K., TerAvest, D., Weebadde, P. & Kramer, D. M. (2016). MultispeQ Beta: A tool for large-scale plant phenotyping connected to the open photosynQ

network. *R. Soc. Open Sci.* 3. <https://doi.org/10.1098/rsos.160592>

Mekureyaw, M. F., Pandey, C., Hennessy, R. C., Nicolaisen, M. H., Liu, F., Nybroe, O. & Roitsch, T. (2022). The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. *Journal of Plant Physiology*, 270, 153629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153629>

Moreno-Conn, L. M., Pérez, A., Ramírez, M. y Franco, M. (2014). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la viabilidad de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno utilizadas en la elaboración de inoculantes biológicos para arveja (*Pisum sativum*) y soya (*Glycine max*). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(2), 45-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v16n2.47244>

Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180316234006>

Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K. & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5. Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>

Patten, C. L. & Glick, B. R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Mi-*

crobiology, 68(8), 3795-3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>

Prudent, M., Vernoud, V., Girodet, S. & Salom, C. (2016). How nitrogen fixation is modulated in response to different water availability levels and during recovery: A structural and functional study at the whole plant level. *Plant and Soil*, 399(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2674-3>

R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Samavat, S., Samavat, S., Mafakheri, S., & Shakouri, J. (2012). Promoting common bean growth and nitrogen fixation by the co-inoculation of *Rhizobium* and *Pseudomonas fluorescens* isolates. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(3), 387-395. <https://www.agrojournal.org/18/03-11-12.pdf>

Sánchez-Díaz, M. y Aguirreolea, J. (2013). El agua en la planta. Movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. In J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), Fun-

damentos de Fisiología Vegetal, 2nd ed, 25–40. McGraw-Hill Interamericana de España, S.L.

Torres-Martínez, F. J., Rivadeneira-Miranda, C. N. & Castillo-Marín, Á. J. (2020). Pea production and commercialization in the department of Nariño-Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 129-140. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.36776>

You, J., Li, G., Li, C., Zhu, L., Yang, H., Song, R. & Gu, W. (2022). Biological Control and Plant Growth Promotion by Volatile Organic Compounds of *Trichoderma koningiopsis* T-51. *Journal of Fungi*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/jof8020131>

Zarei, T., Moradi, A., Kazemeini, S. A., Farajee, H. & Yadavi, A. (2019). Improving sweet corn (*Zea mays* L. var *saccharata*) growth and yield using *Pseudomonas fluorescens* inoculation under varied watering regimes. *Agricultural Water Management*, 226, 105757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105757>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN EN EL CONTROL DEL RAJADO DE TALLOS EN ALSTROEMERIA VARIEDAD 'BALI'

EVALUATION OF DIFFERENT FERTILIZATION STRATEGIES IN THE CONTROL OF STEM CRACKING IN ALSTROEMERIA VARIETY 'BALI'

Javier Giovanni Álvarez-Herrera ¹

Marilcen Jaime-Guerrero ²

Laura María Patiño-Serrano ³

Citación: Álvarez-Herrera, J. G., Jaime-Guerrero, M., Patiño-Serrano, L. M. (2026). Evaluación de diferentes estrategias de fertilización en el control del rajado de tallos en alstroemeria variedad 'Bali'. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 35 – 53.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9127>

¹ Ingeniero Agrícola, M. Sc. Ph. D., Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. javier.alvarez@uptc.edu.co

² Ingeniera Agrónoma, M. Sc., Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. marilcen.jaime@uptc.edu.co

³ Ingeniera Agrónoma, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. lauraserrano.agronomico@gmail.com

RESUMEN

Contextualización: La alstroemeria es una flor con gran belleza, amplia gama de colores, larga vida en florero y con una creciente popularidad a nivel mundial.

Vacío de investigación: Uno de los principales problemas que afecta la calidad de la flor de corte en el cultivo de alstroemeria es el rajado longitudinal del tallo presente durante las primeras semanas de crecimiento, lo cual origina la pérdida de producción y de calidad comercial.

Propósito del estudio: El objetivo fue evaluar diferentes estrategias de fertilización en el control del rajado de tallos en alstroemeria, variedad 'Bali'.

Metodología: Mediante un diseño experimental completamente aleatorizado, se evaluaron cinco tratamientos: testigo con fertilización convencional, tratamiento con riego adicional, urea adicional, fertilización foliar adicional a base de Ca, B, K y P, y el último con sulfato de potasio adicional, cuya aplicación se realizó una semana después de la siembra y semanalmente durante el ciclo de cultivo.

Resultados y conclusiones: La aplicación de sulfato de potasio mostró los mayores valores de diámetro del tallo con 0,835 cm. El número de flores por tallo no se vio afectado de forma significativa, no obstante, la aplicación de sulfato de potasio mostró valores superiores de 7,38 flores por tallo a las 27 semanas después de siembra. La fertilización foliar adicional con calcio, boro, potasio y fósforo afectó de manera significativa, al aumentar la producción y reducir el porcentaje de tallos rajados en el cultivo de alstroemeria. Es fundamental distribuir en un mayor número de aplicaciones las cantidades de nitrógeno durante el desarrollo del cultivo para evitar un crecimiento desproporcionado del tallo y prevenir fisiopatías.

Palabras clave: flores, diámetro de tallo, agrietamiento de tallo, nutrición mineral, fertiriego

ABSTRACT

Contextualization: Alstroemeria is a flower with great beauty, a wide range of colors, a long vase life, and a growing popularity worldwide.

Knowledge gap: One of the main problems affecting cut flowers' quality in alstroemeria cultivation is the longitudinal cracking of the stem present during the first weeks of growth, which causes a loss of production and commercial quality.

Purpose: The objective was to evaluate different fertilization strategies to control stem cracking in the alstroemeria variety 'Bali.'

Methodology: Using a completely randomized experimental design, five treatments were evaluated: control with conventional fertilization, treatment with additional irrigation, additional urea, additional foliar fertilization based on Ca, B, K, and P, and the last with additional potassium sulfate, whose application was carried out one week after sowing.

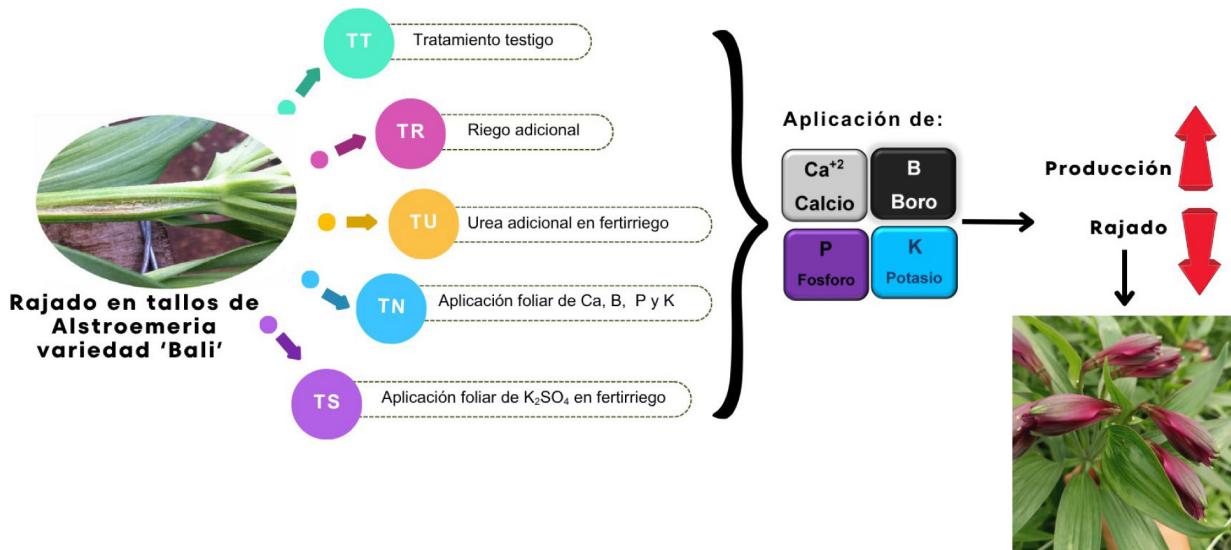
Results and conclusions: The application of potassium sulfate showed the highest values of stem diameter with 0.835 cm. The number of flowers per stem was not significantly affected. However, the application of potassium sulfate showed higher values of 7.38 flowers per stem at 27 weeks after sowing. Additional foliar fertilization with calcium, boron, potassium, and phosphorus was significantly affected by increasing production and reducing the percentage of cracked stems in the Alstroemeria crop. It is essential to distribute the quantities of nitrogen in a greater number of applications during the development of the crop to avoid disproportionate growth of the stem and prevent physiopathies.

Keywords: flowers, stem diameter, stem cracking, mineral nutrition, fertigation

RESUMEN GRÁFICO

La aplicación de Ca, B, K y P aumentó la producción de tallos y disminuyó el por-

centaje de tallos rajados en el cultivo de alstroemeria.



Fuente: Patiño-Serrano, L. M.; Creada con www.canva.com

1 INTRODUCCIÓN

La alstroemeria es conocida como lirio de los incas o lirio peruano. Es una flor de corte de larga duración y gran atractivo en el mercado floral, debido a su amplia gama de colores, y su popularidad se encuentra en aumento, lo que la ubica dentro de las diez flores de corte más importantes del mundo (Bridgen, 2018; Lone et al., 2021). Esta planta perenne es originaria de Chile, Brasil y otros países de Sudamérica (Kumar et al., 2024). A su vez, en Colombia, el cultivo de alstroemeria alcanza un 4,9 % del total de la producción de flores exportables, por lo que se convierte en un renglón importante de la economía en un país floricultor y actualmente tiene una creciente aceptación comercial

a nivel mundial, que ha incrementado la investigación y el desarrollo de nuevos materiales de esta planta (CCOA, 2023).

Uno de los mayores problemas de la alstroemeria es que durante las primeras semanas de producción se presenta un rajado longitudinal del tallo, el cual afecta la calidad (producto no exportable) y la vida útil de la flor de corte, lo que genera pérdidas en la producción. Esta fisiopatía ocurre probablemente por un suplemento inadecuado de riego, desbalances nutricionales (deficiencia o exceso), o por características inherentes a la variedad o genética de la planta (Souza & Tavares, 2021). Además, las condiciones de cultivo pueden provocar pérdidas de cali-

dad en la producción de flores de corte de alstroemeria que alcanzan entre un 30 % y un 70 % (Kaviya et al., 2021), ya que factores como luz y temperatura tienen un impacto significativo en la floración (Dhiman y Kashyap, 2022). Así mismo, se ha reportado que el cultivo bajo cubierta favorece el crecimiento vegetativo excesivo, lo que perjudica tanto la calidad de las flores como el rendimiento, generando brotes delgados e improductivos (Kumar et al., 2024).

Es sabido que el exceso de nitrógeno puede alterar la arquitectura del tallo, debido a que promueve un crecimiento excesivo, lo cual debilita las paredes celulares y favorece el rajado de los tallos, así mismo, genera un desbalance en hormonas como las auxinas y el etileno, lo cual aumenta los daños físicos en los tallos de las flores, que se acentúan bajo condiciones de estrés ambiental (Souza & Tavares, 2021). Así mismo, el exceso de nitrógeno puede causar problemas en la absorción de calcio, ya que en particular el nitrato puede alterar la capacidad de la planta para transportar calcio desde las raíces y hacia los tejidos apicales, lo que afecta la cohesión de la pared celular, reduce su elasticidad y puede provocar fisuras (Luo et al., 2020), que finalmente desencadenan el problema del rajado en el tallo.

Al respecto, un adecuado balance nutricional entre el nitrógeno y el calcio es necesario, ya que este último nutriente es esencial para el crecimiento y desarrollo de los tejidos vegetales, debido a que mantiene la rigidez de la pared celular, estabiliza las membranas celulares a través de la interacción con los fosfolípidos, disminuye la acti-

vidad de enzimas pectolíticas y actúa como segundo mensajero en muchos procesos fisiológicos, incluida la respuesta a diferentes tipos de estrés (Jaime-Guerrero et al., 2024). Del mismo modo, los síntomas de deficiencia de calcio ocurren con mayor frecuencia en los tejidos en desarrollo como los tallos jóvenes no lignificados (Thor, 2019), por lo tanto, altos niveles de nitrógeno estimulan un crecimiento rápido, que sobrepasa la capacidad de las células para fortalecer las paredes celulares (Souza y Tavares, 2021), generando la fisiopatía del rajado del tallo en el cultivo de alstroemeria. En este sentido, las flores con tallos rajados suelen marchitarse más rápido, lo que reduce la vida útil en florero, la estética, la calidad, y a su vez, disminuye el valor comercial.

Al respecto, Singh et al. (2017) mencionan que un manejo adecuado de la nutrición con N, P y K (150, 100 y 150 mg kg⁻¹) mejora el crecimiento vegetativo, lo que resulta en tallos fuertes y resistentes, mayor número de tallos, y de hojas por tallo, mayor cantidad de flores, y un tamaño de inflorescencia más grande, lo que se traduce en mejores rendimientos en alstroemeria. Del mismo modo, Calderón (2005) menciona que un exceso de nitratos y potasio y una deficiencia de Ca y B, acompañado de un exceso de humedad, generan el rajado de los tallos en clavel, y que la concentración de N en los tallos rajados es mayor en la savia, y no así en los tallos o las hojas.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar diferentes estrategias de fertilización en el control del rajado de tallos en alstroemeria variedad 'Bali', bajo condiciones de invernadero en Chía (Cundinamarca).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La investigación se llevó a cabo en los invernaderos de una finca del municipio de Chía, departamento de Cundinamarca, ubicada a 4,848039° de latitud norte y 74,052260° de longitud oeste, con una altitud de 2564 m. Los valores medios de las temperaturas mínima y máxima promedio registrados dentro del invernadero durante el ensayo fueron de 7,7 y 29,4 °C, respectivamente, con una humedad relativa promedio del 77 %. La precipitación de la zona es de 770 mm, y a campo abierto se registra una temperatura promedio de 13,4 °C, una HR del 60 % que clasifica el clima como frío seco.

Material vegetal

Se emplearon plantas de lirio de la variedad 'Bali' provenientes de la finca de propagación Santa Bárbara, ubicada en Facatativá, con una elongación de 35 cm. Esta variedad se caracteriza por flores cuyo color dominante es el amarillo, y se comercializa internacionalmente con tallos de mínimo 75 cm y una masa promedio de 50 g.

Los suelos de la zona están formados por derivados de cenizas volcánicas y sedimentos aluviales, los cuales son clasificados en Humic Dystrudepts, con pendiente menor al 3 % y con una distribución del tamaño de partículas franco arenosa. El suelo para la siembra se preparó mediante un arado superficial, el cual tenía las siguientes condiciones previo a la instalación del ensayo

con valores de 159, 142, 164, 184 y 143 mg kg⁻¹ de NO₃, conductividad eléctrica de 2,03, 1,75, 1,87, 2,40 y 1,99 dS m⁻¹ y pH de 6,4, 6,5, 6,8, 7,0 y 6,4, para el tratamiento testigo (TT), tratamiento con riego adicional (TR), tratamiento con urea adicional (TU), tratamiento con nutrición foliar adicional (TN) y tratamiento con sulfato de potasio adicional (TS), respectivamente (Tabla 1). Posteriormente, el suelo se desinfectó con dicloropropeno al 92 % (Agroquímicos de Levante S.A., España), con el fin de prevenir la aparición de patógenos y evitar el crecimiento de plantas invasoras. Una vez transcurrido el plazo de seguridad de 21 días del producto, se procedió a la siembra del material vegetal. Este se instaló a una distancia de 40 cm entre plantas, en camas contenidas y una vez trasplantadas se realizaron las diferentes labores de cultivo, como podas, tutorado, manejo fitosanitario, entre otros. La fertilización convencional del cultivo con macronutrientes fue de 155, 54, 144, 100 y 20 mg kg⁻¹, de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente, y de micronutrientes fue de 1,0, 0,5, 2, 2,2, 0,5 y 0,01 mg kg⁻¹ de Zn, Cu, Fe, Mn, Bo y Mo, respectivamente.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado, en donde se evaluaron cinco tratamientos (Tabla 1), cada uno con cinco repeticiones, para conformar 25 unidades experimentales (UE), en donde cada UE estuvo compuesta por 50 plantas, para

un total de 250 plantas por tratamiento, las cuales se sembraron a una profundidad de 20

cm. Las aplicaciones de cada tratamiento comenzaron una semana después de la siembra.

Tabla 1.

Tratamientos de riego y fertilización en el control del rajado de tallos en alstroemeria variedad 'Bali'

Abreviatura	Riego (L)	Sistema de riego	Fertilización
TT	120	Goteo	Convencional
TR	150	Goteo (120 L) + manguera (30 L)	Convencional
TU	120	Goteo	Convencional + urea en fertiriego (500 mg kg ⁻¹ de nitrógeno semanal).
TN	120	Goteo	Convencional + aplicación foliar de calcio (308 mg kg ⁻¹ dos veces por semana) + boro (75 mg kg ⁻¹ dos veces por semana) + fósforo (858 mg kg ⁻¹ semanal) y potasio (681 mg kg ⁻¹ semanal).
TS	120	Goteo	Convencional + sulfato de potasio (500 mg kg ⁻¹ semanal) en fertiriego.

TT: tratamiento testigo; TR: tratamiento con riego adicional; TU: tratamiento con urea adicional; TN: tratamiento con nutrición foliar adicional; TS: tratamiento con sulfato de potasio adicional. Convencional: de acuerdo con los estándares de la zona. El riego está determinado por día.

VARIABLES DE RESPUESTA

Una vez comenzó la aparición del rajado de los tallos en los lirios, se tomó registro de la fisiopatía una semanalmente, en cada una de las unidades experimentales, y se determinaron las siguientes variables:

Se evaluó el porcentaje del rajado en el tallo, en donde una vez apareció la fisiopatía (aparición de la ruptura vertical) en las primeras semanas de vida de los tallos vegetativos (semana 18), se marcó con cintas de color blanco de acuerdo con la semana

de vida, para evitar la repetición del conteo, y se calculó dividiendo el número de tallos rajados en el número de tallos total producidos por UE, hasta la cosecha de los tallos en la semana 32.

El diámetro del tallo se midió con un calibrador pie de rey digital (Mitutoyo Corporation, Japón) de precisión 0,05 mm en 15 tallos por UE, dos veces por semana, desde la semana 18 hasta la semana 27, en donde termina su crecimiento, así mismo se contó el número de flores por tallo con la misma frecuencia y en los mismos tiempos.

Se cuantificó la producción determinando la cantidad de tallos exportables por UE, a partir de la semana 18 después de la siembra, en la cual comienzan a aparecer los primeros tallos con cualidades aptas de exportación, para lo cual se realizó un registro diario por UE, y en el que se descartaron los tallos que presentan condiciones no favorables para manejo en poscosecha, como por ejemplo dos flores por tallo, altura no deseada y apertura de flor precoz.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (Anova) para un diseño completamente al azar con

el fin de determinar si hay diferencias significativas entre los diferentes tratamientos aplicados, para cada una de las variables de respuesta medidas, adicionalmente se hizo una prueba de comparación de promedios de Bonferroni al 95 %. Además, se realizó un análisis de medidas repetidas en el tiempo, con el fin de establecer las diferencias estadísticas entre los diferentes instantes de medición, según la prueba de Tukey [$P \leq 0,05$]. Se utilizó el *software* estadístico SAS OnDemand for Academics program (SAS Institute Inc., Cary, NC).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diámetro del tallo

La evaluación del diámetro se realizó en tallos con mediciones superiores a los 0,4 cm, ya que estos son los que cumplen con los parámetros de calidad para exportación. Durante las mediciones realizadas entre las 18 y 23 semanas después de siembra (SDS), no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, mientras que a partir de las 24 SDS, las distintas estrategias de control del rajado empleadas mostraron diferencias estadísticas (Figura 1). Así mismo, el comportamiento del diámetro del tallo mostró diferencias significativas entre las distintas mediciones realizadas en el tiempo (Tabla 2), en donde se aprecia un comportamiento de crecimiento lineal constante desde la semana 18 hasta la 22, con una pequeña pausa en el crecimiento entre las 22 y 23 SDS, para

luego proseguir con la misma velocidad de crecimiento, hasta la semana 27.

El tratamiento con la aplicación de sulfato de potasio adicional obtuvo los mejores resultados en cuanto al diámetro del tallo (0,835 cm), mientras que el tratamiento testigo y el tratamiento con nutrición foliar adicional, tuvieron los valores más bajos con 0,807 y 0,808 cm, respectivamente. Estos valores son similares a los reportados por Kumar et al. (2024), quienes encontraron diámetros de tallo que oscilan entre 0,505 y 0,875 cm para alstroemeria cultivar 'Capri' sometida a diferentes densidades de siembra y aclareo de brotes. Asimismo, Kaushal et al. (2018) reportan diámetros de tallo promedio para alstroemeria de 0,845 cm, con diferentes tratamientos de riego.

Tabla 2.

Promedio del diámetro de tallo, número de flores por tallo y porcentaje de tallos rajados en alstroemeria variedad 'Bali' sometida a diferentes tratamientos de riego y fertilización

Semana	Diámetro de tallo (cm)	Número de flores por tallo	Porcentaje de tallos rajados (%)
18	0,705f	6,1c	1,65h
19	0,754e	6,82b	3,32h
20	0,762de	7,26a	3,81h
21	0,786cd	7,162ab	5,61gh
22	0,81c	7,176ab	8,00fgh
23	0,816c	7,154ab	9,72efgh
24	0,858b	7,34a	12,24defgh
25	0,87b	7,274a	14,4defgh
26	0,886ab	7,372a	17,6cdefg
27	0,9038a	7,168ab	19,7bcdef
28	-	-	22,3bcde
29	-	-	25,7abcd
30	-	-	30,1abc
31	-	-	33,3ab
32	-	-	36,02a
Tukey ($P \leq 0,05$)	0,031	0,436	13,72

Letras distintas indican diferencias significativas entre mediciones en el tiempo, según Tukey ($P \leq 0,05$). – datos no medidos.

Fuente: autores.

Al respecto, es sabido que el potasio es fundamental para el equilibrio osmótico, la turgencia celular, apertura estomática, y el movimiento de fotoasimilados, ya que mantiene la hidratación de las células, debido a que regula la entrada y salida de agua a través de la membrana celular, lo que contribuye a una expansión uniforme de los tejidos

del tallo y favorece un mayor grosor y resistencia estructural del tallo (Hu et al., 2022). En este sentido, Alharbi et al. (2024) evaluaron la aplicación de nanosilicatos de potasio en plantas de sorgo, y lograron aumentar el diámetro del tallo de 0,9 cm a 1,8 cm, lo que resalta la aplicación de potasio en el aumento del grosor del tallo en las plantas.

Número de flores por tallo

En general, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para el número de flores por tallo a excepción de las mediciones realizadas en las semanas 22 y 27 SDS, en las cuales la aplicación adicional de sulfato de potasio mostró los mayores valores con 7,61 y 7,38 flores por tallo, respectivamente (Figura 2). Estos valores son inferiores a los reportados por Kaushal et al. (2018), quienes sometieron alstroemeria a diferentes niveles de riego y encontraron valores de 17,95 flores por tallo, y 5,69 flores por inflorescencia. Del mismo modo, Lone et al. (2021) evaluaron diferentes densidades de siembra y aclareo de brotes en alstroemeria cultivares 'Pluto' y 'Alladin' y encontraron

un número promedio de inflorescencias por tallo de 2,88 y de 4,41 flores por inflorescencia. Cabe resaltar que los valores reportados en el presente estudio son inferiores, debido a que solo se tienen en cuenta flores de calidad exportable, pues los tallos descartados no se contabilizan, ya que esta es una actividad dispendiosa que no genera rentabilidad dentro de las actividades de producción de las flores. Así mismo, se observaron diferencias significativas entre las diferentes mediciones en el tiempo para el número de flores por tallo (Tabla 2), en donde se aprecia un comportamiento de aumento significativo desde la semana 18 hasta la 20, para luego mostrar un número de flores por tallo constante a lo largo del ciclo de producción del cultivo, y volver a disminuir hacia la semana 27.

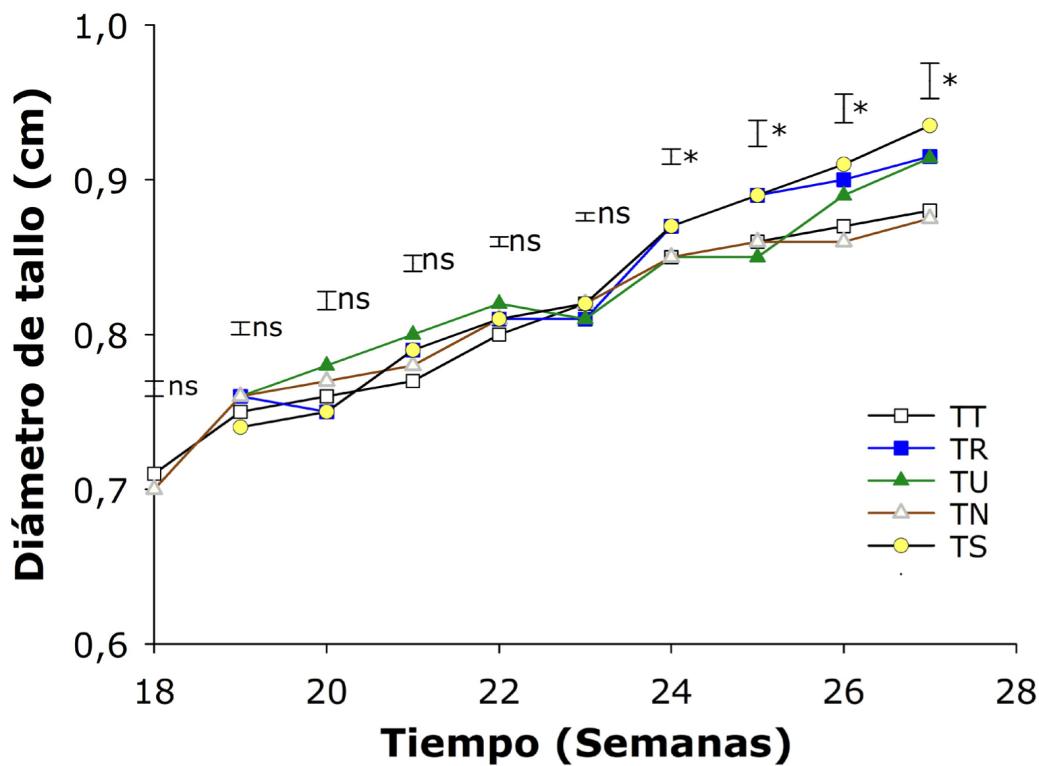


Figura 1. Diámetro de tallo de alstroemeria variedad 'Bali' sometida a diferentes estrategias de fertilización para el control del rajado de tallos. TT: tratamiento testigo; TR: tratamiento con riego adicional; TU: tratamiento con urea adicional; TN: tratamiento con nutrición foliar adicional; TS: tratamiento con sulfato de potasio adicional. ns: no significativo, * indican diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo con el ANOVA [$P \leq 0,05$]. Las barras verticales indican el error estándar ($n=15$).

Fuente: autores.

El número de flores exportables por tallo depende del suministro adecuado de nutrientes, especialmente del nitrógeno, fósforo y potasio, además de un manejo adecuado del riego, ya que un déficit hídrico puede causar estrés en la planta, lo que afecta el número y la calidad de la flor (Zhang et al.

2024). Así mismo, es sabido que la floración de la alstroemeria es regulada por cambios en el fotoperiodo, por lo que la duración y calidad de la luz desempeñan un papel importante en el desarrollo floral (Proietti et al., 2022).

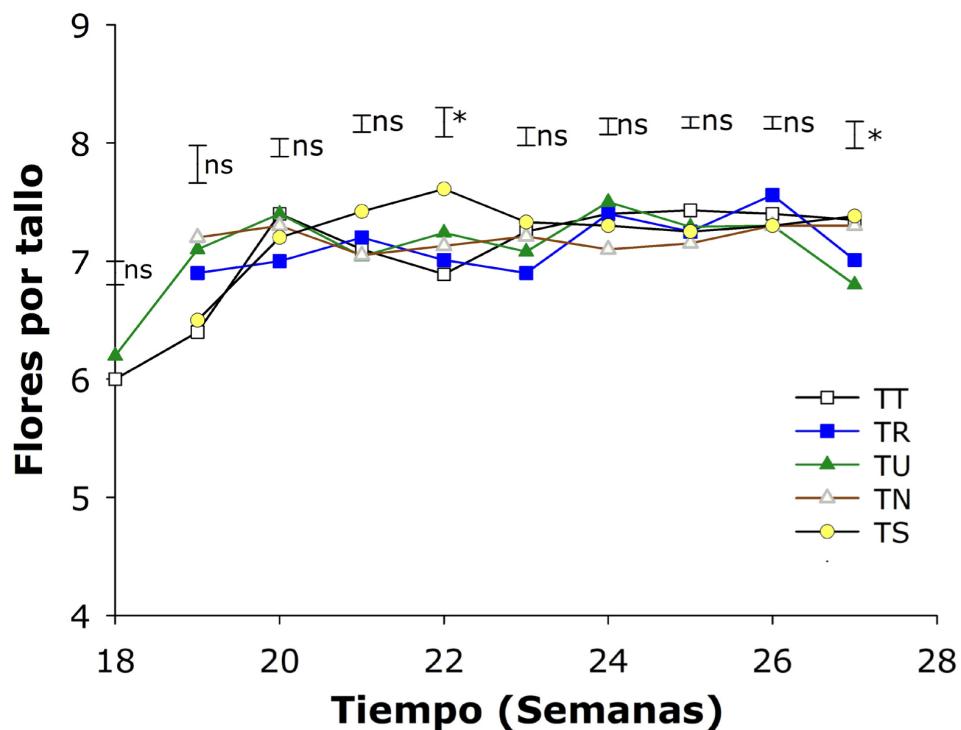


Figura 2. Número de flores por tallo de alstroemeria variedad 'Bali' sometida a diferentes estrategias de fertilización para el control del rajado de tallos. TT: tratamiento testigo; TR: tratamiento con riego adicional; TU: tratamiento con urea adicional; TN: tratamiento con nutrición foliar adicional; TS: tratamiento con sulfato de potasio adicional. ns: no significativo, * indican efecto significativo de acuerdo con el ANOVA ($P \leq 0,05$). Las barras verticales indican el error estándar ($n=15$).

Fuente: autores.

La fertilización con potasio es clave en los procesos fisiológicos y metabólicos que afectan el desarrollo floral, ya que al regular el flujo de agua dentro de las células promueve el desarrollo de tallos robustos que son capaces de soportar un mayor número de flores, además, el potasio optimiza los procesos de fotosíntesis y redistribución de carbohidratos hacia los órganos en crecimiento como los brotes florales (Hasanuzzaman et al. 2018), lo que favorece el desarrollo de un mayor número de flores por tallo.

Producción

El número de flores exportables por área mostró diferencias significativas entre las distintas estrategias de fertilización empleadas en el control del rajado de tallos en alstroemeria, como se aprecia en la figura 3. El tratamiento con la aplicación de nutrientes foliares mostró los mayores valores ($86,48 \text{ flores m}^{-2}$), seguido del tratamiento testigo ($66,69 \text{ flores m}^{-2}$), mientras que los tratamientos con sulfato de potasio y urea adicional tuvieron los menores valores con $53,7$ y

55,4 flores m^{-2} , respectivamente, los cuales son superiores a los 43,1, y 43,8 tallos cortados por planta reportados por Kaushal et al. (2018) y a los 39,55 y 47,33 brotes florales por planta para los cultivares 'Pluto' y 'Alla-

din' observados por Lone et al., (2021), así mismo, Kumar et al. (2024) reportan valores que oscilan entre 23,56 y 36,78 brotes florales por planta para alstroemeria 'Capri'.

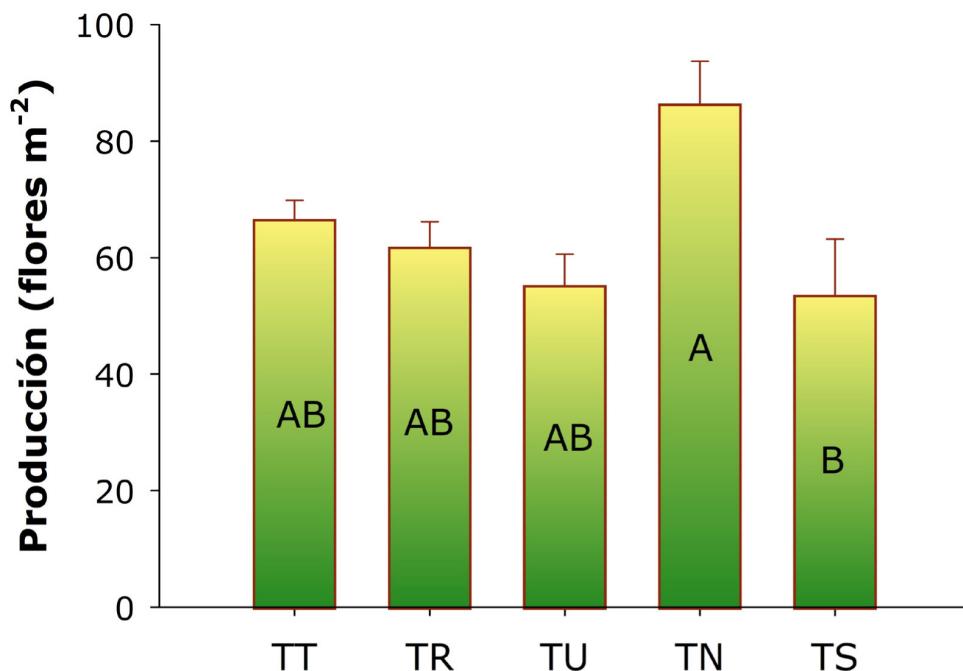


Figura 3. Producción de alstroemeria variedad 'Bali' sometida a diferentes estrategias de fertilización para el control del rajado de tallos. TT: tratamiento testigo; TR: tratamiento con riego adicional; TU: tratamiento con urea adicional; TN: tratamiento con nutrición foliar adicional; TS: tratamiento con sulfato de potasio adicional. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según Tukey ($P \leq 0,05$). Las barras verticales indican el error estándar ($n=15$).

Fuente: autores.

El tratamiento con nutrición foliar estaba compuesto por calcio, boro, fósforo y potasio, los cuales son nutrientes clave en el desarrollo estructural, fisiológico y reproductivo de las plantas (Saleem et al., 2023). En este sentido, el calcio es esencial para la formación y estabilidad de la pared celular, y además contribuye a la elongación celular,

lo que favorece el crecimiento de tallos más largos y robustos, por lo que un suministro adecuado de calcio reduce la incidencia de tallos quebradizos (Thor, 2019). En cuanto al fósforo, es fundamental para la fotosíntesis, la transferencia de energía (ATP), y el desarrollo radicular, por lo que estimula el crecimiento de las raíces, mejora la absorción

de agua y nutrientes necesarios para la producción (Khan et al., 2023). Por otro lado, el boro es crucial para la síntesis de carbohidratos, e influye en el desarrollo de las flores al fortalecer el tubo polínico (Vera-Maldonado et al., 2024). El potasio regula el balance hídrico y fortalece la resistencia a heladas y enfermedades, por lo que su aplicación incrementa la calidad de los tallos al mejorar el grosor y la longitud (Alharbi et al., 2024).

Porcentaje de tallos rajados

El porcentaje de tallos rajados mostró diferencias significativas entre las diferentes

semanas de medición (Tabla 2). Se aprecia un crecimiento leve de la fisiopatía desde la semana 18 hasta la semana 21, sin diferencias significativas, y a partir de allí, se eleva el porcentaje de rajado de tallos en cada semana hasta la cosecha. A su vez, no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados para el porcentaje de tallos rajados en las primeras semanas de medición (18 a 22 SDS), entre las 23 y 26 SDS, hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$), y a partir de las 27 SDS y hasta las 32 SDS se obtuvieron diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) (Figura 4).

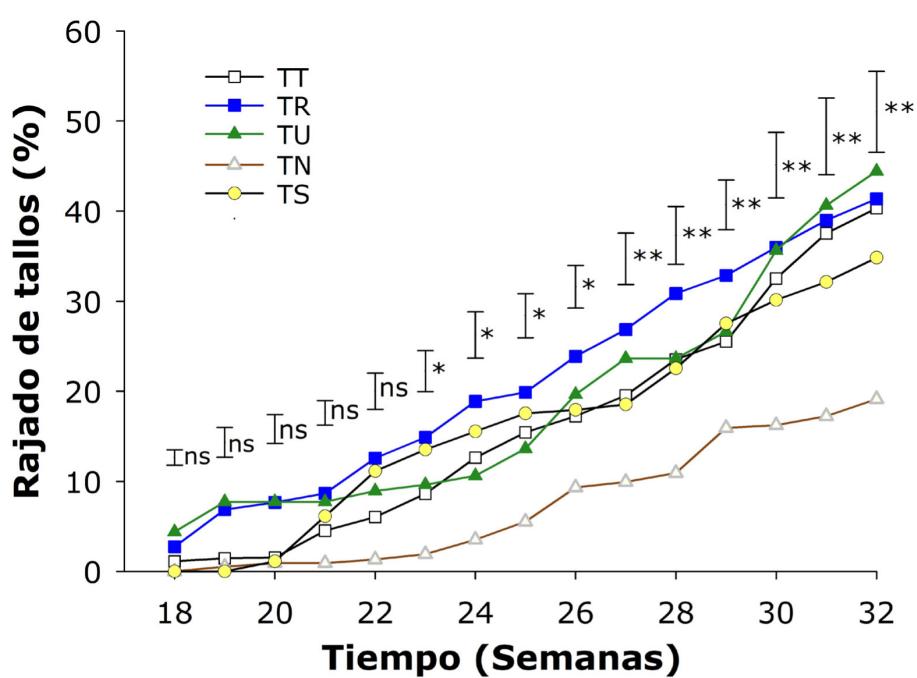


Figura 4. Porcentaje de tallos rajados en alstroemeria variedad 'Bali' sometida a diferentes estrategias de fertilización para el control del rajado de tallos. TT: tratamiento testigo; TR: tratamiento con riego adicional; TU: tratamiento con urea adicional; TN: tratamiento con nutrición foliar adicional; TS: tratamiento con sulfato de potasio adicional. ns: no significativo, * y ** indican efecto significativo de acuerdo con el ANOVA ($P \leq 0,05$) y ($P \leq 0,01$), respectivamente. Las barras verticales indican el error estándar ($n=15$).

Fuente: autores.

En general, el tratamiento con aplicación de urea adicional (TU) y el tratamiento con riego adicional (TR) mostraron los mayores valores a lo largo de las mediciones con 44,43 % y 41,37 %, respectivamente, mientras que el tratamiento con la aplicación de Ca, B, P y K, (TN) tuvo el menor porcentaje de tallos rajados con un 19,34 % hacia la semana 32, momento en el cual se produce la cosecha de los tallos. Es sabido que el calcio proporciona rigidez a las células, el boro facilita la formación de la pared celular, el fósforo promueve un crecimiento equilibrado y el potasio regula el balance osmótico, manteniendo la turgencia celular, de tal manera, que estos nutrientes previenen un crecimiento descontrolado y aumentan la resistencia del tallo, lo que reduce el rajado de los tallos en alstroemeria al fortalecer las paredes celulares y mejorar la estructura del tejido (Tripathi et al., 2022).

En este sentido, Negin et al. (2023) encontraron que la deficiencia de alcanos en la cera epicuticular de los tallos genera una mayor susceptibilidad al rajado del tallo, así mismo, menciona que conforme aumenta la duración del estrés hídrico, previo al riego, las plantas que tuvieron regímenes hídricos más drásticos, tanto por exceso como por déficit de agua tuvieron mayor agrietamiento del tallo. Al respecto, Feng et al. (2016) mencionan que una aplicación excesiva de agua puede estimular un crecimiento rápido y desbalanceado en los tejidos del tallo, ya

que la entrada de agua en las células, especialmente en los tejidos del tallo, aumenta la presión de turgencia de manera desproporcionada, así que cuando las paredes celulares no pueden expandirse al mismo ritmo que el crecimiento provocado por el exceso de agua, se genera el rajado de los tallos (Feng et al., 2016). Estos problemas de rajado generados por exceso de agua también pueden superar la elasticidad de la pared celular, incrementando la susceptibilidad al daño estructural en frutos como melón (Xue et al., 2024), tomate (Peet & Willits, 1995), cerezas (Correia et al., 2018) y uchuvas (Fischer et al., 2021).

Por otro lado, la aplicación excesiva de nitrógeno puede contribuir al rajado de tallos en flores de corte, debido a varios factores asociados con el crecimiento desequilibrado y el debilitamiento estructural (Souri et al., 2018). En cultivos como los claveles y las rosas, un exceso de nitrógeno fomenta un crecimiento rápido y excesivo de tejidos, lo que puede reducir la resistencia mecánica del tallo y aumentar la susceptibilidad a fracturas. Además, este desequilibrio puede generar acumulación de agua en los tejidos, lo que incrementa la presión interna y facilita el rajado, especialmente en condiciones de alta humedad o estrés hídrico (Souza & Tavares, 2021). Al respecto, Jawaharlal et al. (2009) mencionan que el exceso de nitrógeno provoca un retraso en la floración y reduce la calidad de las flores después de la cosecha.

4 CONCLUSIONES

La fertilización foliar con calcio, boro, potasio y fósforo aumentó la producción en el cultivo de alstroemeria y presentó los menores porcentajes de tallo rajado. Los tratamientos con riego adicional y nitrógeno adicional por separado generaron el mayor porcentaje de tallos rajados en el cultivo de alstroemeria. La aplicación de sulfato de po-

tasio aumenta el diámetro del tallo y el número de flores exportables por tallo. Se deben distribuir las dosis de nitrógeno en mayor número de aplicaciones con el fin de evitar un crecimiento desproporcionado del tallo. El porcentaje de rajado de los tallos se incrementa significativamente a partir de la semana 21 después de siembra y hasta la cosecha.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: Metodología, análisis de datos, investigación, escritura, revisión, edición y supervisión.

Autor 2: Metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Autor 3: Borrador original, escritura, metodología, logística, análisis de datos, investigación y conceptualización.

LITERATURA CITADA

Alharbi, K., Alnusairi, G. S., Alnusaire, T. S., Alghanem, S. M., Alsudays, I. M., Alaklabi, A. & Soliman, M. H. (2024). Potassium silica nanostructure improved growth and nutrient uptake of sorghum plants subjected to drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1425834. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1425834>

Bridgen, M. P. (2018). *Alstroemeria*. In: J. Van Huylenbroeck, (Eds.). *Ornamental Crops* (p. 231-236). *Handbook of Plant Breeding*, 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90698-0_10

Calderón, F. (2005). *Contribución al conocimiento sobre el rajado de tallos en clavel. (Dianthus carophyllus L.)* Calderón Laboratorios Ltda. http://www.drcalderon-labs.com/Investigaciones/Investigacion_Rajado_Tallos_Clavel.htm

Cámara de Comercio Oriente Antioqueño [CCOA]. (2023). *Encadenamiento de flores*. https://ccoa.org.co/wp-content/uploads/2023/09/1_Presentacion_Encadenamiento-de-Flores.pdf

Correia, S., Schouten, R., Silva, A. P. & Gonçalves, B. (2018). Sweet cherry fruit cracking mechanisms and prevention strat-

- egies: A review. *Scientia Horticulturae*, 240, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.042>
- Dhiman, M. R. y Kashyap, B. (2022). *Alstroemeria: conservación, caracterización y evaluación*. En: S. K. Datta and Y. C. Gupta (Eds.). *Floricultura y plantas ornamentales. Manuales de diversidad de cultivos: conservación y uso de recursos fitogenéticos*. Springer, Singapur.
- Feng, W., Lindner, H., Robbins, N. E. & Dineny, J. R. (2016). Growing out of stress: the role of cell-and organ-scale growth control in plant water-stress responses. *The Plant Cell*, 28(8), 1769-1782. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00182>
- Fischer, G., Balaguera-López, H. E. & Álvarez-Herrera, J. (2021). Causes of fruit cracking in the era of climate change. A review. *Agronomía Colombiana*, 39(2), 196-207. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n2.97071>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M.S., Masud, A. A. C., Moumita. & Fujita, M. (2018). Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Hu, W., Lu, Z., Gu, H., Ye, X., Li, X., Cong, R., Ren, T. & Lu, J. (2022). Potassium availability influences the mesophyll structure to coordinate the conductance of CO_2 and H_2O during leaf expansion. *Plant, Cell & Environment*, 45(10), 2987-3000. <https://doi.org/10.1111/pce.14405>
- Jaime-Guerrero, M., Álvarez-Herrera, J. G. & Fischer, G. (2024). Effect of calcium on fruit quality: A review. *Agronomía Colombiana*, 42(1), 1-14. <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v42n1.112026>
- Jawaharlal, M., Ganga, M., Padmadevi, K., Jegadeeswari, V. & Karthikeyan, S. (2009). A technical guide on carnation. Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore, 1-56. <https://agritech.tnau.ac.in/horticulture/pdf/A%20Technical%20Guide%20On%20Carnation.pdf>
- Kaushal, S., Dilta, B. S., Gupta, Y. C., Kumar, P., Spehia, R. S. & Gupta, R. K. (2018). Studies on drip irrigation levels on growth, flowering and yield of alstroemeria (*Alstroemeria hybrida* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 2950-2955. <https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue3/PartAN/7-3-330-875.pdf>
- Kaviya, S. S., Lourdusamy, K., Ganga, M. & Vincent, S. (2021). Influence of pre-harvest sprays on flower quality and vase life of Alstroemeria. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(S1), 429-433. <https://doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i1Sg.13597>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M. & Zhao, C. (2023). Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants*, 12(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Kumar, A., Kashyap, B., Dhiman, S. R., Pathania, S., Hashem, A., Abd_Allah, E.

- F. & Sharma, U. (2024). Impact of planting density and shoot thinning on alstroemeria flowering, soil attributes and cost economics. *Helion*, 10(18). [https://www.cell.com/helion/fulltext/S2405-8440\(24\)14189-8](https://www.cell.com/helion/fulltext/S2405-8440(24)14189-8)
- Lone, R. A., Nazki, I. T., Gani, G. & Ganai, N. A. (2021). Effect of spacing and thinning on growth and flowering of *Alstroemeria hybrida* L. *The Pharma Innovation Journal*, 10(9), 356-360. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue9/PartF/10-7-313-742.pdf>
- Luo, L., Zhang, Y. & Xu, G. (2020). How does nitrogen shape plant architecture? *Journal of Experimental Botany*, 71(15), 4415-4427. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa187>
- Negin, B., Hen-Avivi, S., Almekias-Siegl, E., Shachar, L., Jander, G. & Aharoni, A (2023). Tree tobacco (*Nicotiana glauca*) cuticular wax composition is essential for leaf retention during drought, facilitating a speedy recovery following rewatering. *New Phytologist*, 237(5), 1574-1589. <https://doi.org/10.1111/nph.18615>
- Peet, M. M. & Willits, D. H. (1995). Role of Excess Water in Tomato Fruit Cracking. *HortScience HortSci*, 30(1), 65-68. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.1.65>
- Proietti, S., Scariot, V., De Pascale, S. & Paradiso, R. (2022). Flowering mechanisms and environmental stimuli for flower transition: Bases for production scheduling in greenhouse floriculture. *Plants*, 11(3), 432. <https://doi.org/10.3390/plants11030432>
- Saleem, S., Mushtaq, N. U., Rasool, A., Shah, W. H., Tahir, I. & Rehman, R. U. (2023). *Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement*. In: Aftab, T. & Rehman, K., (Eds.). *Sustainable plant nutrition*. 23-49. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>
- Singh, J., Dilta, B. S., Baweja, H. S. & Kumar, V. (2017). Impact of growing media and NPK on growth and flowering of Alstroemeria cv. Capri. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 6(9), 16-21. <https://bepls.com/beplsaugust2017/4.pdf>
- Souri, M. K., Goodarzizadeh, S., Ahmadi, M. & Hatamian, M. (2018). Characteristics of postharvest quality of chrysanthemum cut flowers under pretreatment with nitrogenous compounds. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 17(3), 83-90.
- Souza, L. A. & Tavares, R. (2021). Nitrogen and stem development: a puzzle still to be solved. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630587. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630587>
- Thor, K. (2019). Calcium-nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 440. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00440/full>
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K. P., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A. K., De Corato U. & Sansinenea E. (2022). Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop

protection. *Frontiers in Plant Science*, 13, 883970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970>

Vera-Maldonado, P., Aquea, F., Reyes-Díaz, M., Cárcamo-Fincheira, P., Soto-Cerda, B., Nunes-Nesi, A. & Inostroza-Blancheteau, C. (2024). Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1332459. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>

Xue, Q., Li, H., Chen, J. & Du, T. (2024). Fruit cracking in muskmelon: Fruit growth

and biomechanical properties in different irrigation levels. *Agricultural Water Management*, 293, 108672. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108672>

Zhang, P., Zhou, J., He, D., Yang, Y., Lu, Z., Yang, C., Zhang, D., Li, F. & Wang, J. (2024). From Flourish to Nourish: Cultivating Soil Health for Sustainable Floriculture. *Plants*, 13(21), 3055. <https://doi.org/10.3390/plants13213055>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



GERMINACIÓN CONIDIAL Y CRECIMIENTO MICELIAL *IN VITRO* DE *Trichoderma koningiopsis* (TH003) CON AGROQUÍMICOS DE PAPA

CONIDIAL GERMINATION AND *IN VITRO* MYCELIAL GROWTH OF *Trichoderma koningiopsis* (TH003) WITH POTATO AGROCHEMICALS

Blanca Lucía Botina-Azaín ¹

Camilo Rubén Beltrán-Acosta ²

Yimmy Alexander Zapata-Narváez ³

Citación: Botina-Azaín, B. L., Beltrán-Acosta, C. R., Zapata-Narváez, Y. A. (2026). Germinación conidial y crecimiento micelial *in vitro* de *Trichoderma koningiopsis* (Th003) con agroquímicos de papa. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 55 – 72.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9186>

¹ Mag. en Ciencias Biológicas. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria–Agrosavia, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. bbotina@agrosavia.co

² Mag. en Ciencias Biológicas. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. cbeltran@agrosavia.co

³ Mag. en Agrociencias. Corporación Colombiana de Investigación. Agropecuaria –Agrosavia, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. jzaptan@agrosavia.co

RESUMEN

Contextualización: Diferentes plagas afectan la producción del cultivo de papa y, dadas las tendencias hacia una producción agrícola sostenible, es importante implementar alternativas de manejo que permitan disminuir el uso de agroinsumos químicos.

Vacío de conocimiento: Se desconoce el impacto negativo que los diferentes agroquímicos utilizados en el cultivo de papa pueden presentar en el crecimiento de *Trichoderma koningiopsis* Th003, principio activo del bioplaguicida Tricotec® WG.

Propósito: Evaluar *in vitro* el efecto de agroquímicos usados en el cultivo de papa sobre el crecimiento micelial y la germinación de conidios de *T. koningiopsis* Th003, con miras a establecer recomendaciones de uso del bioplaguicida.

Metodología: El efecto sobre el crecimiento del micelio se evaluó en agar-dextrosa-sabouraud, suplementado con 29 insumos agrícolas comerciales en la dosis superior recomendada en la ficha técnica. El efecto sobre la germinación de los conidios se realizó suspendiéndolos en soluciones de cada agroquímico por una hora y posterior siembra en agar-agua.

Resultados y conclusiones: Insecticidas como acefato, fipronil, methomyl, bifen-thrin, chlorantraniliprole, fentoato, chlorfenapyr, lambdacihalotrina-tiametoxam y thiamethoxam-chlorantraniliprole, bactericida a base de ácido oxolínico y el fungicida N-alquil bencil y todos los fertilizantes (excepto etanolamina de boro, inhibiendo el crecimiento micelial en 22% y la germinación de conidios en 34%) no inhibieron el crecimiento de *T. koningiopsis* Th003. Los bactericidas a base de sulfato de gentamicina y oxitetraciclina pueden considerarse medianamente compatibles, dado su relativo efecto inhibitorio en germinación, así como el fungicida thiophanate-methyl. Los fungicidas pyraclostrobin-fluxapyroxad y azoxystrobin-mancozeb, los desinfectantes cloruro de benzalconio+surfactantes y el complejo de yodo inhibieron el crecimiento y germinación de los conidios del hongo. Los coadyuvantes a base de silicato de potasio y alcohol etoxilado-polyoxiethylene alkyl ether no inhibieron la germinación.

Palabras clave: abono, coadyuvantes de plaguicidas, germinación de esporas, inhibición del crecimiento, manejo integrado, plaguicida.

ABSTRACT

Contextualization: Different pests affect potato crop production and given the trends towards sustainable agricultural production; it is important to implement management alternatives that allow to reduce the use of chemical agro-inputs.

Knowledge gap: The negative impact that the different agrochemicals used in potato cultivation may have on the growth of *Trichoderma koningiopsis* Th003, the active ingredient of the biopesticide Tricotec® WG, is unknown.

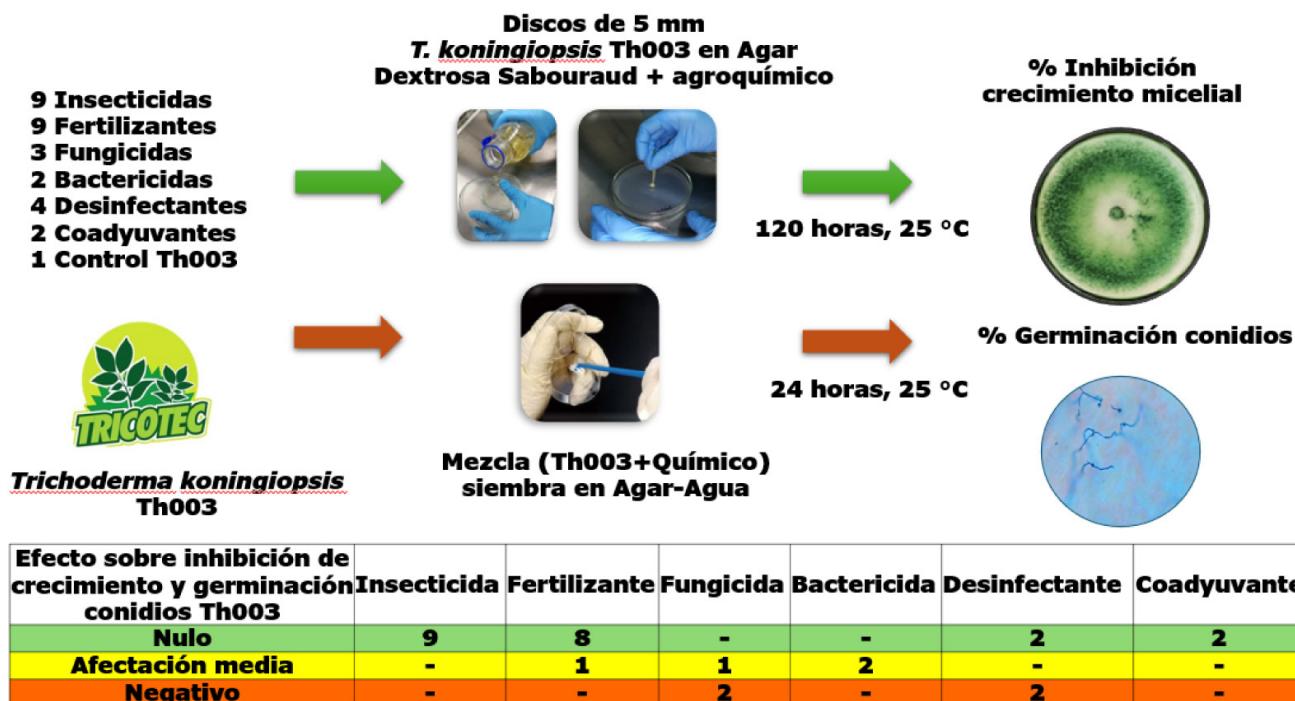
Purpose: To evaluate in vitro the effect of agrochemicals used in potato cultivation on mycelial growth and germination of conidia of *T. koningiopsis* Th003, with a view to establishing recommendations for the use of the biopesticide.

Methodology: The effect on mycelial growth was evaluated on Sabouraud-Dextrose-Agar supplemented with 29 commercial farm inputs at the higher dose recommended in the data sheet. The effect on conidia germination was performed by suspending them in solutions of each agrochemical for one hour and then seeding on water agar.

Results and conclusions: Insecticides such as Acephate, Bifenthrin, Chlorantraniliprole, Chlорfenapyr, Fipronil, Methomyl, Phenthroate, Lambdacyhalothrin-Tiamethoxam, and Thiamethoxam-Chlorantraniliprole, the bactericide based oxolinic acid and the fungicide N-Alkyl Benzyl and all fertilizers (except Boron Ethanolamine, inhibiting mycelial growth by 22% and conidial germination by 34%) did not inhibit the growth of *T. koningiopsis* Th003. The bactericides based on gentamicin sulfate and oxytetracycline can be considered moderately compatible given their relative inhibitory effect on germination, as well as the fungicide Thiophanate-methyl. The fungicides Pyraclostrobin-Fluxapyroxad and Azoxystrobin-Mancozeb, the disinfectants Benzalkonium chloride+surfactants and the Iodine complex inhibited the growth and germination of fungal conidia. Potassium Silicate and Ethoxylated Alcohol-Polyoxyethylene Alkyl Ether adjuvants did not inhibit germination.

Keywords: fertilizer, pesticide adjuvants, spore germination, growth inhibition, integrated management, pesticides.

RESUMEN GRÁFICO



1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de papa es fundamental en la alimentación humana, por lo que, garantizar su sostenibilidad es un desafío incuestionable (Kroschel et al., 2020; Fedepapa-FNFP, 2022). En Colombia, para el 2023, se sembraron 113 mil hectáreas, produciendo 2,57 millones de toneladas con rendimiento de 22,78 t/ha año, sin embargo, presentó una reducción de 1,69 % en el área sembrada con respecto al 2022, siguiendo con un comportamiento de creciente desde el 2017, cuando se sembraron 132 mil ha (Fedepapa-FNFP, 2023).

Los bajos rendimientos que presenta el cultivo en Colombia se asocian a pequeños y medianos productores, ya que no suelen emplear semilla certificada y presentan un uso

inadecuado de agroquímicos (fertilizantes, fungicidas, bactericidas e insecticidas), particularmente plaguicidas, dado que el cultivo es afectado por diferentes insectos plaga y enfermedades, que afectan principalmente el tubérculo (Fedepapa-FNFP, 2023; Riascos y Arias, 2023).

La distribución geográfica del cultivo lo hace susceptible a plagas como *Phthorimaea operculella* (polilla de la papa), *Symmetrischema tangolias* (polilla andina de la papa), *Tecia solanivora* (polilla guatemalteca de la papa), *Liriomyza huidobrensis* (la mosca minadora), los gorgojos de la papa *Premnotrypes suturicallus*, *Premnotrypes vorax* y *Premnotrypes latithorax*, *Bactericera cocke-*

relli (psílido de la papa), *Prodiplosis longifila* (mosquito de las yemas) y *Tuta absoluta* (minador de la hoja) (Kroschel et al., 2020), que afectan tanto el rendimiento del cultivo como la calidad del tubérculo, requiriendo de la aplicación de diferentes alternativas de control (Chakrabarti et al., 2022).

Igualmente, el cultivo es susceptible a enfermedades, siendo las más limitantes el tizón tardío (*Phytophthora infestans*), la rizoctoniasis o costra negra (*Rhizoctonia solani*), la podredumbre seca del tubérculo (*Fusarium solani*), el tizón temprano (*Alternaria solani*), la mortaja blanca (*Rosellinia* sp.) y la sarna polvosa y camanduleo (*Spongopora subterranea*) (Adolf et al., 2020), además, de al menos siete enfermedades bacterianas causantes de pérdidas considerables, como la pudrición parda y marchitamiento bacteriano (*Ralstonia solanacearum*), sarna común (*Streptomyces* spp.), el pie negro y la pudrición blanda (*Pectobacterium atrosepticum* y *Pectobacterium carotovorum*) (Charkowski et al., 2020).

Tanto plagas como enfermedades se manejan bajo esquemas de aplicación de plaguicidas químicos, lo que dado su uso recurrente puede generar problemas de resistencia,

provocando así un reto mayor dada la necesidad de producir bajo esquemas sostenibles; para esto, la integración de alternativas de control ambientalmente seguras, como los bioplaguicidas a base de microorganismos antagonistas, son un imponderable al momento de desarrollar estrategias de manejo integrado del cultivo (Macena et al., 2019; Asaturova et al., 2021).

En este aspecto, se ha demostrado que las aplicaciones de *Trichoderma koningiopsis* Th003 (ingrediente activo del biofungicida Tricotec® WG) reducen la incidencia de diferentes enfermedades fungosas, entre ellas la rizoctoniasis, con una reducción de la incidencia del 80 % en los tubérculos, además de promover el crecimiento vegetal y el rendimiento del cultivo (Beltrán-Acosta et al., 2011; Singh et al. 2021). De acuerdo con esto y con la necesidad de integrar el control químico y el control biológico en el manejo del cultivo, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto sobre el crecimiento de *T. koningiopsis* Th003 de diferentes fungicidas, insecticidas, bactericidas, desinfectantes, fertilizantes y coadyuvantes, usados en el cultivo de papa, con el fin de generar recomendaciones de uso.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigación Tibaitatá de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Agrosavia.

Microorganismo. Se realizaron cultivos de *T. koningiopsis* Th003 en agar papa dextrosa (PDA) (Oxoid CM0139) incubado a 25 °C, utilizando cultivos de 7 días de edad para determinar el efecto de los agroquími-

cos sobre el crecimiento micelial y de 10 días para el efecto sobre la germinación de los conidios.

Agroquímicos. Se evaluaron 9 insecticidas, 3 fungicidas, 2 bactericidas, 4 desinfectantes, 9 fertilizantes y 2 coadyuvantes agrícolas en la dosis más alta sugerida en la ficha técnica de cada producto (Tablas 1, 2, 3 y 4).

Efecto sobre el crecimiento micelial. Se prepararon cajas de Petri de dimensiones de 90 x 15 mm con agar dextrosa sabouraud

(Scharlau 01-165-500), suplementadas con cada agroquímico, utilizando como control el medio sin adición de agroquímicos. Se dispuso en el centro de cada caja un disco de 5 mm de micelio del hongo tomado del cultivo de 7 días de edad. Las cajas Petri se incubaron durante 120 horas a 25 °C y posterior a esto se realizó la lectura del diámetro de las colonias y se determinó el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (ICM), empleando la fórmula descrita en la ecuación 1.

$$ICM (\%) = \left(\frac{dc - dt}{dc} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

dc = Diámetro de la colonia de *T. koningiopsis* Th003 en las cajas control,

dt = Diámetro de la colonia de *T. koningiopsis* Th003 en las cajas suplementadas con cada agroquímico.

Efecto sobre la germinación de los conidios. De un cultivo del hongo de 10 días de edad se tomaron los conidios, realizando una suspensión en agua estéril a una concentración de 1×10^7 conidios. ml^{-1} , de esta se tomó 1 ml, disponiéndolo en erlenmeyers que contenían soluciones de los agroquímicos, dejándolos en reposo durante una hora a 17 °C, simulando el tiempo que el agroquímico puede permanecer en un equipo de aspersión durante su aplicación. Luego, de cada erlenmeyer se tomaron 100 μL que se transfirieron a cajas Petri con agar agua, es-

parciéndolos sobre su superficie con un ras-trillo Drigalsky, estas se incubaron durante 24 horas a 25 °C, posteriormente de cada caja se cortaron cuadros de agar de 1 cm^2 y de estos se realizó la lectura de los conidios germinados y no germinados, contando de cada uno 100 conidios, considerando su germinación cuando el tubo germinativo fue mayor o igual al 50 % de la longitud del conidio sin germinar (Muy-Rangel et al., 2017). El porcentaje de germinación se determinó empleando la fórmula descrita en la ecuación 2:

$$\text{Germinación (\%)} = \left(\frac{\text{Conidios germinados}}{\text{Conidios totales}} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Diseño experimental y análisis de datos.

Los ensayos se establecieron bajo un diseño experimental completamente al azar, donde la unidad experimental (UE) fue una caja de Petri, contando con 10 repeticiones para la evaluación del crecimiento micelial y de tres

en la evaluación de la germinación de los conidios. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey (95 %) usando el *software* estadístico Statistix 10.0.

Tabla 1.

Insecticidas a los que se les determinó su efecto sobre el crecimiento de *T. koningiopsis* Th003

Principio activo	Dosis
Acefato	0,25 g/L
Bifenthrin	0,25 ml/L
Chlorantraniliprole	1,5 ml/L
Chlorfenapyr	0,75 ml/L
Fentoato	0,7 ml/L
Fipronil	3 ml/L
Lambda-cicalotrina-Tiametoxam	0,83 ml/L
Methomyl	2 g/L
Thiamethoxam-Chlorantraniliprole	1,4 ml/L

Fuente: adaptada de las fichas técnicas de los productos comerciales.

Tabla 2.

Desinfectantes, bactericidas y fungicidas a los que se les determinó su efecto sobre el crecimiento de *T. koningiopsis* Th003

Principio activo	Dosis
Ácido oxolínico	1,25 g/L
Azoxystrobin-Mancozeb	10 g/L
Clorhidrato de oxitetraciclina-oxicloruro de cobre	1 g/L
Complejo yodo polietoxi - polipropoxi polietoxi etanol - ácido yodhídrico	3 ml/L

Principio activo	Dosis
N-Alquil bencil amino clorado Ácido oxolínico Yodo agrícola Extracto de semilla de toronja Hidróxido de cobre	2,5 ml/L
Pyraclostrobin - fluxapyroxad	0,375 ml/L
Sulfato de gentamicina expresado como gentamicina - clorhidrato de oxitetraciclina	1,2 g/L
Thiophanate-methyl	1,5 ml/L
Cloruro de benzalconio – surfactantes	20 ml/L

Fuente: adaptada de las fichas técnicas de los productos evaluados.

Tabla 3.

Fertilizantes a los que se les determinó su efecto sobre el crecimiento de *T. koningsiopsis* Th003

Principio activo	Dosis
Etanolamina de boro ($C_2H_8BNO_3$)	10 ml/L
Extractos orgánicos (P-K)	6 g/L
Zn	3,75 g/L
NPK 42-3-3	7,5 g/L
Ácidos carboxílicos; aminoácidos; péptidos 14,0 %; (N)0,70 %; (P_2O_5) 0,8 %; (K_2O)1,3 %; (Fe)0,22 %; (Cu)0,06 %; (Mn)0,15 %; (Zn)0,20 %.	2,5 ml/L
B 0,55 %+Fe 5 %+Mn 2,9 %;(B-Cu-Fe-Mn-Mo-Zn)	10 ml/L
(Ca)7 %; (N)4 %; (P)14 %; (Ca)7 %	10 ml/L
Polisacáridos, ácido algínico, manitol, citoquininas (400 ppm), (P_2O_5 -K)	10 ml/L
(MgO)	10 ml/L

Fuente: adaptada de las fichas técnicas de los productos evaluados.

Tabla 4.

Coadyuvantes a los que se les determinó su efecto sobre el crecimiento de *T. koningiopsis* Th003.

Nombre comercial	Composición	Dosis
SILICROP® E.C	Silicato de potasio	0,175 ml/L
COSMO-IN d°	Alcohol etoxilado-polyoxiethylene alkyl ether	2 ml/L

Fuente: adaptada de las fichas técnicas de los productos comerciales.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La exposición de *T. koningiopsis* Th003 a los agroquímicos mostró tolerancia y un efecto negativo para otros. Los insecticidas acefato, bifenthrin, chlorantraniliprole, chlorfenapyr, lambda-cyhalotrina-tiametoxan, methomyl, thiamethoxan-chlorantraniliprole y fipronil generaron una inhibición del crecimiento micelial inferior a 1,4 %, y la exposición al insecticida fentoato presentó diferencias estadísticamente significativas frente a los otros tratamientos con una inhibición del 46,7 % (Figura 1a), mientras que la germinación de conidios presentó una media del 98 % en presencia de todos los insecticidas (Figura 1b). Efectos similares se observaron con cipermetrina y lambda-cyhalotrina, los cuales inhibieron el crecimiento micelial entre el 25,3 % y 20,4 % de *Trichoderma harzianum* A34, pero permitieron una germinación de conidios del 100 % (Castellanos-González et al., 2015). Mendarte-Alquisira et al. (2024) identificaron diez cepas de *Trichoderma* sp. con capacidad de tolerar concentraciones de 50, 100 y 150 ppm del insecticida H24°,

compuesto por piretroides, en los cuales se observó crecimiento micelial posterior a un periodo de adaptación de 24 horas e identificaron que el crecimiento diametral disminuía al aumentar la concentración del insecticida. Zapata-Narváez y Botina-Azaín (2023) observaron una reducción del 44 % en el crecimiento micelial de *T. koningiopsis* Th003 en presencia de malation y una inhibición del 23 % con los insecticidas beta-cyuthrin-lmidacloprid y permeterina, sin observar inhibición de la germinación de conidios.

Algunos estudios han reportado mecanismos de adaptación y degradación de pesticidas en especies del género *Trichoderma* que le permiten tolerar la exposición a los agroquímicos (Mendarte-Alquisira et al., 2024), encontrando por ejemplo la presencia de genes que permiten sintetizar proteínas y enzimas que los hidrolizan o participar en la liberación de metabolitos específicos que permiten su adaptación a condiciones adversas, como la presencia de sustancias tóxi-

cas, relacionadas con el metabolismo energético, transporte, transducción de señales y

tolerancia al estrés (Tang et al., 2010 y Bose et al., 2021).

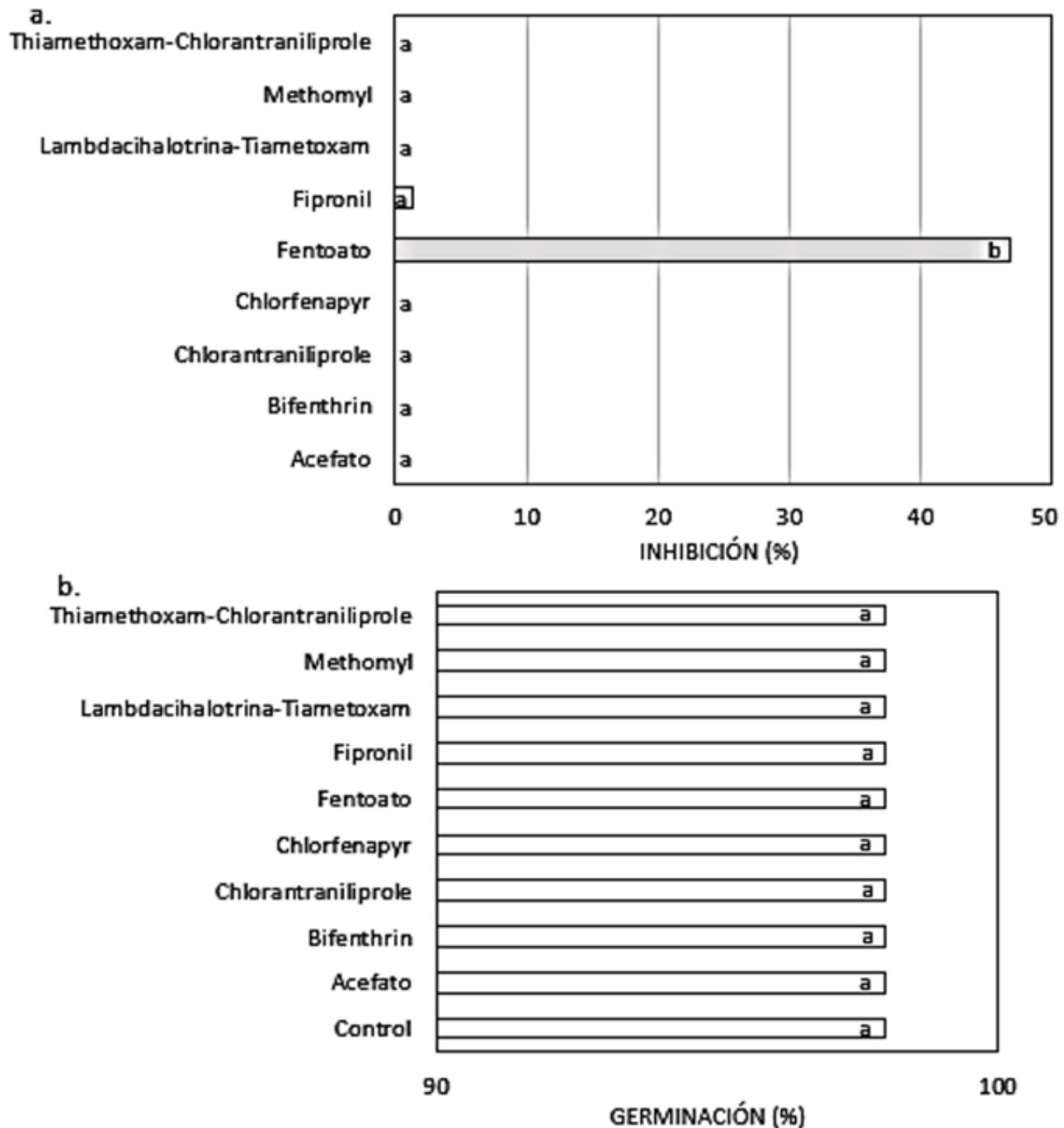


Figura 1. a. Inhibición del crecimiento micelial y b. Germinación de conidios de *T. koningspisis* Th003 expuestos a insecticidas. Filas con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de Tukey 95 %.

Fuente: autores.

Con respecto a los fungicidas, bactericidas y desinfectantes, no se observó inhibición del crecimiento micelial ni diferencias significativas entre clorhidrato de oxite-traciclina-oxicloruro de cobre, sulfato de gentamicina y el ácido oxolínico, mientras que, el complejo de yodo y pyraclostrobin-fluxapyroxad inhibieron el crecimiento hasta en 50 %, en tanto que, al exponerse a azoxystrobin-mancozeb, cloruro de benzalconio-surfactantes y thiophanate-methyl, la inhibición fue del 57 % y 69 % (Figura 2a). La germinación de conidios expuestos a n-alquil bencil fue similar al control, pero con los demás tratamientos se observaron diferencias significativas. Los conidios expuestos a oxite-traciclina-oxicloruro de cobre, pyraclostrobin-fluxapyroxad, thiophanate-methyl, sulfato de gentamicina y el ácido oxolínico germinaron entre un 49 % y un 84 %, mientras que en azoxystrobin-mancozeb y los desinfectantes complejo de yodo y cloruro de benzalconio-surfactantes la germinación fue menor al 12 % (Figura 2b).

Diferentes estudios muestran la tolerancia de *Trichoderma* spp., a fungicidas y desinfectantes. Parraguirre-Lezama et al., (2025), Singh et al., (2020) y Elshahawy et al., (2016) observaron tolerancia de *Trichoderma* spp., a thiophanate-methyl, mancozeb, metalaxyl M-mancozeb, pencycuron y flutolanol en

concentraciones de 50 a 800 ppm; sin embargo, con carbendazim y thiram-tolclofos-methyl se identificó incompatibilidad del 100 % con carbendazim y thiram-tolclofos-methyl. Franco da Silva et al. (2018) reportaron crecimiento del 100 % de *T. asperellum* (IBLF897, IBLF904 y IBLF914) y *T. viridae* (IBLF908) en presencia de imidacloprid, pencycuron y mandipropamid en concentraciones de 0,1 a 100 µg/L y una inhibición de la germinación de conidios del 100 % con 10 µg/L de azoxystrobin. Parraguirre-Lezama et al. (2025) reportaron que *T. harzianum*, *T. hamatum*, *T. koningiopsis* y *T. asperellum* presentaron una compatibilidad global del 60,04 % con fungicidas de captan y clorotalonil en concentraciones de 50, 900 y 1350 mg/L y Mancozeb a 600, 1200 y 1800 mg/L, teniendo en cuenta el crecimiento micelial y la capacidad de esporulación del hongo en contacto con los fungicidas. Con respecto a los desinfectantes basados en amonios cuaternarios, Karbowska-Berent et al. (2011) observaron una inhibición inferior al 65 % en conidios de *Trichoderma pseudokoningii*. En cuanto a los desinfectantes que involucran yodo como componente químico, Tomkins (1934) observó el efecto de inhibición de crecimiento de micelio y germinación de esporas en especies del género *Trichoderma* spp.

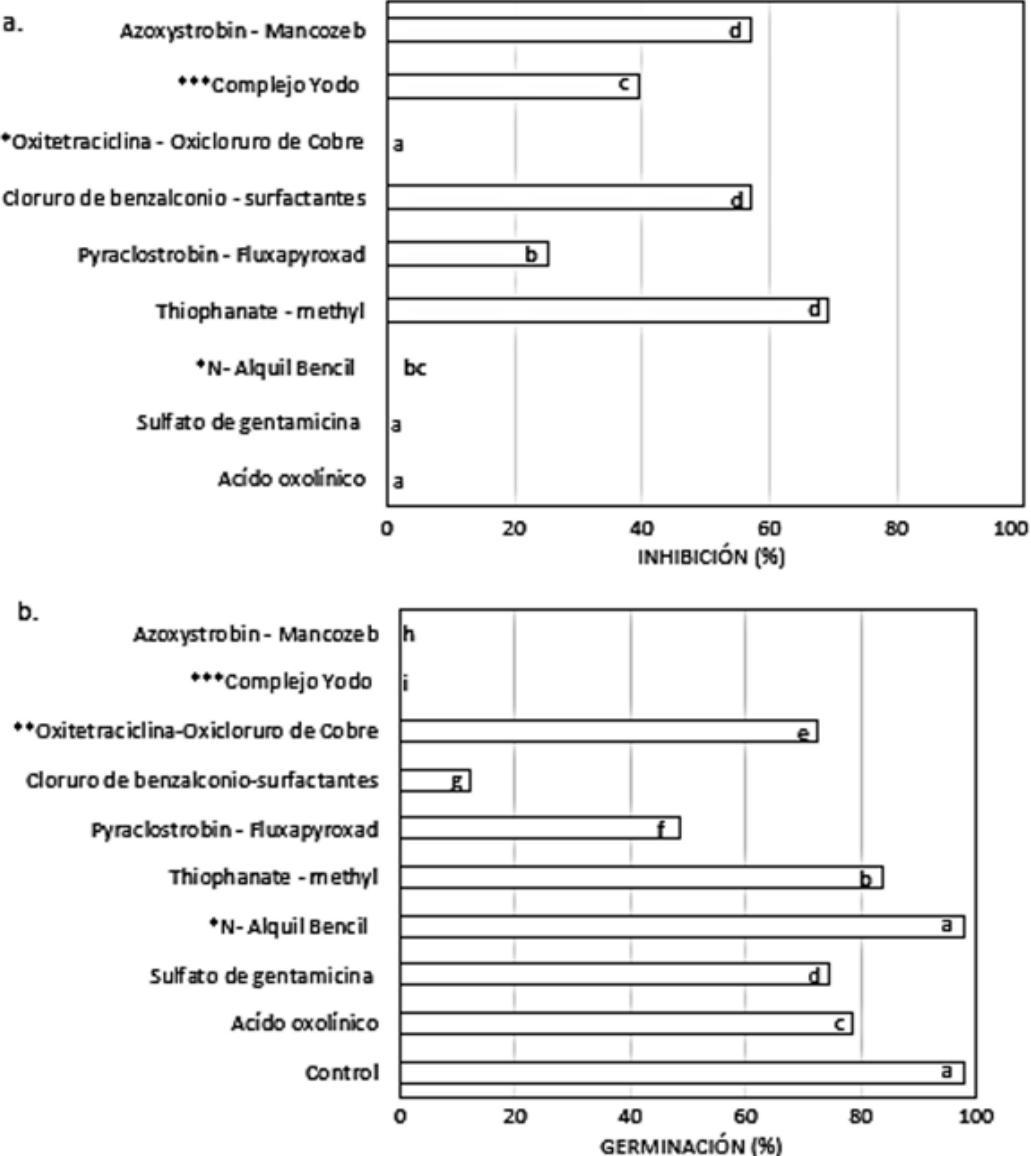


Figura 2. a. Inhibición del crecimiento micelial y b. Germinación de conidios de *T. koningiopsis* Th003 expuestos a fungicidas, bactericidas y desinfectantes. Filas con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de Tukey 95 %.

Fuente: autores.

Respecto a los coadyuvantes, inhibieron el crecimiento micelial entre 31 % y 84 % con diferencias estadísticamente significativas (Figura 3a), pero ninguno inhibió la germinación de conidios, presentando valores similares al control (Figura 3b). Algunos coadyuvantes no inhiben la germinación de conidios de *Trichoderma* spp. Zapata-Narváez y Botina-Azaín (2023) observaron que el exponer a *T. koningiopsis* Th003 a los coadyuvantes MD Redux, Hipotensor Sys, Inex A°, Fluyex°, Carrier°, Bioplant° y Agrotin° SL,

la germinación media obtenida fue de 93 % y el crecimiento micelial fue hasta de un 70 %, con excepción de Carrier°, el cual no lo inhibió. Igualmente, Whelan (2021) observó la inhibición del crecimiento micelial entre el 25 % y el 52 % con coadyuvantes tipo polietiléter modificado con polisiloxano como Agpro Green Organosilicona, Agpro Organosilicona y Penatra, pero no observó inhibición de la germinación de conidios de *T. harzianum*, *T. atrobrunneum*, *T. artroviride* y *T. crassum*.

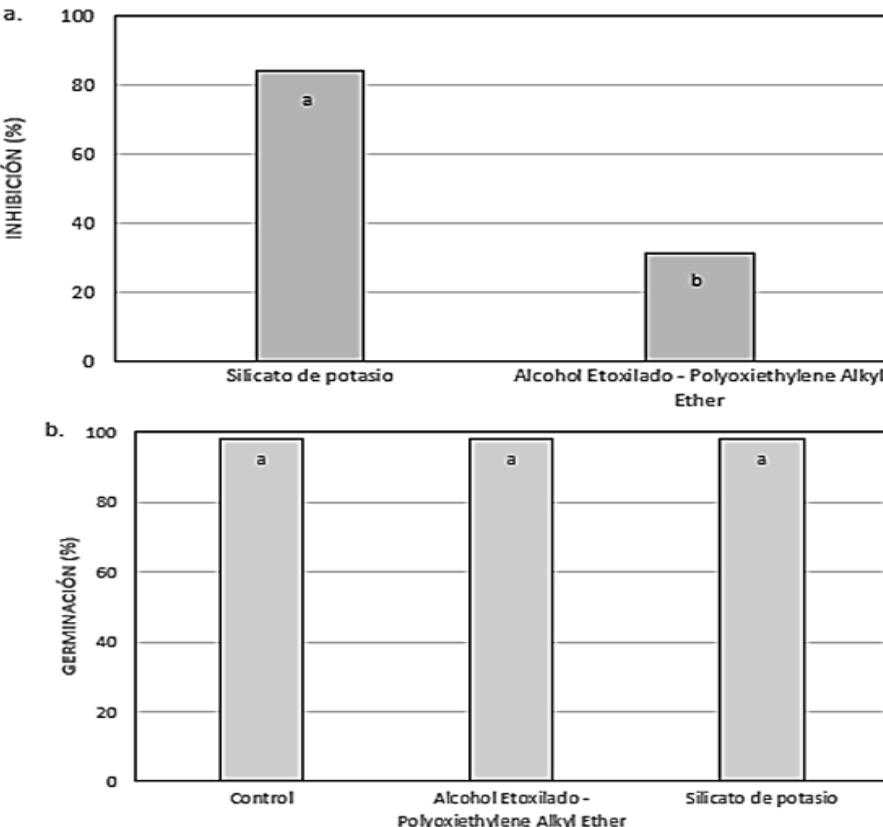


Figura 3. a. Inhibición del crecimiento micelial y b. Germinación de conidios de *T. koningiopsis* Th003 expuestos a coadyuvantes. Filas con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de Tukey 95 %.

Fuente: autores.

Acerca de los fertilizantes, el crecimiento micelial fue inhibido en un 22 % y 55 % para magnesio y etanolamina de boro, respectivamente; estos fertilizantes fueron los que presentaron diferencias estadísticamente significativas, en comparación con los que contenían fósforo-potasio, zinc, NPK simple, NPK suplementado, boro-cobre-hierro-manganoso-molibdeno-zinc, calcio-nitrógeno-fósforo, los cuales no mostraron inhibición (Figura 4a). En relación con la germinación de los conidios, esta fue superior al 92 %, excepto a los expuestos a magnesio, la cual fue del 66 % (Figura 4b).

Resultados similares fueron obtenidos por Whelan (2021) al evaluar fertilizantes base macro y micronutrientes como Agpro Sprayable Boron (octaborato de disodio tetrahidratado 21 %), Nitrophoska Extra (12 % N,

5,2 % P, 14,1 % de K₂SO₄, S 8 %, Mg 1,2 %, Ca 3,8 %, Fe 0,4 %, Br 0,02 % y Zn 0,01 %), Grochem Trace-it Magnesium (8 % de N y 9 % Mg), Agrisea Foliar (minerales y elementos traza, vitaminas, citoquininas y auxinas, manitol, florotaninos y carbono orgánico) y Ravensdown Cropmaster DAP (17,5 % N, 20 % P y 1 % S) que no inhibieron la germinación de conidios de *T. harzianum*, *T. atrobrunneum*, *T. artroviride* y *T. crassum*, obteniendo un 95 %. Los macro y micronutrientes que componen los fertilizantes pueden favorecer el crecimiento micelial y la esporulación de especies de *Trichoderma* (Khattabi et al., 2004; Dłużniewska , 2008; Rodríguez-Guerra et al., 2020); sin embargo, aquellos que incluyen altas concentraciones de metales pueden ser tóxicos, afectando su crecimiento y la germinación de conidios (Whelan, 2021).

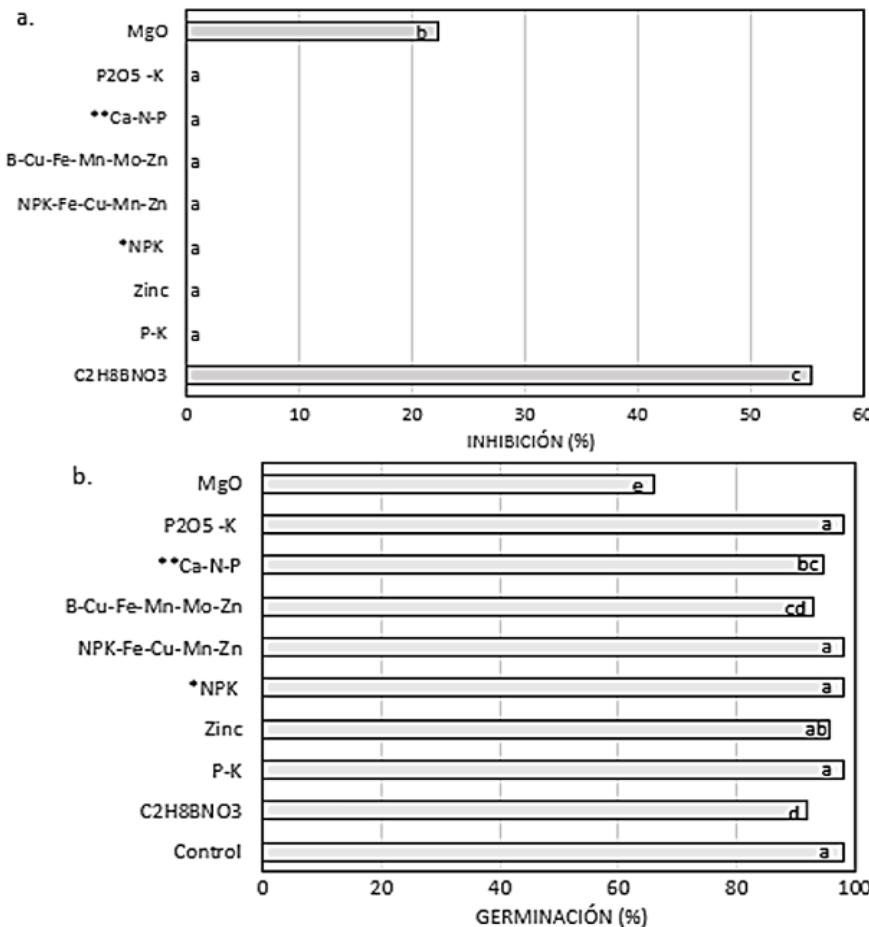


Figura 4. a. Inhibición del crecimiento micelial y b. Germinación de conidios de *T. koningiopsis* Th003 expuestos a fertilizantes. Filas con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de Tukey 95 %.

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

La exposición a pyraclostrobin-fluoxapyroxad, cloruro de benzalconio, complejo yodo y azoxystrobin-mancozeb, afectó negativamente el crecimiento micelial y la germinación de los conidios de *T. koningiopsis* (Th003), por lo cual su uso debe realizarse de forma alternada con el bioplaguicida, para esto debe monitorearse la sanidad del

cultivo para determinar la alternativa que se va a emplear. De otra parte, los agroquímicos que no inhibieron el crecimiento del hongo o la germinación de sus conidios pueden usarse con el bioplaguicida; no obstante, se recomienda monitorear la población del hongo en la filosfera o suelo y así establecer frecuencias de aplicación.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: desarrollo de ensayos, redacción y edición.

Autor 2: desarrollo de ensayos, redacción y edición.

Autor 3: conceptualización, desarrollo de ensayos, análisis estadístico de datos, redacción y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Agrosavia, por la financiación del

proyecto “Ajuste y optimización de bioproductos fase V”, que permitió el desarrollo de este trabajo.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Adolf, B., Andrade-Piedra, J., Bittara, F., Przetakiewicz, J., Hausladen, H., Kromann, P., Lees, A., Lindqvist-Kreuze, H., Perez, W. & Secor, G. A. (2020). Fungal, Oomycete, and Plasmodiophorid Diseases of Potato. In: Campos, H., Ortiz, O. (eds). The Potato Crop. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_9

Asaturova, A., Shternshis, M., Tsvetkova, V., Shpatova, T., Maslennikova, V., Zhevnova, N. & Homyak, A. (2021). Biological control of important fungal diseases of potato and raspberry by two *Bacillus velezensis* strains. *PeerJ* 9:e11578. <https://doi.org/10.7717/peerj.11578>

Beltrán-Acosta, C. R., Moreno-Velandia, C. A. y Cotes-Prado, A. M. (2011). *Trichoderma koningiopsis* Th003, alternativa

biológica para el control de *Rhizoctonia solani* en el cultivo de papa. *Fondo Nacional de Fomento de la Papa*. <https://hdl.handle.net/20.500.14460/11>

Bose, S., Kumar, P. S. & Vo, D-V.N. (2021). A Review on the Microbial Degradation of Chlorpyrifos and Its Metabolite TCP. *Chemosphere*, 283, 131447. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131447>

Castellanos-González, L., Lorenzo-Nicao, M.E., Lina-Muño, B., Hernández-Pérez, R., y Guillen-Sánchez, D. (2015). Efecto *in vitro* de plaguicidas comerciales sobre *Trichoderma harzianum* cepa A-34. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 47(2), 185-196. <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382842590014.pdf>

Chakrabarti, S. K., Sharma, S. & Shah, M. A. (2022). Potato Pests and Diseases: A Global Perspective. In: Chakrabarti, S.K., Sharma, S., Shah, M.A. (eds) Sustainable Management of Potato Pests and Diseases. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7695-6_1

Charkowski, A., Sharma, K., Parker, M.L., Secor, G.A. & Elphinstone, J. (2020). Bacterial Diseases of Potato. In: Campos, H., Ortiz, O. (eds) The Potato Crop. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_10

Dłużniewska, J. (2008). The effect of foliar fertilizers on the development and activity of *Trichoderma* spp. *Polish Journal of Environment Studies*, 17, 869-874. <https://www.pjoes.com/The-Effect-of-Foliar-Fertilizers-on-the-Development-r-nand-Activity-of-Trichoderma,88180,0,2.html>

Elshahawy, I.E., Haggag, K.H. & Abd-El-Khair, H. (2016). Compatibility of *Trichoderma* spp. with seven chemical fungicides used in the control of soil borne plant pathogens. *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences*, 7(1), 1772-1785. https://www.researchgate.net/publication/292462692_Compatibility_of_Trichoderma_spp_with_seven_chemical_fungicides_used_in_the_control_of_soil_borne_plant_pathogens

Fedepapa-FNFP. (2022). El cultivo de la papa: factores que influyen en la productividad. *Cartilla técnica*, 2. <https://repositorio.fedepapa.com/handle/20.500.14460/52#>

Fedepapa-FNFP. (2023). Estadísticas sectoriales. <https://observatoriofnfp.com/home/>

Franco da Silva, M. A., de Moura, K. E., de Moura, K. E., Salomão, D. & Rodrigues Alves F. (2018). Compatibility of *Trichoderma* isolates with pesticides used in lettuce crop. *Summa Phytopathologica*, 44(2), 137-142. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/176873>

Karbowska-Berent, J., Kozielec, T., Jarząbko, J. & Brycki, B. (2011). Possible application of quaternary ammonium salts for disinfection of paper-based objects. *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*, 32(3), 2011, 223-246. <https://doi.org/10.1515/rest.2011.011>

Khattabi, N., Ezzahiri, B., Louali, L. & Oihabi, A. (2004). Effect of nitrogen fertilizers and *Trichoderma harzianum* on *Sclerotium rolfsii*. *Agronomie*, 24(5), 281-288. <https://hal.science/hal-00885994v1>

Kroschel, J., Mujica, N., Okonya, J. & Alyokhin, A. (2020). Insect pests affecting potatoes in tropical, subtropical, and temperate regions. In: Campos, H., Ortiz, O. (eds) The Potato Crop. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_8

Macena, A. M. F., Kobori, N.N., Mascarin, G. M., Vida, J. B. & Hartman, G. L. (2019). Antagonism of *Trichoderma*-based bio-fungicides against Brazilian and North American isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* and growth promotion of soybean.

BioControl. 65, 235-246. <https://doi.org/10.1007/s10526-019-09976-8>

Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A. & Ferreira-Cerrato, R. (2024). Growth, tolerance, and enzyme activities of *Trichoderma* strains in culture media added with a pyrethroids-based insecticide. *Revista Argentina de Microbiología*, 56(1), 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.004>

Muy-Rangel, M.D., Osuna-Valle, J.R., García-Estrada, R.S., San Martín-Hernández, C. & Quintana-Obregón, E.A. (2017). *In vitro* antifungal activity of garlic essential oil (*Allium sativum* L.) against *Alternaria tenuissima*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(1), 162-171. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1708-3>

Parraguirre-Lezama C, Romero-Arenas O, Cruz CA, Mauricio-Gutiérrez A, et al., 2025. Toxicidad de fungicidas de contacto en cuatro especies de *Trichoderma*, un enfoque de compatibilidad *in vitro*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 43(1), 46. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2402-7>

Riascos, S. y Arias, N. (2023). El impacto del uso de semilla certificada en la competitividad y la rentabilidad del cultivo de papa. *Revista papa*, 57, 40-43.

Rodríguez-Guerra, R., Armijo-Martínez, L. F. y López-Arroyo, J. I. (2020). Inducción de la germinación de conidios de los hongos entomopatógenos *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* y el mico-parásito *Trichoderma harzianum*. *Bio-*

tecnología y Sustentabilidad, 5(1), 48-61. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiasust.v5i1.927>

Singh, R., Tomer, A., Prasad, D., & Viswanath, H. S. (2020). Biodiversity of *Trichoderma* species in different agro-ecological habitats. In: Manoharachary, C., Singh, H.B., Varma, A. (eds) *Trichoderma: Agricultural Applications and Beyond*. *Soil Biology*, 61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54758-5_2

Tang, J., Liu, L., Huang, X., Li, Y., Chen, Y. & Chen, J. (2010). Proteomic analysis of *Trichoderma atroviride* mycelia stressed by organophosphate pesticide dichlorvos. *Canadian Journal of Microbiology*, 56(2), 121-127. <https://doi.org/10.1139/W09-110>

Tomkins, R. G. (1934). Iodized Wraps for the Prevention of Rotting of Fruit. *Journal of Pomology and Horticultural Science*, 12(4), 311-320. <https://doi.org/10.1080/03683621.1934.11513439>

Whelan, H. (2021). Tolerance of *Trichoderma* isolates to forestry agrochemicals. *Bio-Protection Research Centre*. <https://researcharchive.lincoln.ac.nz/entities/publication/4e539c3a-cd2e-4115-b16f-47fb948577b1>

Zapata-Narváez, Y. A. & Botina-Azain, B. L. 2023. Effect of adjuvants, fungicides and insecticides on the growth of *Trichoderma koningiopsis* Th003. *Mexican Journal of Phytopathology*, 41(3): 412-433. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2305-1>



Conflictos de intereses

*Los autores declaran no tener
ningún conflicto de intereses.*



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons
Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



INFLUENCIA DE LA REGIÓN Y TOSTIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DE CAFÉS COLOMBIANOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

INFLUENCE OF THE REGION AND ROASTING IN THE IDENTIFICATION OF FUNCTIONAL GROUPS OF COLOMBIAN COFFEES BY INFRARED SPECTROSCOPY

Diego Enrique Ochoa Florez ¹

Daniel Salvador Durán Osorio ²

Yanine Yubisay Trujillo Navarro ³

Citación: Ochoa Flórez, D. E., Durán Osorio, D. S., Trujillo Navarro, Y. Y. (2026). Influencia de la región y tostión en la identificación de grupos funcionales de cafés colombianos mediante espectroscopía infrarroja. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 73- 95. <https://doi.org/10.22490/21456453.9358>

¹ Doctorando en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. diego.ochoa12@unipamplona.edu.co

² Doctor en Tecnología, Calidad y Marketing en Industrias Agroalimentarias, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. daniel.duran@unipamplona.edu.co

³ Doctor en Tecnología, Calidad y Marketing en Industrias Agroalimentarias, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. yaninetrujillo@unipamplona.edu.co

Autor de correspondencia: diego.ochoa12@unipamplona.edu.co

RESUMEN

Contextualización: El café es uno de los frutos de mayor riqueza funcional y bioactiva. Sin embargo, condiciones como la región de cultivo, manejo poscosecha y calidad del tueste pueden afectar la composición e identificación de grupos funcionales.

Vacío de conocimiento: Actualmente, es incierto cómo afectan la tostión y la región en la presencia de grupos funcionales que se puedan asociar con la presencia de compuestos bioactivos específicos en el grano, por lo cual, las técnicas de espectrofotometría infrarroja surgen como las metodologías de análisis rápido y presuntivo de calidad cafetera.

Propósito: El objetivo de investigación fue evaluar la influencia de la región y tostión en la identificación de grupos funcionales de cafés colombianos analizados mediante espectroscopía infrarroja y quimiometría.

Metodología: Se emplearon cafés colombianos variedad arábica de diferente grado de tostión y región según su tostión: tostión suave (Cauca, Tolima y Nariño), tostión balanceada (Huila, Antioquia y Santander) y tostión fuerte (Caldas, Valle del Cauca y Sierra Nevada). Los cafés fueron analizados mediante espectroscopía infrarroja por reflectancia total atenuada de 4000 a 600 cm^{-1} .

Resultados y conclusiones: De los espectros se identificaron 14 bandas con grupos funcionales de interés que relacionan la presencia de compuestos químicos. Dentro de estos se encontraron alcoholes, anillos aromáticos, cafeína, lípidos, aldehídos, ésteres, ácidos orgánicos (clorogénico), trigonelina, ácidos alifáticos y carbohidratos. De la influencia de la tostión y la región sobre la presencia de grupos funcionales, los cafés de Cauca (tostión suave), Santander (tostión balanceada) y Caldas (tostión fuerte) fueron los de mayor vibración en los 14 picos encontrados en relación con sus homónimos. Sin embargo, el análisis de componentes principales arrojó que los cafés de tostión suave (Tolima, Nariño y Cauca) y tostión fuerte (Caldas) fueron los de mayor influencia sobre los compuestos asociados a los grupos funcionales encontrados, siendo Cauca y Caldas los predominantes en los grupos funcionales, indicando que la región y la tostión afectan significativamente la presencia de grupos funcionales y la composición interna del grano.

Palabras clave: ART-FTIR, café, espectroscopía infrarroja, grupos funcionales, quimiometría, tostión.

ABSTRACT

Contextualization: coffee is one of the fruits with the greatest functional and bioactive richness. However, conditions such as the growing region, post-harvest management and roast quality can affect the composition and identification of functional groups.

Knowledge gap: Currently, it is uncertain how roasting, and region affect the presence of functional groups that can be associated with the presence of specific bioactive compounds in the grain. Therefore, infrared spectrophotometry techniques emerge as the methodologies for rapid and presumptive analysis of coffee quality.

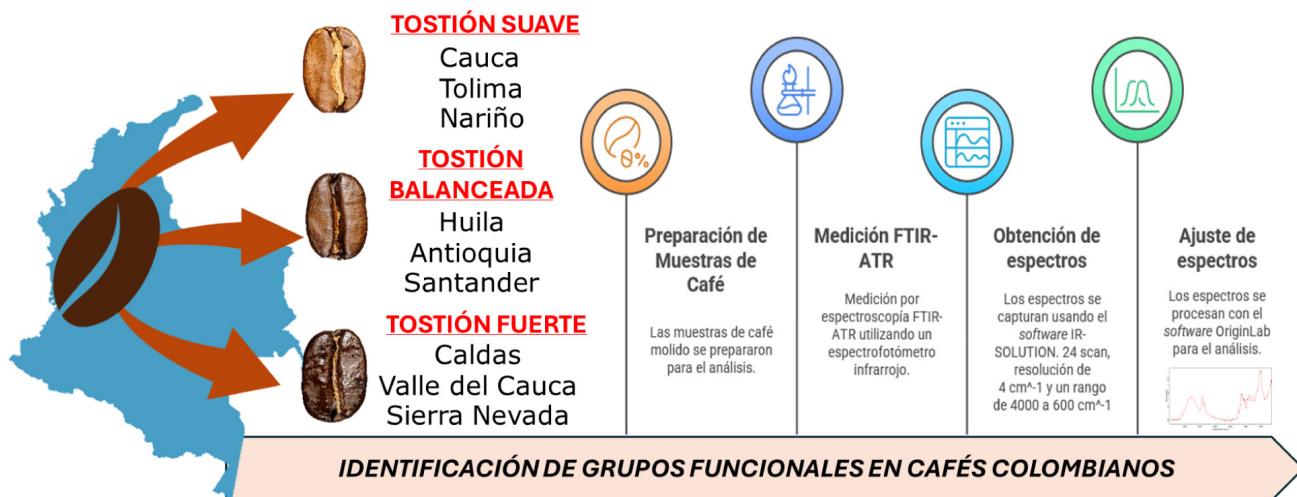
Purpose: objective of the research was to evaluate the influence of the region and roasting in the identification of functional groups of Colombian coffees analysed by infrared spectroscopy and chemometrics.

Methodology: Colombian Arabica coffees of different degrees of roast and region were used according to mild roast (Cauca, Tolima, and Nariño), balanced roast (Huila, Antioquia and Santander) and strong roast (Caldas, Valle del Cauca and Sierra Nevada). The browns were analyzed by attenuated total reflectance infrared spectroscopy from 4000 a 600 cm^{-1} .

Results and conclusions: of the spectra, 14 bands were identified with functional groups of interest that relate the presence of chemical compounds. Among these were found alcohols, aromatic rings, caffeine, lipids, aldehydes, esters, organic acids (chlorogenic), trigonelline, aliphatic acids and carbohydrates. Of the influence of roasting and region on the presence of functional groups, the coffees of Cauca (mild roasting), Santander (balanced roasting) and Caldas (strong roasting) were the ones with the highest vibration in the 14 peaks found in relation to their homonyms. However, the principal component analysis showed that mild roast coffees (Tolima, Nariño and Cauca) and Caldas in strong roasting were the ones with the greatest influence on the compounds associated with the functional groups found. Cauca and Caldas are the predominant in the functional groups, indicating that the region and the roasting significantly affect the presence of functional groups and the internal composition of the grain.

Keywords: ART-FTIR, coffee, infrared spectroscopy, functional groups, chemometrics, roasting.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: elaboración propia

1 INTRODUCCIÓN

El café arábico (*Coffea arabica L.*), cultivado principalmente en las regiones montañosas del norte de Tailandia, se ha convertido en una de las especies de café comerciales más conocidas (Preedalikit et al., 2023). Por su parte, regiones como Etiopía es una de las regiones productoras de café más grandes de África. En Etiopía, el café representa entre el 60 % y el 70 % de los ingresos nacionales en divisas y el sustento de alrededor del 20 % al 25 % de la población, directa o indirectamente (Tadesse et al., 2020). Sin embargo, Colombia es el tercer país mayor productor de café, seguido por Brasil y Vietnam (Rojas-Ospina et al., 2024).

Actualmente, este fruto genera alta atención, ya que su calidad se ve afectada según la región de origen y manejo poscosecha (Cortés-Macías et al., 2022). Dentro de los

parámetros de calidad cafetera, la presencia de grupos funcionales que relacionen compuestos químicos es un indicador de calidad, asociado a la región de cultivo y condiciones de procesamiento como el tostado (Kungsawan et al., 2023; Wołosiak et al., 2023). El café tiene muchos compuestos que impulsan el aroma y el sabor del café preparado. Los alcaloides, proteínas, polisacáridos poliméricos, cafeína, ácidos, lípidos y carbohidratos (sacarosa, glucosa, fructosa) añaden características sensoriales a la bebida. Algunos estudios reportan que la composición cambia entre especies de café y también antes y después del proceso de tueste (Mendes dos Santos et al., 2021). La pulpa de la cereza del café variedad arábica es abundante en cafeína y polifenoles, siendo el ácido clorogénico el principal compuesto fenólico (Nemzer et al., 2021a).

Recientes estudios en la identificación de perfiles de fitoquímicos en *C. arábica* identificó hasta 219 compuestos, compuestos por isómeros de ácidos clorogénicos (CGA), flavonoides, alcaloides, eicosanoil-5-hidroxytriptamida (EHT), atractiligenina y derivados de carboxiatractiligenina (Nemzer et al., 2021b). También se han identificado otros compuestos, aunque en cantidades menores, a saber: trigonelina, teobromina, teofilina, ácido protocatequiico, ácido gálico, quercentina, catequina, epicatequina, procianidina y rutina (Castaldo et al., 2020). A continuación, se abarcan los principales compuestos bioactivos del café y su interés en la industria alimentaria.

El ácido clorogénico tiene una alta bio-disponibilidad entre los humanos y muestra una variedad de funciones biológicas importantes que incluyen efectos antioxidantes y antiinflamatorios, antimutagénicos, anticancerígenos y protectores del daño del ADN (Preedalikit et al., 2023). Los diterpenos se describen como alcoholes pentacílicos, debido a la fusión de unidades de isopreno para formar un esqueleto de veinte carbonos de kauren. Kahweol y cafestol son los dos principales diterpenos que se han aislado de granos, infusiones y aceites de café verde y tostado (Munyendo et al., 2021). Debido a sus complejidades biológicas y de procesamiento, el café tiene una matriz muy compleja que complica su análisis volátil. La diversidad de componentes de la matriz del café (por ejemplo, carbohidratos y lípidos) y otros compuestos no volátiles (por ejemplo, trigonelina y melanoidinas) requie-

re procedimientos de limpieza sustanciales para reducir el ruido de fondo analítico y el desgaste de la máquina sin comprometer la recuperación de compuestos volátiles de interés (Marín-San Román et al., 2020).

De otra parte, se relaciona que las condiciones de procesamiento del café afectan la composición de material volátil durante su preparación, y varios estudios documentan el impacto de los métodos de preparación del café, como el tostado en la liberación de aromas (Barron et al., 2012; Itobe et al., 2015). Finalmente, dentro de los compuestos de mayor interés, la cafeína tiene la capacidad de prevenir el estrés oxidativo, dada su alta capacidad antioxidante pero voluble según el origen y condiciones de tueste (Preedalikit et al., 2023).

En relación con los anterior, la identificación de grupos funcionales mediante espektrofotometría infrarroja ha permitido la clasificación de nuevos cafés (Baqueña et al., 2023), la evaluación de compuestos sensoriales (Belchior et al., 2019) y la identificación de granos defectuosos (Craig et al., 2012). Sin embargo, esta técnica ha incursionado en la identificación presuntiva de compuestos que permitan establecer la calidad interna y composición bioactiva del grano (Maiyah et al., 2025). Por lo anterior, el objetivo de investigación fue evaluar la influencia de la región y tostión en la identificación de grupos funcionales de cafés colombianos analizados mediante espectroscopía infrarroja (ATR-FTIR) y quimiometría.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de los cafés de estudio

Se emplearon cafés variedad arábica colombianos de diferentes regiones de origen y grados de tostión ya especificado y estandarizado por una casa comercial, la cual establece la denominación de los cafés y su grado de tostión. Las muestras de café fueron agrupadas según su tostión y origen así: tostión suave (Cauca, Tolima y Nariño), tostión balanceada (Huila, Antioquia y Santander) y tostión fuerte (Caldas, Valle del Cauca y Sierra Nevada). Dentro de los criterios de selección se tuvieron en cuenta las regiones de mayor producción cafetera según lo reportado por MinAgricultura (2022). Estos cafés fueron adquiridos de una casa comercial colombiana en tres presentaciones con loteado distinto para garantizar el muestreo y fueron llevados a las instalaciones del laboratorio de investigaciones del grupo de Bioingeniería Alimentaria de la Universidad de Pamplona, Colombia.

Análisis espectroscópico (FTIR - ATR) y quimiométrico

El análisis espectroscópico FTIR se realizó por ATR (reflectancia total atenuada) (Manrique y Gutiérrez, 2018), empleando un espectrofotómetro infrarrojo (marca Thermo Scientific, modelo NICOLET iS150-FT-IR, y el accesorio ATR PIKE MIRacle con cristal de diamante). El análisis se realizó por triplicado a $20 \pm 0,5$ °C y 70 % HR; posteriormente,

se dispuso cada muestra de café molido en el cristal para su medición con la realización previa de *background* con el fin de eliminar el ruido por el medio. La obtención de los espectros se realizó mediante el *software* IR-SOLUTION a 24 scan, resolución de 4 cm^{-1} y un rango de 4000 a 600 cm^{-1} (Masek et al., 2020; Tsiaka et al., 2023). Con respecto al análisis quimiométrico, los espectros obtenidos fueron ajustados mediante el *software* OriginLab, realizando suavizado, ajuste de línea base y normalizado (Baque-ta et al., 2023; Belchior et al., 2019; Ni et al., 2022).

Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico de las absorbancias de los picos asociados a grupos funcionales fue realizado mediante el paquete estadístico Minitab Statistical Software, realizando análisis descriptivo anova de un factor con prueba de comparaciones de Fisher con un nivel de confianza del 95 %. Posteriormente, se realizó un análisis de componentes principales, determinando la influencia de los grupos funcionales asociados a compuestos específicos en las muestras de café, según su grado de tostión. En complemento al análisis de componentes principales, se realizó un análisis factorial por medio de la medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), estableciendo factores de mancomunidad para la selección de componentes principales por el criterio de raíz latente (valores propios o eigenvalores $> 1,0$). Finalmente, se determinó el porcentaje de similitud espec-

troscópico de las muestras mediante análisis de conglomerado elaborado a partir de

las absorbancias de los grupos funcionales identificados

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ánalysis espectroscópico vibracional e identificación de grupos funcionales

En la figura 1 se observan las características espectroscópicas de los cafés de región

según su grado de tostión, (a) tostión suave, (b) tostión balanceada y (c) tostión fuerte.

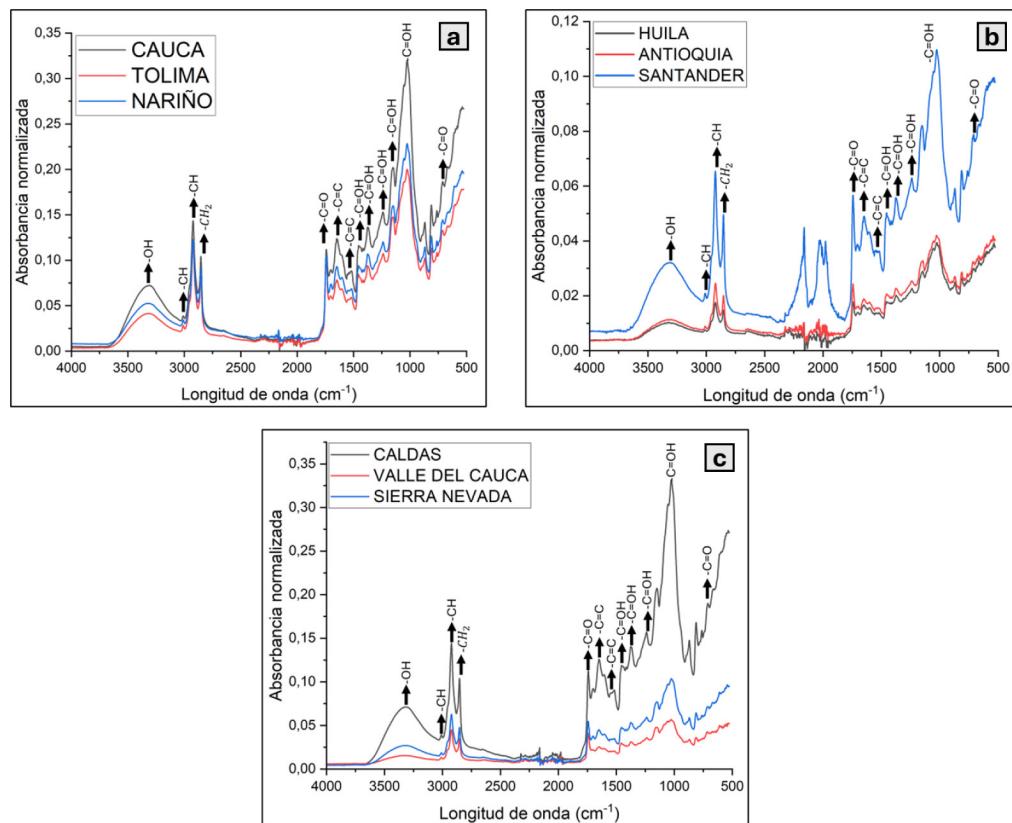


Figura 1. Características espectroscópicas de los cafés de región según su grado de tostión, (a) tostión suave, (b) tostión balanceada y (c) tostión fuerte.

Fuente: elaboración propia

A partir de las secciones a, b y c de la figura 1, se evaluaron los picos de interés y la banda de vibración de los grupos funcionales presentes. Según los espectros y los pi-

cos, se identificaron 14 bandas que asocian grupos funcionales de interés relacionados con la presencia de compuestos específicos. En relación con lo anteriormente expuesto,

las absorbancias de los grupos funcionales fueron analizadas estadísticamente, con el fin de establecer las diferencias entre los cafés de cada grado de tostión. En la tabla

1 se observan los resultados de absorbancia equivalentes a la vibración de los grupos funcionales identificados en los picos de la figura 1.

Tabla 1.

Absorbancias de los grupos funcionales de los cafés de análisis para cada grado de tostión

Longitud de onda cm ⁻¹	Grupo funcional	Compuesto asociado	Absorbancia tostión suave			p-valor
			Cauca	Tolima	Nariño	
3313	-OH	Alcoholes y agua	0,072±0,001 ^a	0,041±0,000 ^b	0,052±0,00 ^{3c}	0,000
3010	-CH	Anillos aromáticos	0,038±0,004 ^a	0,027±0,007 ^b	0,033±0,007 ^c	0,000
2925	- CH	Cafeína y lípidos	0,139±0,007 ^a	0,115±0,006 ^b	0,119±0,006 ^c	0,000
2854	-CH ₂	Ácidos grasos	0,102±0,006 ^a	0,084±0,005 ^b	0,089±0,005 ^c	0,000
1780	C=O	Aldehídos, ésteres y ácidos alifáticos como el clorogénico	0,025±0,001 ^a	0,020±0,008 ^b	0,024±0,001 ^c	0,000
1657	C=C	Cafeína	0,118±0,002 ^a	0,075±0,001 ^b	0,090±0,001 ^c	0,000
1589	C=C	Trigonelina	0,096±0,002 ^a	0,064±0,001 ^b	0,075±0,001 ^c	0,000
1450	C-OH	Ácido clorogénico	0,114±0,004 ^a	0,081±0,001 ^b	0,092±0,001 ^c	0,000
1381	C-OH	Ácido clorogénico	0,130±0,005 ^a	0,089±0,004 ^b	0,102±0,004 ^c	0,000
1250	C=O y -OH	Carbohidratos, alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos y anhídridos	0,148±0,002 ^a	0,102±0,001 ^b	0,114±0,001 ^c	0,000
1237	C-OH	Sacarosa	0,152±0,009 ^a	0,107±0,003 ^b	0,119±0,001 ^c	0,000
1150	C-OH	Ácido clorogénico	0,201±0,002 ^a	0,147±0,002 ^b	0,159±0,001 ^c	0,000
1065	C-OH	Arabinogalactanos, ácido clorogénico y quínico	0,279±0,006 ^a	0,179±0,003 ^b	0,203±0,004 ^c	0,000
721	C=O	Carbohidratos	0,177±0,005 ^a	0,128±0,003 ^b	0,139±0,004 ^c	0,000

INFLUENCIA DE LA REGIÓN Y TOSTIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DE CAFÉS COLOMBIANOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA
 Ochoa, F., Durán, O., Trujillo, N.

Longitud de onda cm ⁻¹	Grupo funcional	Compuesto asociado	Absorbancia tostión balanceada			p-valor
			Huila	Antioquia	Santander	
3313	-OH	Alcoholes y agua	0,010±0,001 ^a	0,011±0,001 ^b	0,032±0,001 ^c	0,000
3010	-CH	Anillos aromáticos	0,007±0,001 ^a	0,008±0,001 ^b	0,020±0,002 ^c	0,000
2925	- CH	Cafeína y lípidos	0,017±0,000 ^a	0,023±0,001 ^b	0,063±0,003 ^c	0,000
2854	-CH ₂	Ácidos grasos	0,014±0,007 ^a	0,019±0,001 ^b	0,048±0,002 ^c	0,000
1780	C=O	Aldehídos, ésteres y ácidos alifáticos como el clorogénico	0,006±0,000 ^a	0,008±0,000 ^b	0,015±0,000 ^c	0,000
1657	C=C	Cafeína	0,016±0,000 ^a	0,018±0,000 ^b	0,047±0,000 ^c	0,000
1589	C=C	Trigonelina	0,015±0,000 ^a	0,016±0,000 ^b	0,040±0,000 ^c	0,000
1450	C-OH	Ácido clorogénico	0,017±0,001 ^a	0,020±0,000 ^b	0,049±0,001 ^c	0,000
1381	C-OH	Ácido clorogénico	0,019±0,001 ^a	0,021±0,002 ^b	0,053±0,001 ^c	0,000
1250	C=O y -OH	Carbohidratos, alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos y anhídridos	0,021±0,000 ^a	0,024±0,000 ^b	0,060±0,001 ^c	0,000
1237	C-OH	Sacarosa	0,022±0,000 ^a	0,025±0,001 ^b	0,062±0,002 ^c	0,000
1150	C-OH	Ácido clorogénico	0,028±0,002 ^a	0,032±0,000 ^b	0,082±0,001 ^c	0,000
1065	C-OH	Arabinogalactanos, ácido clorogénico y quínico	0,035±0,001 ^a	0,038±0,000 ^b	0,098±0,001 ^c	0,000
721	C=O	Carbohidratos	0,028±0,000 ^a	0,031±0,000 ^b	0,007±0,000 ^c	0,000
Longitud de onda cm ⁻¹	Grupo funcional	Compuesto asociado	Absorbancia tostión fuerte			p-valor
			Caldas	Valle del Cauca	Sierra Nevada	
3313	-OH	Alcoholes y agua	0,071±0,000 ^a	0,015±0,000 ^b	0,026±0,001 ^c	0,000
3010	-CH	Anillos aromáticos	0,038±0,004 ^a	0,013±0,001 ^b	0,018±0,005 ^c	0,000

Longitud de onda cm ⁻¹	Grupo funcional	Compuesto asociado	Absorbancia tostión fuerte			p-valor
			Caldas	Valle del Cauca	Sierra Nevada	
2925	- CH	Cafeína y lípidos	0,141±0,007 ^a	0,043±0,002 ^b	0,061±0,003 ^c	0,000
2854	-CH ₂	Ácidos grasos	0,102±0,006 ^a	0,034±0,002 ^b	0,047±0,002 ^c	0,000
1780	C=O	Aldehídos, ésteres y ácidos alifáticos como el clorogénico	0,026±0,001 ^a	0,010±0,002 ^b	0,014±0,006 ^c	0,000
1657	C=C	Cafeína	0,125±0,002 ^a	0,024±0,002 ^b	0,044±0,002 ^c	0,000
1589	C=C	Trigonelina	0,100±0,002 ^a	0,022±0,004 ^b	0,038±0,003 ^c	0,000
1450	C-OH	Ácido clorogénico	0,117±0,007 ^a	0,028±0,005 ^b	0,046±0,007 ^c	0,000
1381	C-OH	Ácido clorogénico	0,135±0,004 ^a	0,029±0,001 ^b	0,051±0,000 ^c	0,000
1250	C=O y -OH	Carbohidratos, alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos y anhídridos	0,151±0,001 ^a	0,033±0,004 ^b	0,056±0,005 ^c	0,000
1237	C-OH	Sacarosa	0,156±0,001 ^a	0,035±0,007 ^b	0,059±0,002 ^c	0,000
1150	C-OH	Ácido clorogénico	0,207±0,004 ^a	0,047±0,007 ^b	0,076±0,007 ^c	0,000
1065	C-OH	Arabinogalactanos, ácido clorogénico y quínico	0,290±0,006 ^a	0,053±0,001 ^b	0,093±0,001 ^c	0,000
721	C=O	Carbohidratos	0,181±0,005 ^a	0,042±0,001 ^b	0,069±0,002 ^c	0,000

Letras diferentes entre filas presentan diferencias mínimas significativas en un nivel del 0,05.

Fuente: elaboración propia

Según lo reportado por Aung Moon et al. (2024), el pico en 3313 cm⁻¹ se asocia al estiramiento de los enlaces -OH (Barrios-Rodríguez et al., 2021b), por la presencia de agua principalmente (Tsiaka et al., 2023); sin

embargo, algunos autores han relacionado la presencia de alcoholes generados por procesos fermentativos en el grano. La literatura expone que valores altos de absorbancia en 3313 cm⁻¹ indica mayor cantidad de agua

ligada en el grano, relacionándose con la calidad del tueste y la presencia de compuestos fisicoquímicos (Pereira et al., 2021).

En 3010 cm⁻¹ hubo vibración simétrica del estiramiento de -CH en enlaces dobles *cis* (Aung Moon et al., 2024) asociado al estiramiento de -CH en anillos aromáticos (Tsiaka et al., 2023). Los picos a 2925 y 2854 cm⁻¹ se atribuyeron al estiramiento antisimétrico de los grupos -CH₂ y -CH₃ (Flores-Valdez et al., 2020) en lípidos (Barrios-Rodríguez et al., 2021a), cafeína (Barrios-Rodríguez et al., 2021a; Jiménez-Ochoa et al., 2022) y ácidos grasos (Aung Moon et al., 2024). Las variaciones de estos grupos funcionales pueden causar una elevación en la oxidación y degradación de lípidos, lo que lleva a una reducción en la intensidad de las vibraciones de estiramiento -CH₂ y -CH₃, acelerando así alteraciones internas en el grano (Tsiaka et al., 2023).

En 1780 cm⁻¹ se observa el estiramiento del enlace -C=O, indicando ésteres alifáticos (Tsiaka et al., 2023), ácidos clorogénicos e inclusive cafeína (Yusmanizar et al., 2019). Así mismo, se asocian aldehídos, ésteres y ácidos alifáticos (Munyendo et al., 2022). Lo anterior, dada la presencia de compuestos aromáticos del café, como ésteres relacionados con aromas frutales en el grano (Belchior et al., 2019).

En las bandas 1657 cm⁻¹ se encontró la vibración de estiramiento -C=C en *cis*-olefinas como la cafeína (Aung Moon et al., 2024), al igual que en 1589 cm⁻¹ con presencia de trigonelina (Barrios-Rodríguez et al., 2021a; Munyendo et al., 2022). Estos dos compuestos son responsables de la calidad organoléptica del café y la producción de sa-

bores, especialmente el aroma a café tostado (Belchior et al., 2019). También se encontró presencia de ácido clorogénico en las bandas 1450, 1381, 1150 y 1065 cm⁻¹ con huella dactilar del grupo funcional flexión -C-OH en ácidos orgánicos (Barrios-Rodríguez et al., 2021b) y arabinogalactanos en 1065 cm⁻¹ (Tsiaka et al., 2023). La presencia de este ácido carbónico (ácido clorogénico) se debe a su abundante contenido en los granos de café, el cual puede variar según la intensidad y variables con las que se realice el tueste (Debona et al., 2021).

La región de 1250 cm⁻¹ permite establecer la clasificación del grano con respecto a su grado de tostión, dado que se correlaciona con los modos de vibración de las moléculas de carbohidratos, alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos y anhídridos. Estos componentes químicos desempeñan un papel crucial en la evaluación de las propiedades organolépticas del café, junto con los ésteres y las cetonas. Los ácidos, por su parte, producen compuestos volátiles que evocan aromas que recuerdan a los del vinagre, el chocolate y el caramelo que se desarrollan tras la tostión. Con respecto a la identificación de carbohidratos, en 1237 cm⁻¹ la vibración -C-OH corresponde a compuestos específicos como la sacarosa (Aung Moon et al., 2024; Stanek et al., 2021). Mientras que, en 721 cm⁻¹ expresa la vibración -C-O asociada con la presencia de monosacáridos propios del grano como la fructosa y glucosa.

En general, los valores presentados en la tabla 6 muestran que los cafés de mayor vibración en los 14 grupos funcionales para cada grado de tostión fueron: Cauca (tostión

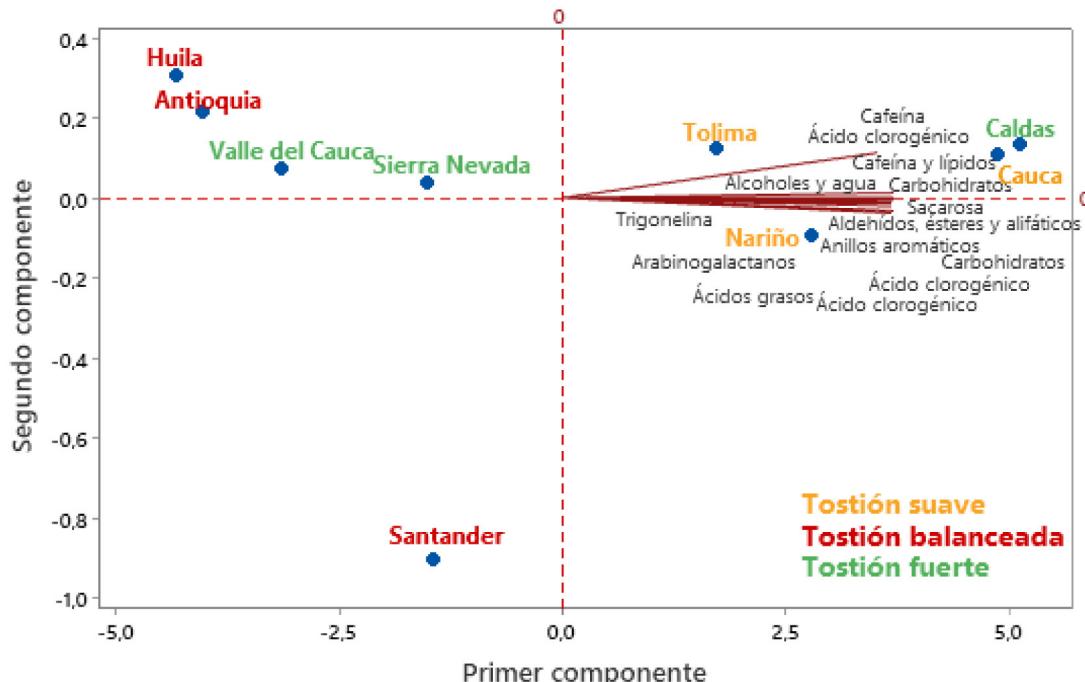
suave), Santander (tostión balanceada) y Caldas (tostión fuerte). Sin embargo, el análisis estadístico arrojó diferencias mínimas significativas en todos los grupos funcionales en un p-valor de 0,000. Así mismo, entre los tres cafés de cada grado de tostión no se presentaron similitudes, indicando que la región de origen incide en la presencia de grupos funcionales de los cafés, según lo expresado por Alcantara et al. (2025), Pramudita et al. (2017) y Tsiafitsa et al. (2022). Las variaciones asociadas en las características espectroscópicas también se relacionan con las propiedades intrínsecas del grano, como la composición fisicoquímica, las características metabólicas, la oxidación de lípidos y la presencia de compuestos importantes. Dentro de estos compuestos resaltan carbohidratos, proteínas, lípidos, cafeína, ácido clorogénico y trigonelina, correspondientes a las huellas dactilares de los grupos funcionales identificados (Aung Moon et al., 2024), permitiendo la diferenciación de los cafés según su grado de tostión y su región de origen.

3.2. Análisis quimiométrico y relación espectroscópica de las muestras de café

Con el fin de establecer la agrupación de las muestras de café según su grado de tostión y la influencia de los compuestos rela-

cionados con los grupos funcionales identificados, la figura 2 muestra dicha agrupación mediante un análisis de componentes principales. En este caso, el primer componente principal (PC1) es el eje que más variabilidad explica en los datos y está fuertemente influenciado por los carbohidratos (0,269), la sacarosa (0,269) y los ácidos clorogénicos (0,269), indicando que estas variables están altamente correlacionadas y son responsables de la diferenciación entre las muestras. Este patrón se observa en la disposición de las regiones: Caldas, Tolima y Cauca aparecen asociadas con estos compuestos, mientras que Santander y Sierra Nevada se sitúan en el extremo opuesto. El segundo componente principal (PC2) contribuye a la diferenciación de las muestras en el eje vertical y está principalmente influenciado por los aldehídos, ésteres y compuestos alifáticos (-0,298), los anillos aromáticos (-0,255) y los ácidos grasos (-0,113). Esto sugiere que, en regiones como Huila y Antioquia, ubicadas en la parte superior, existe una mayor presencia de estos compuestos, los cuales están relacionados con las propiedades volátiles y el perfil sensorial del café. En contraste, Santander, en la parte inferior de la figura, presenta menores concentraciones de estos compuestos, lo que indica un perfil químico distinto (Marín-San Román et al., 2020).

Figura 2. Análisis de componentes principales, influencia de los compuestos con respecto a los cafés de región, según su grado de tostión



Fuente: elaboración propia

En cuanto al efecto del grado de tostión, se observa que los cafés con mayor contenido de ácidos clorogénicos y carbohidratos (Caldas, Tolima y Cauca) están relacionados con tostiones suaves o balanceadas, ya que estos compuestos tienden a degradarse a temperaturas más altas (Pimpley et al., 2020). Por otro lado, Nariño y Santander muestran una mayor concentración de aldehídos, ésteres y ácidos grasos, que son productos de la degradación térmica de precursores durante la tostión fuerte. Este efecto se corrobora con los valores de los vectores propios, donde los aldehídos, ésteres y compuestos alifáticos tienen un alto valor positivo en (0,535), lo que sugiere su formación en etapas avanzadas del proceso térmico (De Souza Costa et al., 2024).

La trigonalina (-0,012 en PC2 y 0,269 en PC1) también juega un papel importante en la diferenciación de las muestras. Su presencia en cafés de Nariño y Santander sugiere que estas regiones podrían contener granos con mayor predisposición a la formación de compuestos aromáticos derivados de su degradación, como la pirazina, que es responsable de las notas tostadas y de caramelo en el café (Aung Moon et al., 2024). Asimismo, la cafeína (-0,087 en PC2 y 0,267 en PC1) es otro compuesto que influye en la separación de muestras, con una mayor presencia en los cafés de Caldas y Tolima, lo que sugiere que en estas regiones la composición química favorece la retención de este alcaloide tras el tostado. Otro hallazgo es la fuerte correlación de los carbohidratos (0,888 en PC2), lo

que indica que son determinantes para diferenciar las muestras en función de la región y el proceso de tostión. Este comportamiento está relacionado con la caramelización y la reacción de Maillard, procesos clave en el desarrollo del sabor del café (Iriondo-De-Hond et al., 2021).

En complemento al análisis de componentes principales, el análisis factorial realizado sobre la composición química del café, en relación con los valores de cargas factoriales y coeficientes de puntuación, se obtuvo un índice KMO de 0,621, lo que indica una fuerte estructura subyacente dominada por un único factor principal. En este contexto, la mayoría de las variables presentan cargas factoriales muy altas en el factor 1, con valores cercanos a 0,99, lo que indica que prácticamente toda la variabilidad de la composición química del café puede explicarse a través de una única dimensión. Esto es consistente con los resultados previos obtenidos en el análisis de componentes principales (PCA), en los cuales se observó que la primera componente principal explicaba la mayor parte de la varianza de los datos, sugiriendo que los compuestos químicos del café están altamente correlacionados.

La única variable que muestra un comportamiento diferenciado en este análisis factorial es la concentración de carbohidratos, que exhibe una carga factorial más alta en el factor 2 (0,311), lo que sugiere que este factor captura información específica sobre la variabilidad de los azúcares y polisacáridos en el café. Este hallazgo es coherente con los resultados del PCA, donde los carbohidratos se ubicaban en una región distinta den-

tro del espacio de componentes principales, indicando que su comportamiento en la matriz química del café es diferente al del resto de compuestos analizados. Este hecho puede atribuirse a su participación en las reacciones de Maillard y en la formación de compuestos aromáticos durante el tostado, procesos que afectan de manera diferencial a los carbohidratos, en comparación con otras moléculas como alcoholes, aldehídos y compuestos fenólicos (Todhanakasem et al., 2025).

La presencia de communalidades de valor 1,000 en todas las variables sugiere que el modelo factorial explica la totalidad de la varianza de cada una de ellas. Esto es un resultado inusual, pues en la mayoría de los estudios factoriales se espera que algunas variables tengan porciones de varianza no explicadas por los factores extraídos. La varianza explicada refuerza aún más esta estructura, ya que el factor 1 captura el 97,8 % de la variabilidad total, mientras que los factores restantes aportan menos del 2%. Este resultado implica que los compuestos químicos analizados están influenciados mayormente por un único eje de variabilidad, lo que se alinea con los hallazgos del PCA, donde el primer componente, presenta la composición primordial del grano.

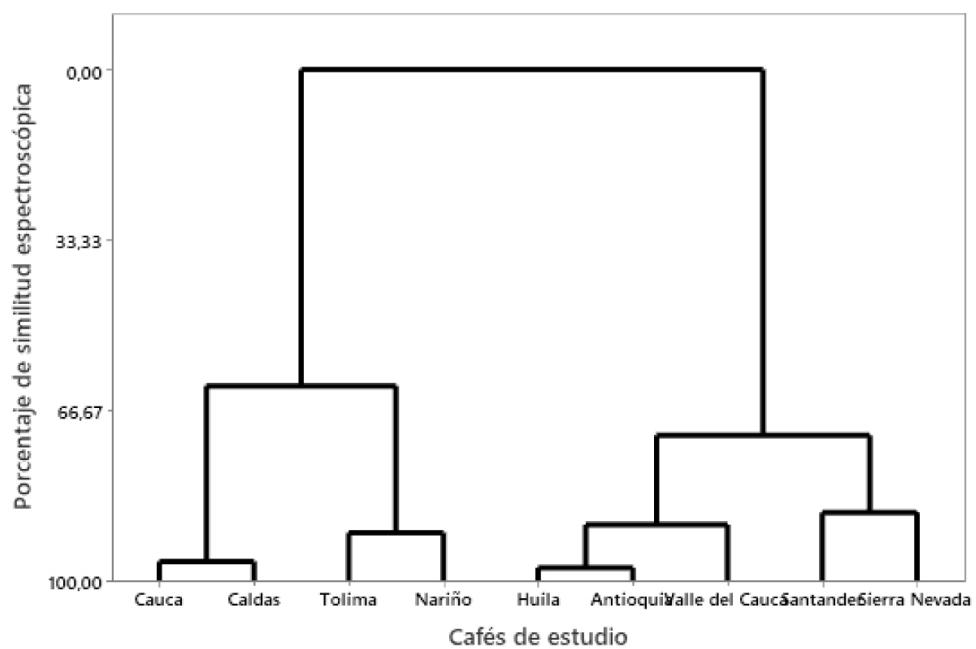
Los valores de puntuación muestran que algunas moléculas presentan comportamientos diferenciados en factores secundarios. Por ejemplo, la variable “Alcoholes y Agua” tiene puntuaciones altas en el factor 7 (8,354) y muy negativas en el factor 8 (-103,411), lo que sugiere que esta variable está diferenciándose del resto en dimensiones menos dominantes, posiblemente debido

a su volatilidad o retención de humedad durante el procesamiento. De manera similar, los carbohidratos presentan una fuerte puntuación en el factor 2 (2,520), lo que refuerza la hipótesis de que esta variable tiene un comportamiento diferenciado respecto a los demás compuestos químicos. En contraste, la cafeína y la trigonelina muestran valores extremos en los factores menos influyentes, lo que puede indicar que su variabilidad no está estrechamente ligada a la composición química del grano, sino a factores externos,

como el origen del café o las condiciones de procesamiento.

Con base en el análisis de conglomerados jerárquicos (Figura 3), realizado a partir de los espectros obtenidos de muestras de café provenientes de nueve regiones colombianas, se identificaron agrupamientos que evidencian patrones de similitud funcional vinculados tanto al origen geográfico como al nivel de tostión.

Figura 3. Análisis de conglomerados jerárquicos, similitud espectroscópica de las muestras de café según su origen y grado de tostión



Fuente: elaboración propia

El dendrograma construido con base en la similitud espectroscópica muestra una clara diferenciación entre dos macrogrupos principales. El primero está conformado por las muestras de Cauca, Caldas, Tolima y Nariño,

las cuales fueron amalgamadas en los primeros pasos del análisis con niveles de similitud superiores al 89 %, indicando una alta homogeneidad en la composición de grupos funcionales detectados por espectroscopía.

Este grupo presenta una particularidad relevante: a pesar de que contiene cafés con diferentes grados de tostión (Cauca y Tolima con tostión suave; Caldas con tostión fuerte), la cercanía geográfica y las posibles similitudes agroecológicas podrían haber influido en la expresión composicional de los metabolitos funcionales, superando el efecto del tratamiento térmico.

El segundo macrogrupo está compuesto por las muestras de Huila, Antioquia, Valle del Cauca, Santander y Sierra Nevada. Dentro de este grupo, Huila y Antioquia presentaron la mayor similitud espectral (97,53 %), lo que sugiere una composición funcional casi idéntica, posiblemente atribuible a condiciones de cultivo y procesamiento compartidas. Posteriormente, estas muestras se agruparon con las de Valle del Cauca, Santander y Sierra Nevada, conformando un clúster cuya similitud fue menor (alrededor del 71,6 %), lo que indica una mayor dispersión interna en cuanto a la presencia de grupos funcionales. Al comparar ambos macrogrupos, se observa que la fusión final ocurre en un nivel de semejanza del 61,91 %, lo que evidencia que estos dos conjuntos de muestras tienen perfiles espectrales marcadamente distintos, reflejando diferencias composicionales relevantes que podrían asociarse con el origen regional, las condiciones edafoclimáticas y, en menor medida, con el proceso de tostión.

La partición final del análisis muestra una distancia promedio desde el centroide relativamente baja (0,166), así como una distancia máxima de 0,267, lo cual sugiere que, a pesar de la existencia de dos grandes agrupamien-

tos diferenciados, el conjunto de muestras presenta una cohesión aceptable desde el punto de vista espectroscópico. Estos hallazgos indican que la técnica utilizada permite discriminar entre perfiles funcionales de cafés de distintas regiones, y que las señales espectrales pueden ser útiles como trazadores químicos de origen geográfico. En términos científicos, se puede afirmar que las diferencias en la huella espectral de los cafés analizados no responden únicamente al grado de tostión, sino que reflejan un patrón regional distintivo, posiblemente influenciado por la combinación de ecotipos locales, prácticas de cultivo y factores agroambientales específicos de cada zona productora. Este resultado refuerza la utilidad del análisis multivariado y espectroscópico como herramienta de caracterización química integral y diferenciación geográfica en estudios de calidad y autenticidad del café.

Finalmente, las características espectroscópicas identificadas mediante el análisis infrarrojo permiten establecer las diferencias que existen entre las muestras a pesar de tener el mismo grado de tostión. De acuerdo con los picos de la figura 1 y la intensidad de las vibraciones de los grupos funcionales según las absorbancias normalizadas de la tabla 1, se observa que los cafés de Cauca (tostión suave), Santander (tostión balanceada) y Caldas (tostión fuerte) presentan un grado de tostión en menor intensidad en temperatura y tiempo en comparación con las demás regiones de cada grado de tostión. Si bien estos cafés indican mayor vibración de los grupos funcionales, se relaciona con tostiones menos intensas, las cuales preservan los grupos funcionales que pueden de-

gradarse tras las condiciones del proceso de tueste, mientras que los cafés que presentan menor vibración se asocian con condiciones

más intensas y prologadas según Tsiaka et al. (2023).

4 CONCLUSIONES

Se identificaron 14 bandas espectrales vinculadas a grupos funcionales clave en los cafés analizados, confirmando la presencia de compuestos como alcoholes, anillos aromáticos, cafeína, lípidos, aldehídos, ésteres, ácidos orgánicos (incluyendo ácido clorogénico), trigonelina, ácidos alifáticos y carbohidratos. La intensidad de estas bandas fue mayor en cafés de Cauca (tostión suave), Santander (tostión balanceada) y Caldas (tostión fuerte), lo que indica una mayor concentración de estos compuestos.

El análisis de componentes principales mostró que los cafés con tostión suave (Tolima, Nariño y Cauca) y los de tostión fuerte (Caldas) concentraron la mayor variabilidad en la presencia de grupos funcionales, destacando el efecto combinado de la región y el tipo de tostión sobre la composición química. En particular, los cafés de Cauca y Caldas sobresalieron por su alta riqueza funcional, lo que evidencia que la procedencia geográfica y el grado de tostión no solo modifican la cantidad, sino también la diversidad de compuestos funcionales del grano.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar la investigación mediante técnicas instrumentales de análisis cuantitativo, con el propósito de complementar los resultados obtenidos sobre la caracterización funcional y bioactiva de los cafés, así como profundizar en la influencia de la región de origen y el nivel de tostión. Dado que la espectroscopía empleada en este estudio se basa en un enfoque cualitativo, los espectros obtenidos no

permiten cuantificar con precisión la concentración de compuestos específicos. La incorporación de métodos como cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), espectrometría de masas (MS) o resonancia magnética nuclear (RMN) permitiría validar y fortalecer la interpretación de los grupos funcionales identificados, aportando mayor robustez a las conclusiones del estudio.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer, segundo y tercer autor: participaron activamente en la metodología,

investigación, análisis de datos, conceptualización y escritura del manuscrito original.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad de Pamplona como casa de estudios del doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos a la que está asociado en autor 1. Así mismo, a la Universidad Autónoma de Bucaramanga como entidad ejecutora y fi-

nanciera del plan “Formación de capital humano a nivel doctoral para atender las demandas territoriales de la región Centro Oriente: Santander, Norte de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Bogotá”, del cual el autor 1 es beneficiario.

AGRADECIMIENTO

Ala Universidad Autónoma de Bucaramanga como entidad ejecutora y financiera del plan “Formación de capital humano a nivel doctoral para atender las demandas territoriales de la región Centro Oriente:

te: Santander, Norte de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Bogotá” del cual el autor 1 es beneficiario. A la Universidad de Pamplona, donde se ejecutó la presente investigación.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Alcantara, G. M. R. N., Martins, L. C., Gomes, W. P. C., Dresch, D., Rocha, F. R. P. & Melchert, W. R. (2025). Effect of roasting on chemical composition of coffee. *Food Chemistry*, 477 143169. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143169>

Aung Moon, S., Wongsakul, S., Kitazawa, H., Kittiwachana, S. & Saengrayap, R. (2024). Application of ATR-FTIR for Green Arabica Bean Shelf-Life Determination in Accelerated Storage. *Foods* 13, (15), 2331. <https://doi.org/10.3390/FOODS13152331>

Baqueta, M. R., Valderrama, P., Mandrone, M., Poli, F., Coqueiro, A., Costa-Santos, A. C., Rebellato, A. P., Luz, G. M., Rocha, R. B., Pallone, J. A. L. & Marini, F. (2023). ¹H NMR, FAAS, portable NIR, benchtop NIR, and ATR-FTIR-MIR spectroscopies for characterizing and discriminating new Brazilian Canephora coffees in a multi-block analysis perspective. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 240, 104907. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOLAB.2023.104907>

Barrios-Rodríguez, Y., Collazos-Escobar, G. A. & Gutiérrez-Guzmán, N. (2021a). ATR-FTIR for characterizing and differentiating dried and ground coffee cherry pulp of different varieties (*Coffea Arabica* L.). *Engenharia Agrícola*, 41(1), 70–77. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V41N1P70-77/2021>

Barrios-Rodríguez, Y. F., Rojas Reyes, C. A., Triana Campos, J. S., Girón-Hernández, J., & Rodríguez-Gamir, J. (2021b). Infrared spectroscopy coupled with chemometrics in coffee post-harvest processes as complement to the sensory analysis. *LWT*, 145, 111304. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111304>

Barron, D., Pineau, N., Matthey-Doret, W., Ali, S., Sudre, J., Germain, J. C., Kolodziejczyk, E., Pollien, P., Labbe, D., Jarisch, C., Dugas, V., Hartmann, C. & Folmer, B. (2012). Impact of crema on the aroma release and the in-mouth sensory perception of espresso coffee. *Food & Function*, 3(9), 923-930. <https://doi.org/10.1039/C2FO30046J>

Belchior, V., Botelho, B. G., Oliveira, L. S. & Franca, A. S. (2019). Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Spectroscopy (ATR-FTIR) and chemometrics for discrimination of espresso coffees with different sensory characteristics. *Food Chemistry*, 273, 178-185. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.12.026>

Castaldo, L., Narváez, A., Izzo, L., Graziani, G. & Ritieni, A. (2020). In Vitro Bioaccessibility and Antioxidant Activity of Coffee Silverskin Polyphenolic Extract and Characterization of Bioactive Compounds Using UHPLC-Q-Orbitrap HRMS. *Molecules* 2020, Vol. 25, Page 2132, 25(9), 2132. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25092132>

Cortés-Macías, E. T., Fuentes-López, C., Gentile, P., Girón-Hernández, J. & Fuentes-López, A. (2022). Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia. *Postharvest Biology and Technology*, 187, 111852. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.111852>

Craig, A. P., Franca, A. S. & Oliveira, L. S. (2012). Evaluation of the potential of FTIR and chemometrics for separation between defective and non-defective coffees. *Food Chemistry*, 132(3), 1368-1374. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.11.121>

De Souza Costa, A. M., Lirio Soares, K., De Souza Silveira, L., Verdin Filho, A. C., Louzada Pereira, L., Moreira Osório, V., Fronza, M. & Scherer, R. (2024). Influence of maturation and roasting on

the quality and chemical composition of new conilon coffee cultivar by chemometrics. *Food Research International*, 176, 113791. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2023.113791>

Debona, D. G., Oliveira, E. C. da S., Ten Caten, C. S., Guarçoni, R. C., Moreira, T. R., Pereira, L. L. & Moreli, A. P. (2021). Sensory analysis and mid-infrared spectroscopy for discriminating roasted specialty coffees. *Coffee Science*, 16. <https://doi.org/10.25186/.v16i.1878>

Debona, D. G., Pereira, L. L., da Luz, J. M. R., Lyrio, M. V. V., Guimarães, C. V., Simmer, M. M. B., Agnoletti, B. Z., Frinhani, R. Q., da Silva Oliveira, E. C. & de Castro, E. V. R. (2024). Mid-infrared spectroscopy and physicochemical analyses in the characterization of coffee roasting stages. *European Food Research and Technology*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04627-4>

Flores-Valdez, M., Meza-Márquez, O. G., Osorio-Revilla, G. & Gallardo-Velázquez, T. (2020). Identification and Quantification of Adulterants in Coffee (*Coffea arabica* L.) Using FT-MIR Spectroscopy Coupled with Chemometrics. *Foods*. <https://doi.org/10.3390/foods9070851>

Iriondo-DeHond, A., Rodríguez Casas, A. & del Castillo, M. D. (2021). Interest of Coffee Melanoidins as Sustainable Healthier Food Ingredients. *Frontiers in Nutrition*, 8, 730343. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.730343>

Itobe, T., Nishimura, O. & Kumazawa, K. (2015). Influence of milk on aroma release

and aroma perception during consumption of coffee beverages. *Food Science and Technology Research*, 21(4), 607-614. <https://doi.org/10.3136/FSTR.21.607>

Jiménez-Ochoa, J. P., Barrios-Rodríguez, Y. F., Bahamón-Monje, A. F. & Gutiérrez-Gúzman, N. (2022). Physicochemical and sensory characteristics of dehydrated coffee pulp in function of drying temperature. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(12), 894-900. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V26N12P894-900>

Kungsawan, K., Sawangrat, C., Ounjaijean, S., Chaipoot, S., Phongphisutthinant, R. & Wiriacharee, P. (2023). Enhancing Bioactivity and Conjugation in Green Coffee Bean (*Coffea arabica*) Extract through Cold Plasma Treatment: Insights into Antioxidant Activity and Phenolic-Protein Conjugates. *Molecules*, 28(20), 7066. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28207066>

Maiyah, N., Kerdpiboon, S., Supapvanich, S., Kerr, W. L., Sriprom, P., Chotigavin, N., Klaypradit, W. & Puttongsiri, T. (2025). Recovering bioactive compounds and antioxidant capacity of medium roasted spent coffee grounds through varied hydrothermal brewing cycles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 20, 101789. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2025.101789>

Manrique, C. A. y Gutiérrez, N. (2018). Evaluación del proceso de clasificación de café (*Coffee arabica* L.) por el método de la espectroscopía infrarroja FTIR. *Rev.*

Ingeniería y Región, 20. <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/1890/3128>

Marín-San Román, S., Rubio-Bretón, P., Pérez-Álvarez, E. P., & Garde-Cerdán, T. (2020). Advancement in analytical techniques for the extraction of grape and wine volatile compounds. *Food Research International*, 137, 109712. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109712>

Masek, A., Latos-Brozio, M., Kałuzna-Czaplińska, J., Rosiak, A. & Chrzeszczajska, E. (2020). Antioxidant Properties of Green Coffee Extract. *Forests*, 11 (5), 557. <https://doi.org/10.3390/F11050557>

Mendes dos Santos, É. M., Malvezzi de Macedo, L., Lachelendola Tundisi, L., Artem Ataide, J., Camargo, G. A., Alves, R. C., Oliveira, M. B. P. P. & Gava Mazzola, P. (2021). Coffee by-products in topical formulations: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 280-291. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.02.064>

MinAgricultura. (2022). Área, Producción y Rendimiento Nacional de café. . <https://www.agronet.gov.co/estadistica/paginas/home.aspx?cod=1>

Munyendo, L. M., Njoroge, D. M., Owaga, E. E. & Mugendi, B. (2021). Coffee phytochemicals and post-harvest handling—A complex and delicate balance. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 103995. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2021.103995>

Munyendo, L., Njoroge, D., & Hitzmann, B. (2022). The Potential of Spectroscopic

Techniques in Coffee Analysis—A Review. *Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/pr10010071>

Nemzer, B., Abshiru, N. & Al-Taher, F. (2021a). Identification of Phytochemical Compounds in Coffea arabica Whole Coffee Cherries and Their Extracts by LC-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(11), 3430–3438. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05937>

Nemzer, B., Kalita, D. & Abshiru, N. (2021b). Quantification of Major Bioactive Constituents, Antioxidant Activity, and Enzyme Inhibitory Effects of Whole Coffee Cherries (Coffea arabica) and Their Extracts. *Molecules*, 2021, 26(14), 4306. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26144306>

Ni, Z., Bi, H., Jiang, C., Sun, H., Zhou, W., Tian, J. & Lin, Q. (2022). Investigation of co-combustion of sewage sludge and coffee industry residue by TG-FTIR and machine learning methods. *Fuel*, 309, 122082. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.122082>

Pereira, L. L., Debona, D. G., Pinheiro, P. F., de Oliveira, G. F., ten Caten, C. S., Moksunova, V., Kopanina, A. V., Vlasova, I. I., Talskikh, A. I., & Yamamoto, H. (2021). Quality Determinants in Coffee Production. *Food Engineering Series*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9>

Pimpley, V., Patil, S., Srinivasan, K., Desai, N. & Murthy, P. S. (2020). The chemistry of chlorogenic acid from green coffee and its role in attenuation of obesity and diabetes. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*

- nology, 50(10), 969-978. <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1786699>
- Pramudita, D., Araki, T., Sagara, Y. & Tambunan, A. H. (2017). Roasting and Colouring Curves for Coffee Beans with Broad Time-Temperature Variations. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1509-1520. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1912-5>
- Preedalikit, W., Chittasupho, C., Leelapornpisid, P., Potprommanee, S. & Kiattisin, K. (2023). Comparison of Biological Activities and Protective Effects on PAH-Induced Oxidative Damage of Different Coffee Cherry Pulp Extracts. *Foods*, 12(23), 4292. <https://doi.org/10.3390/FOODS12234292>
- Rojas-Ospina, A., Zuñiga-Collazos, A. & Castillo-Palacio, M. (2024). Factors influencing environmental sustainability performance: A study applied to coffee crops in Colombia. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(3), 100361. <https://doi.org/10.1016/J.JOITMC.2024.100361>
- Stanek, N., Zarębska, M., Biłos, Ł., Barabasz, K., Nowakowska-Bogdan, E., Semeniuk, I., Błaszkiewicz, J., Kulesza, R., Matejuk, R. & Szkutnik, K. (2021). Influence of coffee brewing methods on the chromatographic and spectroscopic profiles, antioxidant and sensory properties. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-01001-2>
- Tadesse, T., Tesfaye, B. & Abera, G. (2020). Coffee production constraints and opportunities at major growing districts of southern Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1741982>
- Todhanakasem, T., Van Tai, N., Kunyanee, K. & Pitinidhipat, N. (2025). Physicochemical characteristics and metabolite content of roasted arabica coffee in relation to consumer preference. *LWT*, 217, 117438. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2025.117438>
- Tsiafitsa, A., Oikonomopoulou, V., Stramkou, M., Krokida, M., & Papassiopi, N. (2022). Effect of heat treatment on physicochemical and sensory properties of selected coffee varieties. *European Food Research and Technology*, 248, 2009-2020. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04025-8>
- Tsiaka, T., Kritsi, E., Bratakos, S. M., Sotiroudis, G., Petridi, P., Savva, I., Christodoulou, P., Strati, I. F., Zoumpoulakis, P., Cavouras, D. & Sinanoglou, V. J. (2023). Quality Assessment of Ground Coffee Samples from Greek Market Using Various Instrumental Analytical Methods, In Silico Studies and Chemometrics. *Antioxidants*, 12(6), 1184. <https://doi.org/10.3390/antiox12061184>
- Wołosiak, R., Pakosz, P., Druzynska, B. & Janowicz, M. (2023). Antioxidant Activity of Coffee Components Influenced by Roast Degree and Preparation Method. *Applied Sciences*, 13(4), 2057. <https://doi.org/10.3390/APP13042057>
- Yusmanizar, Setiasih, I. S., Nurjanah, S., Muhaimin, M., Nurhadi, B., Rosniawaty, S. & Munawar, A. A. (2019). Fast and Non-De-

structive Prediction of Moisture Content and Cholegenic Acid of Intact Coffee Beans Using Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *IOP Conference Series: Ma-*

terials Science and Engineering, 506(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/506/1/012033>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CASCARILLA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) PARA LA ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN EN LA MICROEMPRESA DE CHOCOLATES FUENTES

COMPREHENSIVE USE OF COCOA SHELL (*Theobroma cacao* L.) FOR THE PRODUCTION OF AN INFUSION AT THE FUENTES CHOCOLATE MICROENTERPRISE

Frank Guillermo Intriago Flor ¹

Luis Miguel Viteri Castro ²

Kerly Estefanía Alvarado Vásquez ³

Citación: Intriago-Flor, F. G., Viteri-Castro, L. M., Alvarado-Vásquez, K. E. (2026). Aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la elaboración de una infusión en la microempresa de chocolates Fuentes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 97-118. <https://doi.org/10.22490/21456453.9621>

¹ Doctor en Ciencias Agrarias, Facultad de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, frank.intriago@utm.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-0377-1930>

² Magíster en agroindustria, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, lviteri8631@utm.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-0763-7744>

³ Doctorante en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria, ICAI-CONICET, Universidad Nacional del Cuyo, ICAI-CONICET, M5502JMA, Mendoza – Argentina, kalvarado6940@utm.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-0494-7085>
Autor de correspondencia: kalvarado6940@utm.edu.ec

RESUMEN

Contextualización: La agroindustria del cacao, particularmente el aprovechamiento de sus subproductos ha sido objeto de creciente interés, debido a las demandas de sostenibilidad y a la optimización de recursos en la producción de alimentos. La cascarilla de cacao (*Theobroma cacao L.*), un subproducto comúnmente desecharo, contiene propiedades bioactivas y podría representar una fuente potencial de productos innovadores. Sin embargo, su uso aún es limitado en la industria alimentaria, especialmente en la elaboración de infusiones, lo que representa una oportunidad para explorar su potencial. Además, estudios de mercado sugieren un creciente interés en productos funcionales y sostenibles, lo que podría favorecer la aceptación de las infusiones elaboradas con cascarilla de cacao.

Vacío de conocimiento: Existen pocos estudios sobre la viabilidad del aprovechamiento de la cascarilla de cacao como materia prima para la elaboración de infusiones, lo que deja un vacío de conocimiento en cuanto a sus propiedades organolépticas, beneficios para la salud y el impacto económico de su producción. Además, no se cuenta con información suficiente sobre su aceptación en el mercado ni sobre su efectividad en comparación con otros productos tradicionales de infusión.

Propósito: El objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad del aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao para la elaboración de una infusión, analizando sus propiedades organolépticas y la

viabilidad económica en una microempresa y la aceptación de los consumidores.

Metodología: Se empleó una investigación aplicada de carácter experimental. Para ello, se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la infusión de cascarilla de cacao. Además, se llevaron a cabo pruebas sensoriales mediante un panel de degustación para evaluar las características organolépticas del producto. Se complementó el estudio con un análisis económico, calculando los costos de producción, y una encuesta a los consumidores para medir la aceptación del producto en el mercado.

Resultados y conclusiones: Los resultados mostraron que la infusión de cascarilla de cacao tiene una buena aceptación en cuanto a sabor y aroma, con parámetros fisicoquímicos que cumplen con los estándares de seguridad alimentaria. Además, los análisis microbiológicos confirmaron que el producto es seguro para el consumo. En términos económicos, se concluyó que la producción de la infusión es viable y rentable para una microempresa, lo que sugiere que el aprovechamiento de la cascarilla de cacao es una opción sostenible y económica. El estudio aporta una contribución significativa a la literatura sobre el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, demostrando que la cascarilla de cacao puede ser un recurso valioso para la producción de infusiones.

Palabras clave: cascarilla de cacao, infusión, agroindustria, sostenibilidad, *Theobroma cacao*.

ABSTRACT

Contextualization: The cocoa agribusiness, particularly the use of its by-products, has been the object of growing interest due to the demands of sustainability and the optimization of resources in food production. Cocoa shell, (*Theobroma cacao* L.), a commonly discarded by-product, contain bioactive properties and could represent a potential source of innovative products. However, its use is still limited in the food industry, especially in the production of infusions, which represents an opportunity to explore its potential. In addition, market studies suggest a growing interest in functional and sustainable products, which could favor the acceptance of infusions made with cocoa shell.

Knowledge gap: There are few studies on the feasibility of using cocoa shell as a raw material for the production of infusions, which leaves a knowledge gap regarding its organoleptic properties, health benefits and the economic impact of its production. In addition, there is insufficient information on its market acceptance or effectiveness compared to other traditional infusion products.

Purpose: The main objective of this study is to evaluate the feasibility of the integral use of cocoa shell for the production of an infusion, analyzing its organoleptic properties and the economic viability in a microenterprise and the acceptance of consumers.

Methodology: Experimental applied research was used. To this end, physical-chemical and microbiological analyses of the cocoa shell infusion were carried out. In addition, sensory tests were carried out through a tasting panel to evaluate the organoleptic characteristics of the product. The study was complemented with an economic analysis, calculating production costs, and a consumer survey to measure the acceptance of the product in the market.

Results and conclusions: The results showed that the cocoa shell infusion has a good acceptance in terms of flavor and aroma, with physical-chemical parameters that comply with food safety standards. In addition, microbiological analyses confirmed that the product is safe for consumption. In economic terms, it was concluded that the production of the infusion is viable and profitable for a microenterprise, which suggests that the use of cocoa shell is a sustainable and economical option. The study makes a significant contribution to the literature on the use of agro-industrial by-products, demonstrating that cocoa shell can be a valuable resource for the production of infusions.

Keywords: cocoa shell, infusion, agribusiness, sustainability, *Theobroma cacao*.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: (Intriago et al., 2026)

1 INTRODUCCIÓN

El cacao sigue siendo uno de los productos más relevantes en la economía ecuatoriana, convirtiéndose en el tercer rubro más importante de las exportaciones tradicionales no petroleras (7 %), superado por otros productos, como banano con una tasa de participación del 24 % y camarones con participación del 18 % (Teneda et al., 2022). En Ecuador, el cacao tipo CCN-51 es el más utilizado para la exportación, principalmente para la producción de chocolate a través

de grandes empresas (Ortiz et al., 2023) las cuales se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con dos tratamientos: control y suplementado (2kg/animal/día). Los residuos agroindustriales son productos secundarios que se obtienen del procesamiento de granos, frutas y verduras, etc. Los residuos agroindustriales consisten en pieles y semillas de diferentes formas y tamaños que generalmente se descartan (Vásquez et al., 2024).

La cascarilla de cacao suele ser considerada un residuo desecharable por parte de agricultores e industrias, quienes rara vez le otorgan un uso productivo, a pesar de su potencial para aplicaciones agroindustriales y sostenibles (Sangronis et al., 2021). Sin embargo, este subproducto puede utilizarse como materia prima para el compostaje, contribuyendo al equilibrio nutricional del alimento para animales de granja. Además, en algunos casos, se utiliza como aditivo en la elaboración de productos como la sal de potasio para jabones (Baldera et al., 2021).

La infusión es una bebida reconocida por sus numerosos beneficios para la salud, principalmente debido al efecto antioxidante de sus componentes. Estos compuestos actúan como trampas activas de oxígeno, protegiendo la estructura de los ácidos nucleicos, las proteínas y los lípidos (García et al., 2025). Además, las infusiones forman parte del patrimonio cultural de diversas sociedades y han sido adoptadas en todo el mundo, consumiéndose de maneras únicas en cada país y región, lo que les confiere un carácter único y ancestral (Sangronis et al., 2021).

Las características más relevantes para tener en cuenta en la producción de infusión de calidad según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2392 para hierbas aromáticas,

las hierbas aromáticas deben tener la totalidad de sus principios activos y otros metabolitos secundarios, pueden expenderse enteras, troceadas, molidas, solas o mezcladas entre sí, no se permite adicionar colorantes u otros productos que alteren la naturaleza del producto, pero sí se puede adicionar saborizantes permitidos, y cumplir con los rangos en los análisis organolépticos, fisicoquímico, microbiológico y de metales pesados (Matute et al., 2022).

Ecuador ha sido considerado uno de los principales exportadores de cacao a nivel mundial; sin embargo, la falta de innovación ha limitado el aprovechamiento de subproductos como la cascarilla. Por ello, esta investigación se desarrolló en la microempresa Chocolates Fuentes, del cantón Ventanas, dedicada a la elaboración de productos derivados del cacao, con el propósito de aprovechar la cascarilla para la producción de una infusión. El objetivo general es evaluar el aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la elaboración de una infusión, mediante el análisis de sus propiedades y aceptación, contribuyendo a la sostenibilidad y diversificación de productos en la empresa. Así se buscó ofrecer alternativas saludables que beneficien a sus consumidores.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la investigación

La investigación se desarrolló en la microempresa Chocolates Fuentes, ubicada en el cantón Ventanas, provincia de Los Ríos,

Ecuador. Sus coordenadas geográficas son 1°26'42.2" latitud sur y 79°27'59.5" longitud oeste, a una altitud de 38,1 m s. n. m. Este lugar fue seleccionado debido a su experiencia en la transformación del cacao y su interés

en el aprovechamiento de subproductos del proceso productivo.

Tipo de investigación

El presente estudio es de carácter descriptivo, lo que permitió analizar y caracterizar el aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la elaboración de infusiones. Se evaluaron sus propiedades organolépticas, incluyendo color, olor, sabor

y apariencia, así como sus características fisiocoquímicas y microbiológicas, conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2392.

Manejo del ensayo

El proceso de elaboración de la infusión de cascarilla de cacao siguió una metodología estructurada, abarcando las siguientes etapas (ver figura 1):

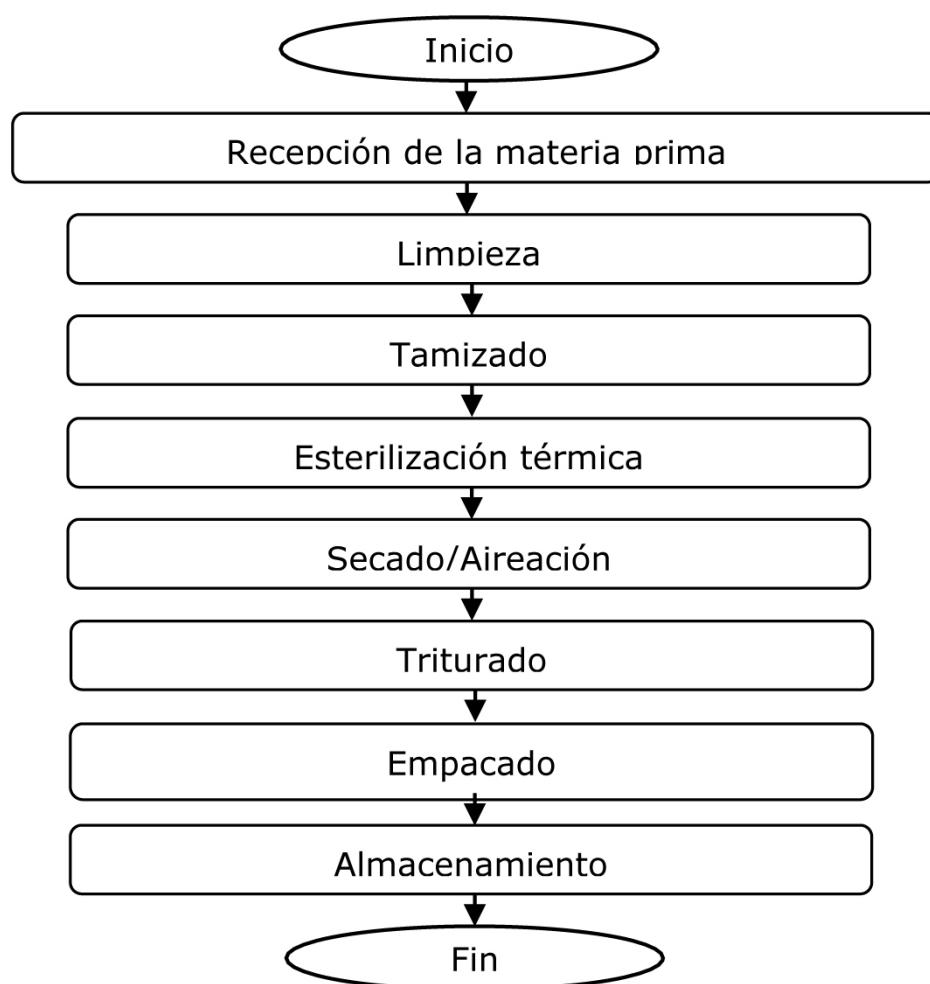


Figura 1. Proceso de elaboración de la infusión de cascarilla de cacao

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Recepción de la materia prima

La cascarilla de cacao utilizada en este estudio fue obtenida en el cantón Ventanas, provincia de Los Ríos, Ecuador. En total, se adquirieron 5 kg de cacao, de los cuales se obtuvieron 918 g de cascarilla tras el proceso de descascarillado.

Limpieza

Antes de preparar la infusión, se inspeccionaron cuidadosamente las cascarillas de cacao para garantizar que no contuvieran impurezas ni residuos extraños. Este paso garantizó la calidad del material y la seguridad del producto final. Además, se seleccionaron solo las cascarillas con mejor aspecto, eliminando cualquier fragmento dañado o decolorado para obtener una infusión limpia y uniforme.

Tamizado de la cascarilla de cacao

La cascarilla de cacao se sometió a un proceso de tamizado para eliminar partículas indeseables y obtener un material uniforme.

Esterilización térmica

Para eliminar cualquier microorganismo presente, la cascarilla de cacao se esterilizó térmicamente en un horno a 100 °C durante dos minutos, garantizando condiciones asépticas durante todo el procedimiento.

Secado y aireación

Luego de la esterilización térmica, la cascarilla fue dejada en reposo a temperatura

ambiente (23 °C) durante aproximadamente cinco minutos, permitiendo la disipación de humedad residual.

Triturado

Para facilitar su consumo en forma de infusión, la cascarilla fue triturada en una licuadora hasta obtener partículas homogéneas de tamaño adecuado.

Pesado, empacado y almacenamiento

El producto final fue cuidadosamente pesado y envasado en fundas de té etiquetadas para su comercialización. Finalmente, los sobres fueron almacenados en un ambiente fresco, seco y ventilado para preservar su calidad y estabilidad.

Variables evaluadas

Propiedades organolépticas

Las propiedades sensoriales de la infusión de cascarilla de cacao (color, aroma, sabor y apariencia) se evaluaron mediante encuestas dirigidas a gerentes de establecimientos comerciales que venden infusiones en la zona de estudio. De una población total de 125 establecimientos, se calculó una muestra representativa de veinte participantes, utilizando un nivel de confianza del 90 % para garantizar resultados significativos. Esta selección proporcionó información confiable sobre la percepción sensorial del producto en el mercado local.

Propiedades fisicoquímicas y microbiológicas

El análisis fisicoquímico y microbiológico se realizó en el laboratorio Multianalityca S. A. en Quito, siguiendo los estándares establecidos en la NTE INEN 2392 para hier-

bas aromáticas. Los parámetros evaluados incluyeron humedad, cenizas insolubles en ácido clorhídrico y la detección de microorganismos como *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Bacillus cereus* y *Clostridium perfringens*. Los métodos empleados fueron los siguientes (ver tabla 1):

Tabla 1.

Principales requisitos fisicoquímicos y microbiológicos observados en el control de infusiones dictados por la NTE INEN 2392 para hierbas aromáticas

Parámetros	Unidad	Método de ensayo
Humedad	%	AOAC 925.10/Gravimetría, Horno de aire
Cenizas insolubles en ácido clorhídrico	%	NTE INEN ISO 930:2014/Gravimetría
Ceniza	%	AOAC 923.03/Gravimetría, horno de aire
<i>Escherichia coli</i>	UFC g^{-1}	AOAC 911.14/Petrifilm
<i>Salmonella</i>	UFC 25g^{-1}	AOAC 2016.01/Detección molecular
<i>Bacillus cereus</i>	UFC g^{-1}	AOAC 980.31/REP.
<i>Clostridium perfringens</i>	UFC g^{-1}	NTE INEN-ISO 7937:2014/REP.

AOAC: Asociación de Químicos Analíticos Oficiales; NTE: Norma Técnica Ecuatoriana; INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización; ISO: Organización Internacional de Normalización; REP.: Recuento en placa.

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Desarrollo de la encuesta

Para la obtención de datos relacionados con la percepción de los consumidores sobre la infusión elaborada a partir de cascarilla de cacao, se diseñó y aplicó una encuesta estructurada con preguntas cerradas de opción múltiple. La encuesta fue dirigida a una muestra representativa de personas adultas de di-

ferentes rangos etarios, residentes del cantón Ventanas, quienes participaron voluntariamente en la degustación del producto.

El instrumento fue aplicado de manera presencial, posterior a la presentación del producto, asegurando que los encuestados pudieran emitir una opinión basada en la experiencia directa con la infusión. El propósi-

to de esta encuesta fue evaluar el nivel de conocimiento previo sobre el uso de la cascarilla de cacao, la frecuencia de consumo de infusiones, la percepción organoléptica del producto, así como la aceptación e intención de compra. A continuación, se presenta la tabla con las preguntas utilizadas en el cuestionario (ver tabla 2):

Tabla 2.

Preguntas de la encuesta sobre la percepción del consumidor respecto a la infusión de cascarilla de cacao

N.º	Pregunta	Tipo de respuesta
1	¿Cuál es su género?	Masculino / Femenino
2	¿Con qué frecuencia consume infusiones o té?	Diario / Semanal / Mensual / Esporádico
3	¿Conoce usted que la cascarilla de cacao puede utilizarse en la elaboración de infusiones?	Sí / No
4	¿Cómo califica la concentración del sabor en la infusión que probó?	Débil / Adecuada / Intensa
5	¿Estaría dispuesto(a) a consumir nuevamente esta infusión?	Sí / No
6	¿Recomendaría este producto a otras personas?	Sí / No

Nota. La tabla presenta las preguntas aplicadas en la encuesta utilizada para evaluar la percepción de los encuestados sobre la infusión elaborada a base de cascarilla de cacao, considerando aspectos como el perfil del consumidor, conocimiento del subproducto, características organolépticas y nivel de aceptación.

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Análisis económico

Para evaluar la viabilidad económica de la producción de infusión de cascarilla de cacao, se calcularon indicadores financieros clave:

Punto de equilibrio (PE), determinado mediante la relación entre costos fijos, costos variables y precio de venta unitario.

Valor Actual Neto (VAN), evaluando la rentabilidad del proyecto a través del flujo de caja descontado.

Tasa Interna de Retorno (TIR), estimada para conocer la rentabilidad relativa de la inversión.

Relación Beneficio/Costo (B/C), obtenida al comparar los ingresos por ventas con los costos totales de producción.

Procedimiento experimental

Dado que no se implementó un diseño experimental clásico, se optó por un análisis estadístico descriptivo. Se emplearon tablas

de frecuencia y gráficos para representar los resultados obtenidos. Además, se realizaron análisis de regresión y correlación para evaluar la relación entre las propiedades sensoriales de la infusión y la percepción de los consumidores. El procesamiento de datos se llevó a cabo utilizando Microsoft Excel 2019 y el *software* estadístico SPSS versión 25.0.0.

Materiales y equipos utilizados

Para la realización de este estudio, se emplearon los siguientes materiales y equipos (ver tabla 3):

Tabla 3.

Descripción de los materiales y equipos utilizados en el estudio

Materiales	Equipos	Marca/Modelo	País
Mesas	Balanza eléctrica	Kretz / Novel Eco2 31kg	Ecuador
Bandejas	Descascaradora de cacao	IKA / MF10	Ecuador
Bolsas de papel Kraft	Horno microondas	Panasonic, NN-SN686S	Japón
Fundas de té	Selladora al vacío	HENKEL, VC-300	Alemania
Mandil, cofia, guantes	Licuadora	Oster, BLSTMG-WBG	Ecuador

Nota: La tabla detalla los materiales y equipos empleados para el desarrollo del proceso de aprovechamiento de la cascarilla de cacao, desde la manipulación higiénica hasta la elaboración de la infusión en la microempresa.

Fuente: (Intriago et al., 2026)

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis fisicoquímico y microbiológico

En la tabla 4 se presentan los resultados del análisis fisicoquímico de la infusión a base de cascarilla de cacao. El contenido de humedad (4,14 %) y ceniza (5,48 %) se ubicó por debajo del 6 %, mientras que las cenizas

insolubles en HCl (0,07 %) fueron inferiores al 1 %. Estos valores se consideran adecuados para este tipo de productos, ya que permiten preservar la calidad del material y reducir el riesgo de proliferación de microorganismos asociados a niveles elevados de humedad (ver tabla 4).

Tabla 4.

Resultados del análisis fisicoquímico para la infusión de base de cascarilla de cacao

Parámetros	Contenido (%)
Humedad	4,14
Ceniza	5,48
Cenizas insolubles en HCl	0,07

Fuente: (Intriago et al., 2026)

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis microbiológico de la infusión elaborada a partir de cascarilla de cacao. Se observó que la presencia de *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* y *Clostridium perfringens* fue inferior a 10 UFC g⁻¹, mientras que *Salmonella* spp. no fue detectada en 25 g de mues-

tra. Conforme a lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 3292:2004 para bebidas a base de hierbas aromáticas, estos valores no representan un riesgo biológico para la salud del consumidor, por lo que el producto puede considerarse inocuo en los parámetros evaluados (ver tabla 5).

Tabla 5.

Resultados del análisis microbiológico para la infusión de base de cascarilla de cacao

Parámetros	Contenido
Escherichia coli (UFC g-1)	<10
Salmonella spp. (UFC 25 g-1)	Ausencia
Bacillus cereus (UFC g-1)	<10
Clostridium perfringens (UFC g-1)	<10

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Percepción de los encuestados sobre el producto

Como se observa en la figura 2, la mayoría de los encuestados fueron de género masculino, representando el 60 % de la muestra, mientras que el 40 % restante correspondió a personas de género femenino.

En cuanto a la frecuencia de consumo de infusiones, se identificó que el 50 % de los participantes consume este tipo de bebidas semanalmente. Por otro lado, el 20 % indicó que su consumo es esporádico, mientras que el 30 % restante se dividió en dos grupos iguales: 15 % que consume diariamente y 15 % que lo hace de manera mensual.

Respecto al conocimiento sobre el uso de la cascarilla de cacao en la producción de subproductos, se evidenció que un 70 % de los encuestados desconoce su potencial aprovechamiento, mientras que solo un 30 % manifestó estar informado al respecto.

En relación con la percepción sobre la concentración de cascarilla de cacao en la infusión, la mayoría de los participantes (80 %) consideró que la intensidad es adecuada,

mientras que un 15 % la percibió como intensa y un 5 % la catalogó como débil.

Finalmente, se identificó una total aceptación del producto, ya que el 100 % de los encuestados manifestó su disposición a consumir la infusión a base de cascarilla de cacao. Además, el 100 % también expresó su interés en recomendar la compra del subproducto para su elaboración (ver figura 2).

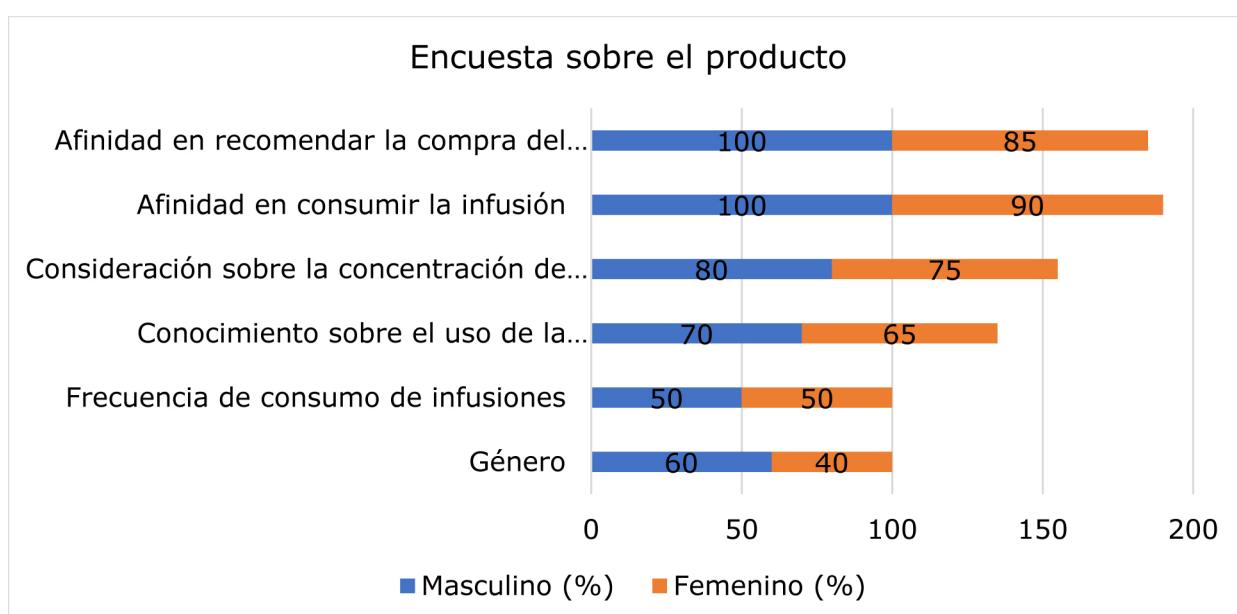


Figura 2. Resultados de la encuesta sobre la aceptación de la infusión de cascarilla de cacao

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Grado de aceptación sobre las propiedades organolépticas

La figura 3 muestra la relación entre el contenido del sobre y el grado de aceptación del color (A), el olor (B), el sabor (C) y el aspecto (D) de la infusión de cascarilla de cacao. Para todos los parámetros evalua-

dos, se observó una relación directamente proporcional con el contenido de la bolsita, con coeficientes de correlación entre 0,794 y 0,866. Esto indica que el contenido de la bolsita está relacionado en un 79,4 % a un 86,6 % con las propiedades de color, olor, sabor y aspecto de la infusión (ver figura 3).

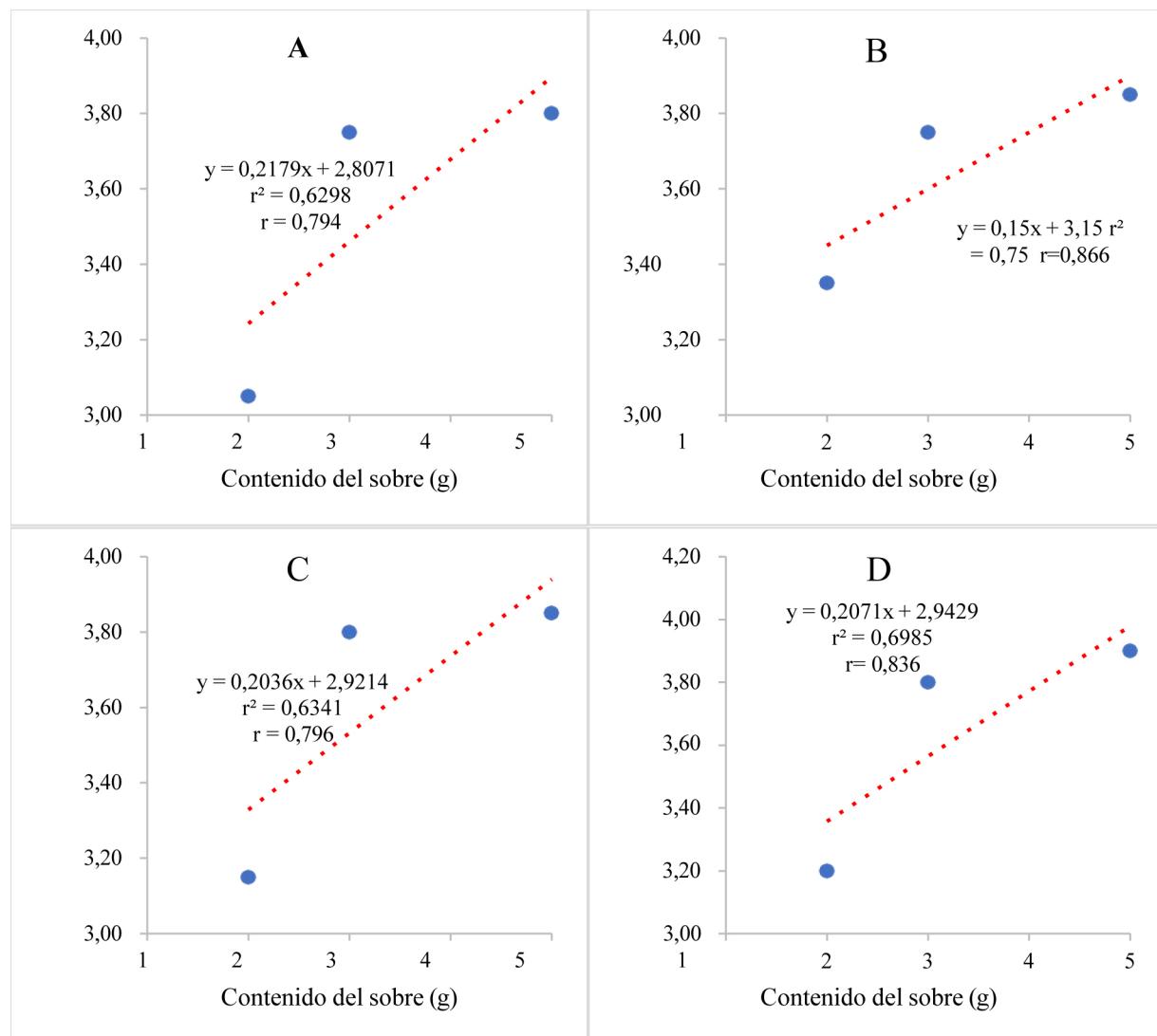


Figura 3. Correlación entre el contenido del sobre y el grado de aceptación del color (A), olor (B), sabor (C) y apariencia (D) de la infusión de la infusión a base de cascarilla de cacao

Fuente: (Intriago et al., 2026)

Análisis económico

La tabla 6 muestra el costo fijo asociado a la producción del producto objeto de estudio, que asciende a 578,40 dólares. La mayor parte de este costo se destina a la compra de la máquina descascarilladora de cacao, que representa el 69,16 % del costo fijo total. Este análisis económico está directamente rela-

cionado con el desarrollo de la infusión y los resultados del análisis fisicoquímico, ya que la inversión en equipos y materiales garantiza que el producto tenga las características de calidad necesarias en términos de color, sabor, aroma y contenido de compuestos bioactivos. Por lo tanto, la eficiencia económica está relacionada con la capacidad de producir una infusión que cumpla con los

parámetros fisicoquímicos deseados, lo que garantiza tanto la viabilidad financiera como

la aceptación del producto por parte de los consumidores (ver tabla 6).

Tabla 6. Costo fijo para la producción para la venta de la infusión de base de cascarilla de cacao, Los Ríos, Ecuador 2024

Rubros	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Mesas	2	15,00	30,00
Bandejas	4	4,80	19,20
Balanza eléctrica	1	28,00	28,00
Descascarilladora de cacao	1	400,00	400,00
Licuadora	1	60,00	60,00
Selladora al vacío	1	30,00	30,00
Cedazo metálico	2	5,60	11,20
Cucharón de metal	2	4,50	9,00
Mandil	1	18,00	18,00
Total			578,40

Fuente: (Intriago et al., 2026)

El costo variable mostrado en la tabla 7, considerando la producción de 700 sobres para la infusión a base de cascarilla de cacao, asciende a \$ 147,30, de los cuales el costo

conjunto entre la materia prima y los empaques del producto representan el 57,03% del mencionado costo (ver tabla 7).

Tabla 7.

Costos variables para la producción para la venta de la infusión de base de cascarilla de cacao, Los Ríos, Ecuador 2024

Rubros	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (\$)
Materia prima	35	1,20	42,00
Empaques	700	0,06	42,00

Rubros	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (\$)
Etiquetas	700	0,04	28,00
Mano de obra	2	15,00	30,00
Guantes	2	0,15	0,30
Energía eléctrica	1	5,00	5,00
Costo variable total			147,30

Fuente: (Intríago et al., 2026)

En la tabla 8 se presenta el estado de resultados para la inversión analizada, pudiéndose apreciar que, en el primer mes de la inversión, no se tiene ganancia, mientras que a partir del segundo mes se obtiene una

utilidad constante de \$ 134,00 durante el primer año de inversión. Esta ganancia podría maximizarse al incrementarse las unidades producidas durante el periodo de estudio.

Tabla 8.

Estado de resultados de la producción para la venta de la infusión de base de cascarilla de cacao durante el primer año de inversión, Los Ríos, Ecuador 2024

Meses	Unidades elaboradas	Precio de venta (USD)	Ingresos por venta (USD)	Costo Fijo (USD)	Costo variable (USD)	Utilidad (USD)
Ene.	14 000	0,22	3080	578,40	2946,00	-444,40
Feb.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Mar.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Abr.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
May.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Jun.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Jul.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Ago.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Sep.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00

Meses	Unidades elaboradas	Precio de venta (USD)	Ingresos por venta (USD)	Costo Fijo (USD)	Costo variable (USD)	Utilidad (USD)
Oct.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Nov.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00
Dic.	14 000	0,22	3080		2946,00	134,00

Fuente: (Intriago et al., 2026)

En la tabla 9 se presentan los valores de cada uno de los indicadores económicos considerados para la evaluación económica de la inversión en el producto en estudio. Se obtuvo una relación B/C de 1,03, lo que se significa que por cada dólar invertido se ob-

tiene una ganancia de \$ 0,03. El análisis del punto de equilibrio reflejó que, para comenzar a obtener ganancia en la inversión realizada, es necesario producir más de 60 429 sobres para la elaboración de la infusión a base de cascarilla de cacao (ver tabla 9).

Tabla 9.

Indicadores económicos de la producción para la venta de la infusión de base de cascarilla de cacao durante el primer año de inversión, Los Ríos, Ecuador 2024

Indicadores/Rubros	Valores (USD)
Costo fijo	578,40
Costo variable unitario	0,21
Precio	0,22
Punto de equilibrio	60429
VAN	\$251,11
TIR	28 %
B/C	1,03

Fuente: (Intriago et al., 2026)

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten identificar que el producto elaborado a base de cascarilla de cacao para la preparación de infusión, presenta valores adecuados de humedad, ceniza y cenizas solubles en HCl, por lo que no representa un riesgo para el consumidor, de acuerdo con estos parámetros, y a la vez el contenido de humedad tienda a ser adecuado, de manera que se evitaría la proliferación de agentes microbianos, sin embargo, según Baldera et al. (2021), es posible explorar métodos o técnicas de fabricación que puedan asegurar la obtención de niveles de humedad significativamente menores, por lo que Diaz et al. (2025) recomiendan el estudio progresivo de la fabricación de infusones a partir de diferentes derivados.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con lo reportado por Teneda et al. (2019) y Matute et al. (2022) que pudieran ayudar a prevenir el estrés oxidativo, es un reto para la comunidad científica. *Solanum betaceum* Cav y *Theobroma cacao* L, son materias primas endémicas de Ecuador, a las que se les atribuye propiedades antioxidantes asociadas, fundamentalmente, a su contenido en compuesto fenólicos. El estudio tuvo como objetivo, diseñar una bebida a base de tomate de árbol con cascarilla de cacao, para obtener un alimento sensorialmente aceptado y con propiedades antioxidantes. Las formulaciones a evaluar se plantearon mediante un diseño de bloques, considerando como variable respuesta, la aceptación sensorial y como variables independientes tres niveles de cascarilla y goma xantana. La formulación de mayor acepta-

ción (I, quienes, al elaborar infusiones a base de cascarilla de cacao, determinaron que los valores de humedad y cenizas se encuentran dentro de rangos aceptables para garantizar la estabilidad del producto, coincidiendo con la presente investigación. De manera similar, Vásquez et al. (2024) evidenciaron que la baja carga microbiana en este tipo de infusiones cumple con la normativa vigente, ratificando que su consumo no representa riesgos para la salud. No obstante, nuestros hallazgos discrepan parcialmente con los de Diaz et al. (2025), quienes sugieren la necesidad de aplicar procesos de secado más prolongados para reducir aún más la humedad, mientras que en este caso se alcanzaron niveles adecuados con procesos estándar de secado.

La humedad es un factor que interviene en el desarrollo de microorganismos que deterioran el producto; en lo que se refiere a la temperatura del aire de secado, también afecta en las características organolépticas Rodríguez-Silva et al. (2023), por ende mientras menor sea el porcentaje de humedad, menor es la probabilidad de desarrollo de microorganismos. De igual manera, el tiempo y el espesor del producto son factores que influyen en la aceptabilidad del producto final, en donde la principal característica es preservar el aroma de la materia prima utilizada Collazos (2017).

Por otra parte, el análisis microbiológico realizado puso en evidencia que la presencia de *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Bacillus cereus* y *Clostridium perfringens*, no fue significativa, y al ajustarse a la Norma

Técnica Ecuatoriana INEN-3292, Segunda Revisión, de abril del 2004, la cual describe los requisitos para bebidas elaboradas a partir de hierbas aromáticas, Los valores de UFC de los microorganismos determinados en este estudio catalogan al producto elaborado como seguro para el consumidor, sin riesgos asociados a su consumo. Estos resultados coinciden con los reportados por Teneda et al. (2019), Matute et al. (2022) que pudieran ayudar a prevenir el estrés oxidativo, es un reto para la comunidad científica. *Solanum betaceum* Cav y *Theobroma cacao* L, son materias primas endémicas de Ecuador, a las que se les atribuye propiedades antioxidantes asociadas, fundamentalmente, a su contenido en compuesto fenólicos. El estudio tuvo como objetivo, diseñar una bebida a base de tomate de árbol con cascarilla de cacao, para obtener un alimento sensorialmente aceptado y con propiedades antioxidantes. Las formulaciones a evaluar se plantearon mediante un diseño de bloques, considerando como variable respuesta, la aceptación sensorial y como variables independientes tres niveles de cascarilla y goma xantana. La formulación de mayor aceptación (I y García et al. (2025), quienes evaluaron diferentes subproductos derivados de la cascarilla de cacao, como harina, polvo e infusión, y concluyeron que no representan peligros para los consumidores. De igual manera, Vásquez et al. (2024) destacan que dichos subproductos pueden consumirse con fines de aprovechar sus propiedades beneficiosas para la salud. Es preciso indicar que, considerando que las muestras provienen de una procesadora de cacao que sigue buenas prácticas de manu-

factura (BPM), lo recomendable es controlar y monitorear las condiciones de cultivo, poscosecha y almacenaje de las semillas, es decir las buenas prácticas agrícolas (BPA) Diaz et al. (2025).

La cascarilla de cacao se ha convertido en un punto de acceso a la experimentación de nuevas tendencias (Alcívar et al., 2019), ya que en el país no se encuentra con facilidad información científica sobre este producto porque es considerado como un residuo (Vera-Rodríguez et al., 2021) escasamente aprovechado tanto en la industria como artesanalmente (Diaz et al., 2025). Al analizarse la percepción de los consumidores sobre el producto presentado en este estudio, se pudo contrastar que tiene una agradecida considerable, a la vez que les gustó su sabor. Estos hallazgos reflejan que es viable la producción de este subproducto a base de cascarilla de cacao para la elaboración de infusiones, debido a que los encuestados expresaron su afinidad hacia el mismo (Intriago et al., 2025).

Finalmente, el análisis de color, olor, sabor y apariencia de la infusión en función de la cantidad de subproducto a base de cascarilla de cacao por sobre, demuestra que, a mayor contenido del sobre, la percepción de los consumidores acerca de los parámetros descritos para esta infusión mejora considerablemente. Sin embargo, no se debe exceder del contenido que se ofrece por cada unidad, puesto que, según Oré et al. (2022), adicionar contenidos excesivos de productos para la elaboración de infusiones o té, daña su sabor. Es por ello que Rodríguez-Silva et al. (2023) acotan que previo a la distribución

masiva al mercado objetivo, se deben hacer los estudios correspondientes de aceptabilidad, para de esta manera garantizar que el consumidor potencial tenga una buena percepción del producto, lo que aportaría a su consumo frecuente.

Todos los indicadores considerados para la evaluación económica mostraron valores positivos, lo que reflejó que la inversión es viable; sin embargo, la utilidad se podría potenciar al incrementar la producción de

los sobres para la infusión en estudio, lo que concuerda con González-Alejo et al. (2019), quienes sostienen que la viabilidad económica de los derivados de subproductos de la actividad cacaotera se incrementa al aumentarse el volumen de producción, por lo que es importante definir el procesamiento idóneo y eficiente de los mismos, de manera que no existan pérdidas de tiempo durante su elaboración.

4 CONCLUSIONES

Los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados se enmarcaron dentro del rango máximo permitido para el consumo humano, según la norma NTE INEN 2392, en su segunda revisión de abril del 2017.

Las personas encuestadas mostraron un alto grado de aceptación en el consumo y promoción del producto en estudio, de manera que en su mayoría manifestaron que la presencia o concentración de cascarilla de cacao es justa (80 %), y quienes mayoritariamente consumen infusiones de manera semanal (50 %).

El incremento del contenido del producto final en el sobre para la elaboración de la infusión de base de cascarilla de cacao mostró una influencia directa en el color, olor, sabor y apariencia de la bebida.

Los indicadores económicos determinados reflejan que la inversión en la elaboración del producto a ofertarse es viable, puesto que se obtuvieron resultados positivos para cada indicador, teniéndose que a partir de la elaboración de 60 430 unidades se comienza a obtener rentabilidad.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original. Adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura, revisión y edición.

Autor 1: investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Autor 2: logística, revisión y edición.

Autor 3: análisis de datos, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Manabí por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación. Su contribución ha

sido fundamental para la ejecución del estudio, al proporcionar los recursos y el respaldo académico necesario para llevarlo a cabo.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Alcívar, U., Burgos, G., Mesías, P. y Vinces, J. (2019). Estandarización de principios activos a partir de cascarilla de cacao con fines de industrialización farmacéutica. *Revista Centro Azúcar*, 46. <https://www.researchgate.net/publication/339351062>

Baldera, J., Granda, M. y Chavez, S. (2021). Capacidad antioxidante y polifenoles totales de infusión de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao*) y macambo (*Theobroma bicolor*). *Revista de Investigación de*

Agroproducción Sustentable, 5(3), 13-19. <https://doi.org/10.25127/aps.20213.814>

Collazos, M. (2017). Cascarilla del grano de cacao (*Theobroma cacao L.*) en raciones de crecimiento, acabado para cerdos. *Revista científica Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 4(1). <https://doi.org/10.26495/icti.v4i1.537>

Díaz, E., Andrea, D. y Lara, C. (2025). *Evaluación de métodos de injertación en cacao *Theobroma cacao L.* bajo condiciones*

*del patrón en etapa de vivero. Evaluation of grafting methods in cocoa *Theobroma cacao* L. under rootstock conditions in the nursery stage.* 30(1), 24-34.

García, R., Guevara, Lady, Tigre, A., Hachi, M., Pérez, P. y Bayas, F. (2025). Aislamiento y caracterización de *Acetobacter aceti* a partir de mucílago de cacao (*Theobroma cacao* L.) y su aplicación en la agroindustria. *Revista Ciencia UNEMI*, 18(September), 27-37. <https://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/2187>

González-Alejo, F., Barajas-Farnández, J. y García-Alamilla, P. (2019). Extracción de compuestos solubles de la cascarilla de cacao con CO₂ supercrítico. Caso de metilxantinas y grasa. *CienciaUAT*, 13(2), 128-140. <https://doi.org/10.29059/cientiauat.v13i2.1073>

Intriago Flor, F. G., Rodríguez Carranza, A. J., Alvarado Vásquez, K. E., y Sánchez Macias, E. I. (2025). Evaluación sensorial y aceptabilidad de una bebida funcional elaborada a partir de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agrosilvicultura Y Medioambiente*, 3(1), 16–28 <https://revistas.unesum.edu.ec/agricultura/index.php/ojs/article/view/50>

Matute, N., Campo, M., Vivanco, E., Escobar, W. y Bravo, V. (2022). Diseño de una bebida a base de *Solanum betaceum* Cav. (tomate de árbol) y cascarilla de *Theobroma cacao* L (cacao). *Ciencia Unemi*, 15(40), 122-132. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol15iss40.2022pp122-132p>

Oré, L., Silva, C. y Loarte, W. (2022). Producción de biocarbón a partir de la cáscara de

Theobroma cacao L., cascarilla de *Oryza sativa* y *Coffea arabica*. *Qantu Yachay*, 2(2), 68-80. <https://doi.org/10.54942/qantuyachay.v2i2.31>

Ortiz, J., Maza, R., Sotelo, D., Flórez, D. y Cely, D. (2023). Efecto de la suplementación a base de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao*) sobre la producción y calidad composicional de la leche en vacas mestizas en pastoreo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(2), 171-188. <https://doi.org/10.22490/21456453.6500>

Rodríguez-Silva, L. G., Quintana-Fuentes, L. F., Coronado-Silva, R. A., García-Jerez, A., Báez-Daza, E. Y. y Agudelo-Castañeda, G. A. (2023). Caracterización física y sensorial de 24 genotipos especiales de cacao *Theobroma cacao*. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 26(1), 1-11. <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2410>

Sangronis, E., Soto, M. J., Valero, Y. y Buscema, I. (2021). Cascarilla de cacao Venezolano como materia prima de infusiones. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 64(2), 123-130. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0004-06222014000200007&script=sci_abstract

Teneda, W., Guamán, M. y Oyaque, S. (2019). Exploración de la intención de consumo de la Cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) como infusión: caso Tungurahua-Ecuador. *Cuadernos de Contabilidad*, 20(50), 1-14. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cc20-50.eicc>

Teneda, W., Guamán, M. & Oyaque, S. (2022). Factores determinantes del con-

sumo de infusión de la Cascarilla de Cacao (*Theobroma cacao L.*): Caso Tungurahua-Ecuador. *Revista Científica Ciencia y Tecnología*, 19(22). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8591714&orden=0&info=link>

Vásquez, A. M., Quintero Escobar, C. A., Trujillo Capera, J. E. y Perdomo Falla, E. F. (2024). Aprovechamiento de subproducto del cacao para la elaboración de galletas. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 4(1), 79-85. https://www.researchgate.net/publication/382141464_Aprovechamiento_de_subproducto_del_cacao_para_la_elaboracion_de_galletas

Vera-Rodríguez, J., Jiménez, W., Naula, M., Villa, U., Zaruma, F., Montecé, G., Cabrera, W., Zambrano, F. y Astudillo, C. (2021). Residuos de la producción de cacao (*Theobroma cacao L.*) como alternativa alimenticia para rumiantes. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 13(2), e839. <https://doi.org/10.24188/recia.v13.n2.2021.839>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

**Área Agrícola**

Fecha recibido: 05-04-2025

Fecha aceptado: 29-09-2025

DOI: 10.22490/21456453.9621

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CASCARILLA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) PARA LA ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN EN LA MICROEMPRESA DE CHOCOLATES FUENTES

Citación: Intriago-Flor, F. G., Viteri-Castro, L. M., Alvarado-Vásquez, K. E. (2026). Aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la elaboración de una infusión en la microempresa de chocolates Fuentes - Anexos. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.9621>

ANEXOS

E laboración de la infusión con cascarilla de cacao



APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CASCARILLA DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) PARA
LA ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN EN LA MICROEMPRESA DE CHOCOLATES FUENTES
Intriago, F., Viteri, C., Alvarado, Vásquez.





Fecha de recibido: 10-06-2025

Fecha de aceptado: 05-09-2025

DOI: 10.22490/21456453.9980

MARCADORES MOLECULARES Y DIVERSIDAD GENÉTICA EN CONEJOS: HERRAMIENTAS PARA LA MEJORA Y CONSERVACIÓN

MOLECULAR MARKERS AND GENETIC DIVERSITY IN RABBITS: TOOLS FOR IMPROVEMENT AND CONSERVATION

Karen Daniela Sandoval Chila ¹

Camila Andrea Lozada González ²

Martha Lucía Posada Buitrago ³

Citación: Sandoval Chila, K. D., Lozada González, C. A., Posada Buitrago, M. L. (2026). Marcadores moleculares y diversidad genética en conejos: herramientas para la mejora y conservación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 119 – 149. <https://doi.org/10.22490/21456453.9980>

¹ Bacterióloga y laboratorista clínica. Grupo Ceparium, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia kdsandoval@universidadmayor.edu.co

² Bacterióloga y laboratorista clínica. Grupo Ceparium, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia clozada@universidadmayor.edu.co

³ Doctora en Ciencias Biológicas. Docente investigadora. Grupo Ceparium, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia mlposada@universidadmayor.edu.co

RESUMEN

Contextualización: La diversidad genética en conejos es un componente fundamental para asegurar la salud poblacional y optimizar parámetros productivos. Esta variabilidad reduce el riesgo de enfermedades vinculadas a la homocigosidad de alelos recesivos y mejora la calidad de la canal. A nivel global, países como China, Italia, España y Francia lideran la producción cunícola, mientras que en América Latina su consumo y producción siguen siendo reducidos. Por sus características nutricionales, alto contenido proteico, bajo nivel de colesterol y aporte de vitaminas y minerales, la carne de conejo representa una opción saludable frente a otras proteínas animales.

Vacío de conocimiento: Pese al creciente cuerpo de literatura, persisten vacíos importantes relacionados con la cobertura geográfica y la representación de razas. La mayoría de los estudios se han realizado en Europa, Asia y África del Norte, con escasa información procedente de América, África Subsahariana y Oceanía. Asimismo, existe una tendencia hacia el estudio de razas comerciales, en detrimento de las locales o criollas, cuya diversidad genética y adaptabilidad siguen siendo poco exploradas. Esta situación limita la comprensión integral del patrimonio genético del conejo.

Propósito: Realizar una revisión sistemática de las técnicas moleculares más utilizadas en el análisis de diversidad genética en conejos, con el fin de identificar las metodologías más efectivas para fortalecer la producción cunícola sostenible.

Metodología: Se llevó a cabo una revisión sistemática de artículos disponibles en bases de datos especializadas como PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se aplicaron criterios de inclusión definidos previamente, y los datos extraídos fueron organizados y analizados de forma descriptiva. Para la presentación gráfica se emplearon herramientas como Excel y Canva.

Resultados y conclusiones: Los resultados muestran una predominancia en el uso de microsatélites, seguidos de ADN mitocondrial, SNP, WGS y, en menor medida, marcadores dominantes como ISSR, SCoT y AFLP. Se concluye que, aunque surgen nuevas técnicas, los microsatélites continúan siendo los más aplicados en estudios de genética poblacional en conejos.

Palabras clave: Diagnóstico molecular, diversidad biológica, microsatélites, *Oryctolagus cuniculus*, recursos genéticos.

ABSTRACT

Contextualization: Genetic diversity in rabbits is a fundamental component for ensuring population health and optimizing productive traits. This variability reduces the risk of diseases associated with the homozygosity of harmful recessive alleles and improves carcass quality. Globally, countries such as China, Italy, Spain, and France lead rabbit production, while in America, both consumption and production remain limited. Due to its nutritional properties high protein content, low cholesterol levels, and significant contributions of vitamins and minerals rabbit meat represents a healthy alternative to other animal protein sources.

Knowledge gap: Despite the growing body of literature, important gaps remain in terms of geographic coverage and breed representation. Most studies have been conducted in Europe, Asia, and North Africa, with limited information from the Americas, Sub-Saharan Africa, and Oceania. Furthermore, there is a tendency to focus on commercial breeds, to the detriment of local or breeds, whose genetic diversity and adaptability are still poorly explored. This situation limits a comprehensive understanding of the genetic heritage of rabbits.

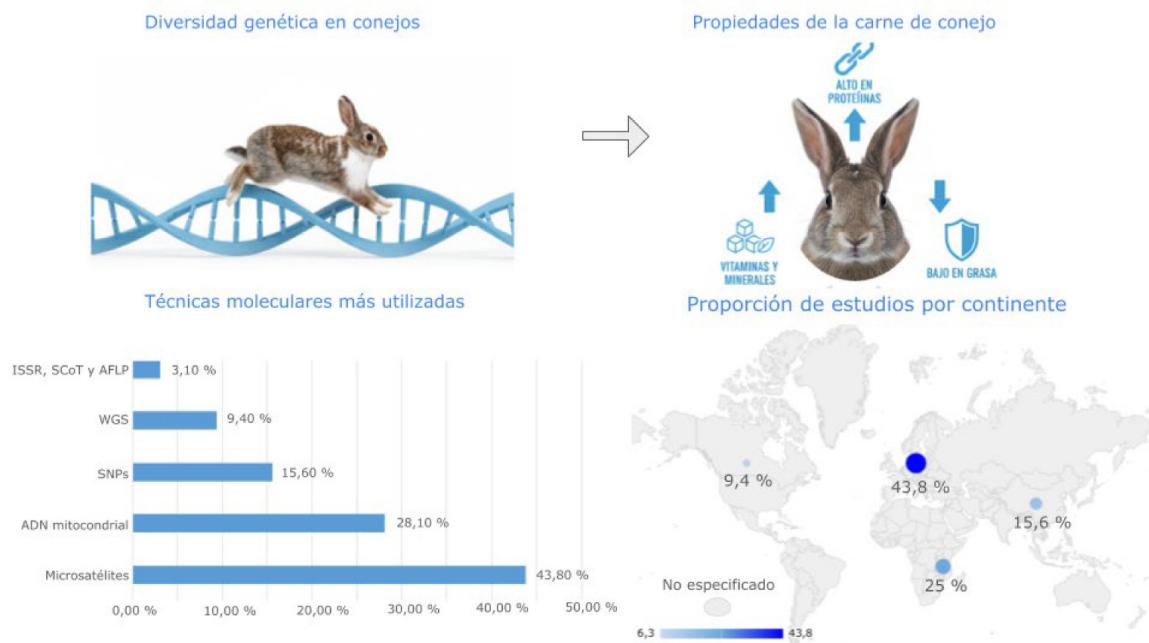
Purpose: Conduct a systematic review of the most widely used molecular techniques for analyzing genetic diversity in rabbits, in order to identify the most effective methodologies for strengthening sustainable rabbit production.

Methodology: A systematic review of articles available in specialized databases such as PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar was carried out. Predefined inclusion criteria were applied, and the extracted data were organized and analyzed descriptively. Excel and Canva were used for the graphical presentation of results.

Results and conclusions: The results show a predominance in the use of microsatellites, followed by mitochondrial DNA, SNPs, WGS, and, to a lesser extent, dominant markers such as ISSR, SCoT, and AFLP. It is concluded that, although new techniques are emerging, microsatellites continue to be the most widely applied markers in population genetics studies in rabbits.

Keywords: Molecular diagnostics; biological diversity; microsatellites; *Oryctolagus cuniculus*; genetic resources

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: elaboración propia

1 INTRODUCCIÓN

La producción y la conservación de conejos han cobrado relevancia a nivel mundial (Cullere et al., 2018). En la base de datos estadística de la FAO (FAOSTAT) sobre alimentación y agricultura que gestiona la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para el 2023 se estimó que alrededor de 482 millones de conejos, incluyendo liebres, fueron sacrificados globalmente, produciendo alrededor de 681 995 toneladas de carne. Por continentes, la mayor producción mundial de carne de conejo y liebre se concentró en Asia, con un 61 % (416 014 toneladas), liderada ampliamente por China, que representó el 38,5 % del total global. En segundo lugar se ubicó Europa, con el 20,6 % (140 373

toneladas), donde Portugal destacó como principal exportador, seguido por los Países Bajos, mientras que Bélgica fue el mayor importador. En tercer lugar, se situó África, con un 16,2 % (110 761 toneladas) y, finalmente, América con apenas un 2,2 % (14 847 toneladas) (FAO, 2025). Estos datos muestran que en América la carne de conejo no forma parte del consumo habitual, en contraste con el nivel de consumo en Asia y Europa.

Esto representa una oportunidad de mercado emergente en América, teniendo en cuenta que la carne de conejo es una opción saludable por su alto contenido de proteínas, bajo nivel de grasa y colesterol, y su riqueza en vitaminas del complejo B y minerales

como fósforo, hierro y selenio. Además, su producción también es más sostenible que la de otros tipos de carne, lo que la convierte en una alternativa responsable y nutritiva (Etukudo et al. 2024; Goswami et al., 2025).

La creciente demanda de carne de conejo representa tanto oportunidades como desafíos para la cunicultura sostenible. Entre los principales retos están la adaptación a distintos entornos, la viabilidad económica y la pérdida de diversidad genética por la selección intensiva. En este contexto, la consanguinidad afecta de forma directa e indirecta la producción, al reducir la variabilidad genética y aumentar la expresión de alelos recesivos dañinos, lo que provoca depresión endogámica, con efectos negativos sobre la salud, la reproducción y, en consecuencia, sobre la productividad y sostenibilidad del sistema (Alves et al., 2019; Hardy et al., 1994; Monnerot et al., 1996; Nagy & Nguyen, 2023; Ziege et al., 2020). Estos factores, combinados con la presión ambiental y las enfermedades emergentes, requieren de un enfoque innovador que integre avances en genética, adaptabilidad ecológica y sostenibilidad económica para garantizar una producción eficiente y duradera. Existen diferentes técnicas para la determinación de la diversidad genética en conejos, las cuales ayudan a determinar la consanguinidad, el crecimiento del conejo, la calidad de la canal, entre otros, lo que orienta hacia una producción cúnico-la sostenible y de calidad, sin recurrir a prácticas de selección intensiva que reduzcan la diversidad genética y productiva (Chantry-Darmon et al., 2005; Queney et al., 2001; Vicente et al., 2001).

Los estudios de genética de poblaciones en conejos han avanzado notablemente con la incorporación de técnicas moleculares (Surridge et al., 1997), sin embargo, no existe hasta el momento una revisión que analice la efectividad y comparación de estas metodologías aplicadas a conejos; por otro lado, estas técnicas permiten investigar la diversidad genética, la cual no solo representa un insumo técnico para la caracterización poblacional, sino que también constituye una herramienta estratégica para optimizar la selección, prevenir enfermedades asociadas a la consanguinidad y orientar esquemas de conservación (Ziege et al., 2020). En conejos, cuya domesticación ha sido documentada como un proceso reciente y con patrones filogeográficos aún conservados en poblaciones actuales (Branco et al., 2000; Branco et al., 2002), el conocimiento de la estructura genética permite definir estrategias reproductivas ajustadas a cada contexto, favorecer la preservación de líneas locales y sustentar decisiones sanitarias o productivas con base en evidencia genética.

En el conejo, se han utilizado diversos marcadores genéticos como microsatélites, polimorfismos de un solo nucleótido (SNP), ADN mitocondrial y secuenciación de genoma completo (WGS), además de marcadores dominantes como repeticiones intersecuenciales simples (ISSR), amplificación de fragmentos polimórficos al azar (AFLP), entre otros; estas herramientas son esenciales para la gestión de la diversidad genética, un factor determinante para garantizar el desarrollo a largo plazo de la cunicultura. La importancia de los marcadores moleculares incrementa al aplicarse en poblaciones loca-

les y criollas, donde contribuyen a su conservación, valorización y aprovechamiento productivo, ya que, a diferencia de las razas comerciales, las razas locales y criollas tienen una variabilidad genética única que les permite adaptarse a ambientes específicos y a sistemas de producción de bajos insumos. Esta adaptación, o arraigo, confiere a estas poblaciones una mayor capacidad de respuesta frente a desafíos como la aparición de nuevas enfermedades o las presiones del cambio climático (Ayyat et al., 2024; Ballan et al., 2022a; Ren et al., 2019). El análisis de la diversidad genética, en este contexto, permite identificar la variabilidad genética dentro y entre las poblaciones, detectar la presencia de genes o variantes genéticas únicas de una raza y estimar el nivel de diferenciación genética; en este sentido, existe una relación entre el uso de marcadores moleculares y la sostenibilidad en la producción cúnícola que radica en que conocer y gestionar la va-

riabilidad genética permite seleccionar animales más resistentes a enfermedades, con mejor adaptación a condiciones ambientales cambiantes y con un aprovechamiento más eficiente de los recursos. Esto reduce la dependencia de insumos externos, disminuye pérdidas productivas y favorece sistemas de cría más rentables, consolidando así la sostenibilidad a largo plazo de la cunicultura (Badr et al., 2019; Li et al., 2020).

El presente artículo de revisión tiene como objetivo realizar una descripción general del uso de marcadores moleculares para evaluar la diversidad genética en conejos, asimismo, se plantea identificar cuál podría resultar más adecuado para una producción sostenible, eficiente y responsable. Este artículo busca sintetizar el conocimiento disponible, comparando metodologías, resultados, limitaciones y aplicaciones.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

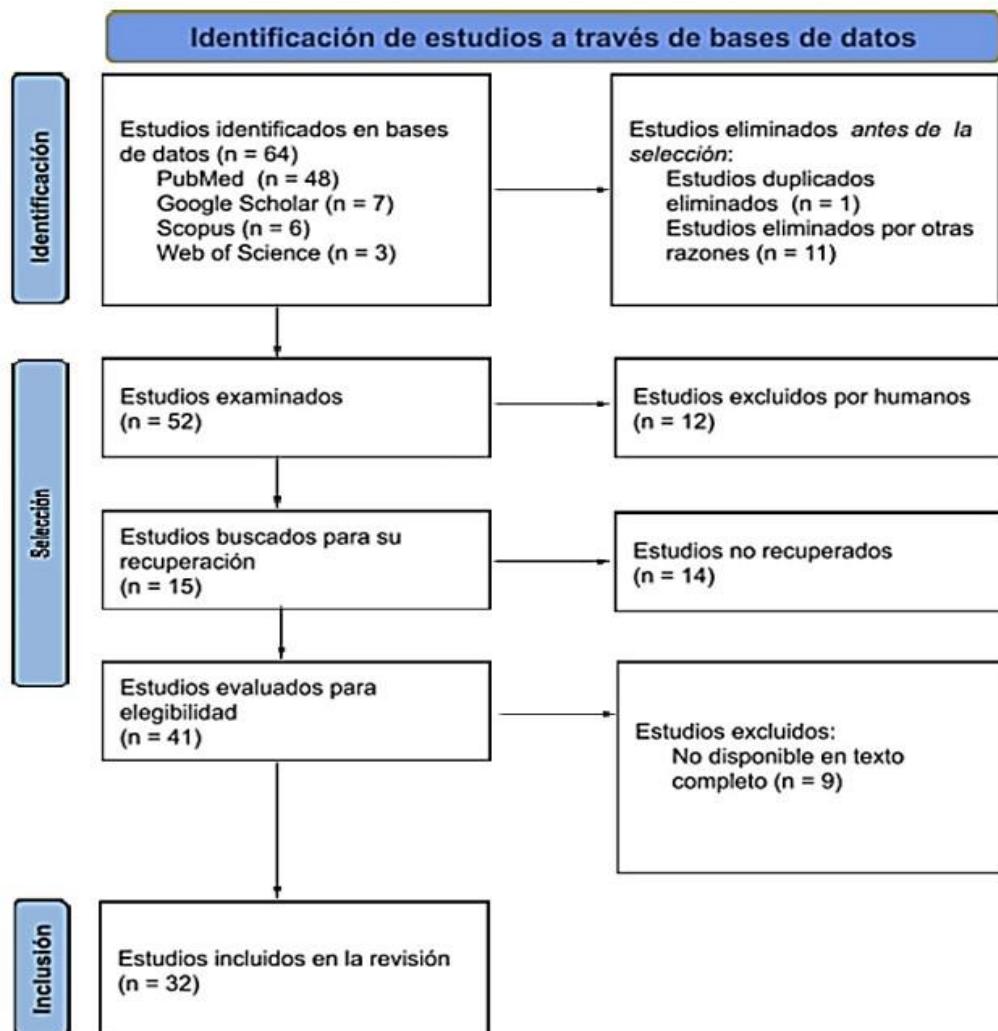
La presente investigación consistió en una revisión sistemática centrada en la compilación, evaluación comparativa y síntesis de información científica sobre los marcadores moleculares aplicados al análisis de diversidad genética en el conejo europeo (*Oryctolagus cuniculus*). La revisión se desarrolló en la ciudad de Bogotá y abarcó literatura entre 1986 y 2025. Para la búsqueda, se priorizó la selección de artículos publicados en revistas académicas visibles en bases como Scopus, PubMed, Web of Science o Google Scholar, considerando además investigaciones per-

tinentes por su aporte técnico o relevancia contextual en el estudio de la diversidad genética en conejos, se incluyeron reportes de análisis genéticos o de poblaciones que emplean marcadores moleculares como microsatélites, ADN mitocondrial, SNP, análisis WGS, ISSR, AFLP o marcadores dirigidos a codones de inicio (SCoT), no hubo restricción de idioma, con el fin de identificar las regiones con mayor o menor información científica sobre el tema. Se excluyeron todos aquellos estudios que, si bien hacían uso de técnicas moleculares, estaban centrados en

otras especies diferentes al conejo. La revisión incluyó un total de 32 artículos donde se empleó un enfoque descriptivo para sistematizar la frecuencia de uso de cada técnica molecular, la distribución geográfica y las herramientas informáticas más utilizadas.

Para este análisis se emplearon elementos gráficos realizados en Microsoft Corporation, Excel 2016 y Canva. Al ser una revisión bibliográfica no se utilizaron animales ni se requirió aprobación por parte del comité de ética en experimentación animal.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la revisión



③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta revisión sistematizó un total de 32 estudios científicos sobre diversidad genética en conejos (*Oryctolagus cuniculus*),

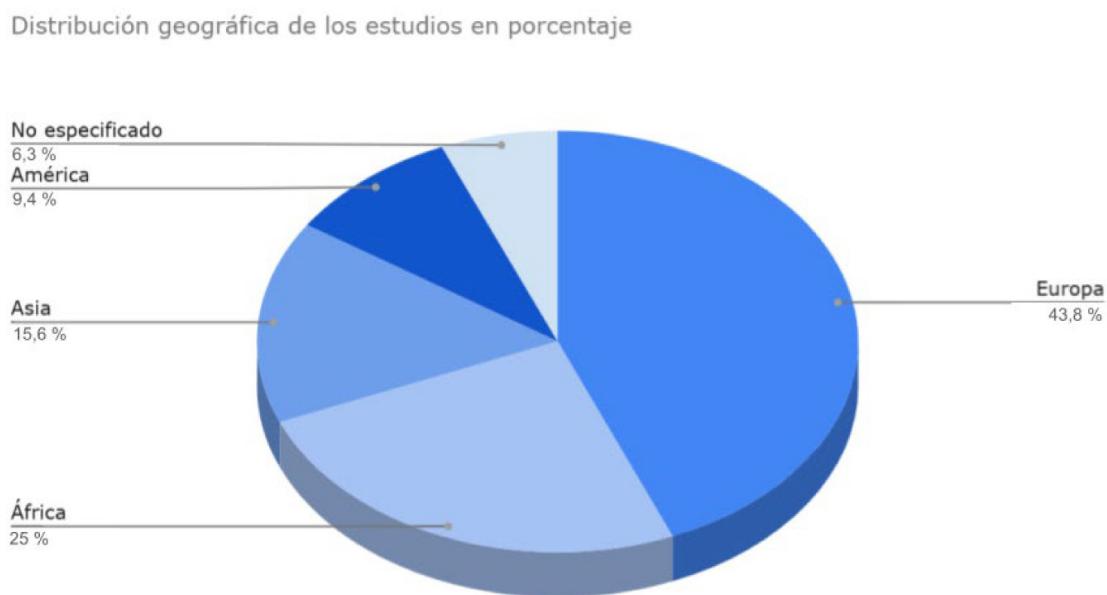
publicados entre 1986 y 2025. Las investigaciones incluyeron tanto razas domésticas como poblaciones silvestres, y abarcaron re-

giones de Europa, África, Asia y América, en la **figura 2** se muestra la proporción exacta de estudios por continente.

En términos técnicos, se identificaron cinco enfoques principales: microsatélites, ADN mitocondrial, SNP, WGS y marcadores de tipo dominante como ISSR, SCoT, AFLP. La **figura 3** muestra la frecuencia en porcentaje de uso de las técnicas moleculares en los 32 estudios incluidos. Si bien los microsatélites y el ADN mitocondrial se han empleado ampliamente en las investigaciones de la diversidad genética en conejos, estas se han incrementado mediante la integración de metodologías moleculares alternativas que proporcionan nuevos conocimientos sobre la caracterización genómica. Estas técni-

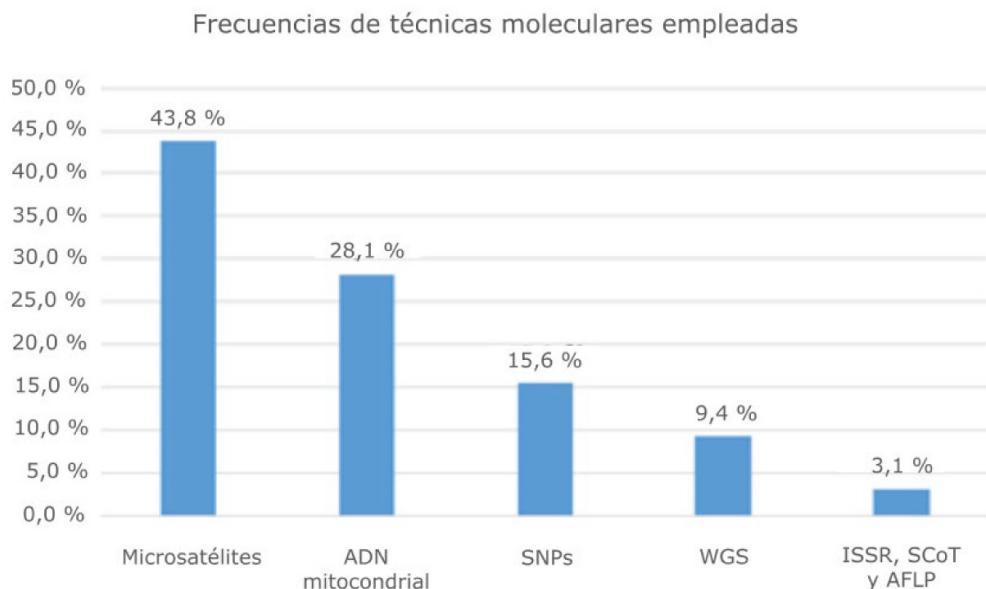
cas abarcan marcadores dominantes como AFLP, ISSR y el ADN polimórfico amplificado aleatorio (RAPD), junto con tecnologías emergentes como el genotipado de SNP, la amplificación de regiones conservadas, por ejemplo, SCoT y WGS. Estas metodologías han demostrado una eficacia particular en escenarios que requieren una resolución genética mejorada o una comprensión más completa del genoma. Por otro lado, existen diversos programas informáticos que permiten analizar estos marcadores genéticos, entre los más destacados se encuentran: EX, MEGA, STRUCTURE, POPGENE, ARLEQUIN y R. En la **tabla 1**, **tabla 2** y **tabla 3** se evidencia el uso de estos programas en relación con cada técnica molecular.

Figura 2. Distribución geográfica de estudios



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Frecuencia de técnicas moleculares empleadas en estudios de diversidad genética en conejos



Fuente: elaboración propia.

El estudio de la diversidad genética ha evolucionado significativamente, gracias a la incorporación de marcadores moleculares y herramientas bioinformáticas, que permiten caracterizar con precisión la variabilidad intra e interpoblacional. Esta revisión integró evidencia de 32 estudios científicos para analizar comparativamente las metodologías moleculares aplicadas en conejos. La discusión se estructura a partir de las técnicas identificadas, resaltando su frecuencia de uso, los resultados más representativos, las herramientas analíticas asociadas y sus implicaciones para la conservación y producción cunícola.

Microsatélites

Los polimorfismos genéticos denotan alteraciones hereditarias dentro de la secuen-

cia del ADN que contribuyen a la heterogeneidad fenotípica y, en ciertos casos, pueden afectar la susceptibilidad a una variedad de enfermedades, atribuibles a sus implicaciones en la expresión y funcionalidad de los genes. Un método destacado empleado para su identificación es el análisis con microsatélites, que implica el examen de segmentos cortos de ADN, que suelen oscilar entre uno y seis pares de bases, que están dispuestos de forma repetitiva en determinados lugares del genoma. Predominantemente, estas secuencias de ADN se clasifican como no codificantes (Carneiro Vieira et al., 2016). Estos marcadores permiten investigar los patrones de herencia dentro de las unidades familiares y ayudan a desarrollar una huella genética (Krüger & Schleinitz, 2017), que es crucial para evaluar la diversidad genética en distintas poblaciones, incluidos conejos.

A continuación, se presenta una tabla con los estudios que utilizaron esta técnica y los principales elementos analizados.

Tabla 1.

Estudios que utilizaron microsatélites

Artículo	Geografía	Población	Parámetros genéticos	Análisis estadístico	Software utilizado
(Vicente et al., 2001)	España	Conejos domésticos	Na, frecuencia alélica	No especifica	Cundinamarca
(Queney et al., 2001)	Francia, España y Portugal	Conejos silvestres	Na, Ho, He, FIS, FST	HWE, LD, FST, NJ, Wilcoxon	GENETIX, GENEPOL, FSTAT, PHYLIP, STATVIEW
(Cuevas et al., 2011)	Argentina	Conejos de granjas (raza no especificada)	Ho, He, Na	UPGMA	POPGENE, MEGA
(Ziege et al., 2020)	Alemania	Conejos silvestres	Ho, He, FIS, FST, Ar	GLMM, AMOVA, DAPC, BayesAss	GENALEX, STRUCTURE, BOTTLENECK, BayesAss, R
(Chantry-Darmon et al., 2005)	Francia	Conejos de líneas experimentales del INRA	Mapeo genético por microsatélites	Mapa físico y genético	CRIMAP
(ASEMUCE, 2015)	España	Conejo antiguo pardo español	Na, Ho, He, FIS, HWE	AMOVA, distancia genética de Nei, UPGMA	GENALEX, POPGENE, PHYLIP
(Van Haeringen et al., 2003)	Países Bajos	Conejos de laboratorio	Evaluación de ligamiento	Evaluación comparativa de perfiles	JoinMap, Genotyper, Genescan
(Bouhali et al., 2023)	Argelia	Conejos nativos de 7 regiones rurales de Argelia	Estructura genética, análisis de varianza entre poblaciones	AMOVA	GENALEX, CERVUS, adegenet
(Rabie, 2020)	Egipto	<i>New Zealand White, California, Chinchilla, Flander, Babion</i>	FST, Nei	AMOVA	No especifica
(Emam et al., 2024)	Egipto	Conejos nativos del Alto Egipto	Na, PIC, Ho, He, FIS	DAPC, AMOVA	GENALEX, CERVUS, R

Artículo	Geografía	Población	Parámetros genéticos	Ánálisis estadístico	Software utilizado
(Adeolu et al., 2021)	Nigeria	<i>Dutch, Chinchilla, New Zealand White</i>	Na, Ne, Ho, He, uHe, F	AMOVA, DAPC	GENALEX, R
(Jochová et al., 2017)	República Checa	7 razas checas	Ho, He, PIC, Pa, FIS	STRUCTURE, UPGMA	PowerMarker, GeneMapper
(Surridge et al., 1997)	Reino Unido	<i>Oryctolagus cuniculus</i>	Na, ASR	No especifica	Fragment Manager versión 1.2

Nota. Número de alelos: Na; Alelos privados: Pa; Heterocigosidad observada: Ho; Heterocigosidad esperada: He; Índice de consanguinidad dentro de poblaciones: FIS; Diferenciación genética entre poblaciones: FST; Riqueza alélica: Ar; Contenido informativo del polimorfismo: PIC; Equilibrio de Hardy-Weinberg: HWE; Desequilibrio de ligamiento: LD; Agrupamiento jerárquico no ponderado con media aritmética: UPGMA; Análisis filogenético por método Neighbor Joining: NJ; Modelo lineal mixto generalizado: GLMM; Análisis de varianza molecular: AMOVA; Análisis discriminante de componentes principales: DAPC; Instituto Nacional de la Investigación Agronómica (Francia): INRA; Distancia genética de Nei: Nei; Rango de tamaño alélico por locus: ASR

Fuente: elaboración propia.

Los microsatélites continúan siendo uno de los marcadores más utilizados en la caracterización genética de conejos, dada su alta variabilidad, codominancia y accesibilidad para laboratorios con infraestructura intermedia (Jochová et al., 2017). Su aplicación es empleada en estudios de razas domésticas (Bouhali et al., 2023), líneas experimentales (Chantry-Darmon et al., 2005) y poblaciones silvestres (Queney et al., 2001; Ziege et al., 2020). No obstante, el análisis comparado de los estudios revisados evidencia diferencias importantes en la profundidad estadística aplicada y en los criterios de reporte. Por ejemplo, investigaciones recientes, como las de Emam et al. (2024) y

Bouhali et al. (2023) reportan múltiples estimadores de diversidad genética (Na, Ho, He, PIC, FIS, AMOVA), además de incorporar análisis multivariantes y de estructura genética. Estos enfoques reflejan una integración más completa de herramientas estadísticas y bioinformáticas posibles, gracias al acceso a plataformas como GenAlEx, CERVUS o R (adegenet). En contraste, estudios anteriores, como los de Cuevas et al. (2011); Vicente et al. (2001) y ASEMUCE (2015) se limitan a parámetros básicos como el número de alelos o la heterocigosidad observada y esperada, sin explorar la estructura poblacional, ni utilizar software especializado. Estas diferencias reflejan el contexto en el que se

realizó cada estudio, incluidos sus objetivos, los recursos técnicos disponibles y las herramientas metodológicas disponibles en ese momento.

Algo similar se observa entre estudios poblacionales y aquellos orientados a cartografía genética. Trabajos como los de Chantry-Darmon et al. (2005) y Van Haeringen et al. (2003) aplicaron microsatélites con fines de mapeo físico y validación técnica y, por tanto, no incluyeron estimadores de diversidad ni estructura. Esto subraya la necesidad de leer cada aplicación en su contexto específico.

Un aspecto aún pendiente es la estandarización metodológica. Pese a la amplia adopción de microsatélites, no existe consenso sobre qué loci emplear, cuántos deben analizarse ni cómo deben presentarse los resultados. Además, persiste un sesgo geográfico y racial: muchas investigaciones se concentran en razas comerciales ampliamente distribuidas (NZW, Californiano), mientras que las poblaciones criollas o de doble propósito están escasamente representadas, con pocas excepciones como el trabajo sobre el conejo antiguo pardo español (ASEMUCE, 2015).

Las distintas maneras en que se abordan y evalúan los microsatélites, a pesar de su utilidad actual, limitan la posibilidad de comparar los resultados de diferentes investigaciones. Para tener un panorama más completo de la variedad genética en conejos,

es necesario establecer métodos estandarizados que investigadores puedan usar y replicar fácilmente.

ADN mitocondrial

El ADN mitocondrial (ADNmt) corresponde a un pequeño cromosoma de forma circular que se localiza en las mitocondrias. A diferencia del ADN nuclear, el ADNmt se hereda exclusivamente por vía materna (Ladoukakis & Zouros, 2017), lo cual lo convierte en una herramienta poderosa para rastrear linajes genéticos a lo largo de generaciones. Esta característica ha sido ampliamente aprovechada en estudios de genética de poblaciones, ya que permite reconstruir con alta resolución la historia evolutiva y las relaciones entre grupos animales. En conejos ha sido valioso para evaluar la diversidad genética, ya que permite estudiar las relaciones evolutivas y establecer análisis filogenéticos, con el fin de inferir patrones históricos de dispersión geográfica y estructura poblacional (Branco et al., 2002; Priyono et al., 2025).

Con el fin de sintetizar los aspectos más relevantes revisados en el presente estudio, la tabla 2 presenta una recopilación de investigaciones que utilizaron ADN mitocondrial, especificando el autor, el año de publicación, el país donde se realizó el estudio, la población analizada, los parámetros genéticos, los tipos de análisis y los softwares utilizados en cada caso.

Tabla 2.

Estudios que utilizaron ADN mitocondrial

Artículo	Geografía	Población	Parámetros genéticos	Árbol filogenético	Software utilizado
(Ahmed et al., 2022)	Egipto	Gabali, V-line, New Zealand White	Haplótipos, distancias genéticas	Árbol filogenético	MEGA7, DnaSP, Network
(Darwish & Emam, 2024)	Egipto	Conejos nativos	SNP mitocondriales, haplotipos	Red de haplotipos	MEGA X, DnaSP
(Casane et al., 1994)	No especifica	Conejos comerciales	Heteroplasmia, secuencias variantes, proporción de clones	Comparación de clones, análisis de mutaciones intraindividuales	No especifica
(Setiaji et al., 2023)	Indonesia	Conejo local de Indonesia	Longitud total, composición de bases, genes codificantes	Comparación genómica	MEGA X
(Branco et al., 2000)	España y Portugal	Poblaciones silvestres de la Península Ibérica	Haplótipos, linajes mitocondriales	Árbol filogenético, análisis de estructura	PAUP, TREECON
(Ennafaa et al., 1987)	Túnez y Francia	<i>O. c. algirus</i> (Zembra, Túnez) y <i>O. c. cuniculus</i> (Francia)	Longitud del genoma, heteroplasmia, sitios de corte, homología con sondas	Comparación estructural y de mapas de restricción	No especifica
(Wang et al., 2021)	China	<i>Chuanbai rex</i>	Contenido de bases, longitud del D-loop, genes codificantes, repetición de secuencias	Árbol filogenético, K2P	MEGA7, SnapGene
(Yao et al., 2019)	China	<i>Yimeng wool</i>	Genoma mitocondrial completo	Árbol filogenético	MEGA7, ARWEN

Nota. Polimorfismos de un solo nucleótido: SNP; Región control no codificante del ADN mitocondrial: D-loop; Método de agrupamiento filogenético por vecino más cercano: NJ; Modelo Kimura de dos parámetros: K2P.

Fuente: elaboración propia.

La técnica de ADN mitocondrial ha sido utilizada en el estudio de la diversidad genética de conejos, principalmente a través de

la secuenciación del genoma mitocondrial completo, del gen CYTB (citocromo B) o de la región D-loop (región de control no codi-

ficiente que regula la replicación y transcripción del ADNmt (Ahmed et al., 2022; Branco et al., 2000; Darwish & Emam, 2024). Sin embargo, en los artículos revisados, se evidencia que su uso es menos frecuente que el de marcadores nucleares como los microsatélites.

Estudios como los de Ahmed et al. (2022) y Darwish & Emam (2024) han utilizado regiones específicas del ADNmt para caracterizar la diversidad haplotípica de razas locales egipcias, aplicando análisis de redes de haplotipos y distancias genéticas, e incorporando software como DnaSP, MEGA y Network. Estos trabajos aportan datos valiosos sobre la variabilidad intra e interpoblacional desde la perspectiva materna, y contribuyen a la identificación de linajes distintivos entre poblaciones.

Por otra parte, investigaciones como la de Casane et al. (1994) documentaron la presencia de heteroplasmia sistemática en conejos domésticos, una condición en la que coexisten diferentes secuencias mitocondriales dentro de un mismo individuo. Este hallazgo representa una fuente adicional de variación genética y plantea desafíos para la interpretación de árboles filogenéticos, ya que puede alterar las expectativas de herencia estrictamente materna. Aunque el estudio fue realizado con tecnologías previas a la secuenciación masiva, su contribución conceptual sigue siendo vigente.

Otros trabajos, como el de Branco et al. (2000), centrados en conejos silvestres de la Península Ibérica, integran árboles filogenéticos y análisis de linajes mitocondriales, lo que ha permitido detectar patrones históricos. Por su parte, enfoques más recien-

tes como el de Wang et al. (2021), quienes secuenciaron el genoma mitocondrial completo de la raza Chuanbai Rex, demuestran cómo el avance tecnológico ha ampliado las posibilidades de análisis estructural, incluyendo codificación génica y evaluación de regiones repetitivas como el D-loop.

Pese a estas aplicaciones, la revisión muestra que la mayoría de estudios con ADNmt no emplean herramientas estadísticas complejas ni reportan estimadores de variabilidad genética como FST o AMOVA. En su lugar, el análisis suele limitarse a relaciones filogenéticas o comparaciones de secuencias. Esta limitación responde tanto al tipo de marcador como a la finalidad de los estudios, que frecuentemente buscan explorar relaciones evolutivas más que estructura genética detallada, siendo una herramienta más útil para el rastreo de linajes, la identificación de eventos históricos de domesticación y la detección de estructuras filogeográficas. Sin embargo, su uso sigue siendo menos frecuente que el de microsatélites, probablemente por requerir secuenciación y análisis más especializados. Se recomienda fomentar su aplicación en razas locales y combinar su análisis con marcadores nucleares para una interpretación genética integral.

Técnicas alternativas para el estudio genético del conejo

Además de los microsatélites y el ADN mitocondrial, algunos estudios han integrado marcadores como AFLP, ISSR, SCoT o SNP, así como estrategias de secuenciación del genoma completo. Estas herramientas se

han aplicado en investigaciones destinadas a caracterizar diferencias genéticas específicas o explorar regiones funcionales del ADN con más profundidad. A continuación, se

presenta una recopilación de investigaciones que han empleado diversas técnicas para el análisis genético del conejo.

Tabla 3.

Técnicas alternativas para el estudio genético del conejo

Artículo	Geografía	Población	Técnica utilizada	Parámetros genéticos	Análisis estadístico	Software utilizado
(Sternstein et al., 2014)	Alemania	GG × NZW (F2)	SNP MC4R	Frecuencia alélica, genotipos	ANOVA, Bonferroni, haplotipos	GEVALT, PASW (SPSS), KASP
(Van Hae-ringen et al., 2002)	Países Bajos	Raza experimental	AFLP	Frecuencia alélica, loci polimórficos	χ^2 , LOD, MapQTL	Genescan, Genotyper, Join-Map, MapQTL
(El-Sabrout, 2017)	Irak	V-line	SNP MC4R	Genotipos	χ^2 , GLM (peso como covariable)	SPSS v20, CodonCode Aligner
(Elsayed et al., 2024)	Egipto	Gabali, Papillon, Rex, NZW, Californiano	ISSR / SCoT	Polimorfismo, bandas, IDG	Binarios, similitud, UPGMA	SPSS v14, GelAnalyzer
(Bertolini et al., 2014)	Italia	Razas comerciales	WGS (lectura corta)	SNP, heterocigosidad, Ti/Tv	Filtros de calidad, validación Sanger	Ion Torrent Suite, SAMtools, IGV, VEP
(Bai et al., 2021)	China	NZW	WGS (lectura larga)	N50, contigs	BUSCO, FRC, filogenia	HGAP4, LR_Gapcloser, Pilon, BUSCO, QUAST
(Ping et al., 2025)	China	117 conejos (11 razas)	WGS (lectura corta)	62M SNP, ROH, FROH, FST	PCA, AMOVA	GATK, BWA, PLINK, SAMtools, GONE
(Nerkowski et al., 2024)	EE.UU.	Brachylagus idahoensis	RADseq	SNP, π , Ho, He, FST	PCA, ADMIXTURE, snmf, loci adaptativos	STACKS, PCADAPT, ADMIXTURE, LEA, VCFtools

Artículo	Geografía	Población	Técnica utilizada	Parámetros genéticos	Ánálisis estadístico	Software utilizado
(Ballan et al., 2022a)	Italia	Razas ornamentales y cárnicas	SNP-array	Na, Ne, Ho, He, FIS, PIC, Ar	AMOVA, PCA	GENEALEX, STRUCTURE, R (adegenet)
(Fekete et al., 2025)	Hungría	Silvestres y domésticos	WGS	FST, π , CLR, ROH, PCA	Árbol ML	PLINK, SNPhylo, ADMIXTURE,
(Casto et al., 2020)	España	Conejos domésticos	SNP, WGS, GWAS	GC, SNVs, INDELS	GWAS (Bayes B), LD	PLINK, GCTA, R, GeneCards

Nota. Polimorfismos de un solo nucleótido: SNP; Receptor de melanocortina 4: MC4R; Amplificación de fragmentos polimórficos al azar: AFLP; Repeticiones intersecuenciales simples: ISSR; Marcadores dirigidos a codones de inicio: SCoT; Secuenciación del genoma completo: WGS; Secuenciación por sitios de restricción: RADseq; Microarreglos de SNP: SNP-array; Estudio de asociación a nivel genómico: GWAS; Número de alelos: Na; Número efectivo de alelos: Ne; Heterocigosidad observada: Ho; Heterocigosidad esperada: He; Índice de consanguinidad dentro de poblaciones: FIS; Diferenciación genética entre poblaciones: FST; Riqueza alélica: Ar; Contenido informativo del polimorfismo: PIC; Diversidad nucleotídica: π ; Regiones homocigotas continuas: ROH; Proporción del genoma en ROH: FROH; Relación transiciones/transversiones: Ti/Tv; Genes candidatos: GC; Variantes de nucleótido único: SNV; Insertiones y delecciones: INDELS; Análisis de varianza: ANOVA; Corrección de Bonferroni: Bonferroni; Prueba chi-cuadrado: χ^2 ; Modelo lineal generalizado: GLM; Límite de razón de verosimilitud: LOD; Análisis de componentes principales: PCA; Análisis de varianza molecular: AMOVA; Factorización de matrices dispersas no negativas: snmf; Desequilibrio de ligamiento: LD; Modelo bayesiano tipo B: Bayes B; Árbol filogenético de máxima verosimilitud: Árbol ML; Índice de diversidad genética: IDG.

Fuente: elaboración propia.

SNP específicos y técnicas de marcadores dominantes: utilidad localizada y limitaciones estructurales

El análisis de SNP dirigidos ha sido empleado en estudios enfocados en la asociación de variantes genéticas con caracte-

rísticas productivas o comportamentales específicas en conejos. A diferencia de los abordajes genómicos de amplio espectro, esta estrategia se concentra en mutaciones previamente identificadas en genes candidatos. Tal es el estudio de Sternstein et al. (2014), quienes evaluaron un SNP intrónico en el gen MSTN en una población experimental F2 derivada del cruce GG × NZW,

y reportaron asociaciones significativas con rasgos de canal y peso de carne. De forma similar, El-Sabrout (2017) y Rabie (2020) exploraron variantes en el gen MC4R en conejos egipcios, enfocándose en la relación entre estas mutaciones y el comportamiento sexual o la composición de canal.

Estos estudios suelen incorporar análisis estadísticos clásicos como ANOVA y GLM, pruebas de chi-cuadrado y, en algunos casos, reconstrucción de haplotipos. El *software* utilizado varía entre versiones de SPSS, CodonCode Aligner y plataformas de genotipado como KASP. No obstante, la mayoría de estos trabajos se centran en una o dos variantes puntuales, lo que limita su capacidad para captar la diversidad genómica total. Además, al no incluir estimaciones como FST, Ho o AMOVA, sus aportes son más útiles para aplicaciones funcionales específicas que para caracterizaciones poblacionales amplias.

En cuanto a los marcadores dominantes, técnicas como ISSR, SCoT y AFLP han sido empleadas para estimar la variabilidad genética entre razas cuando no se cuenta con un genoma de referencia o cuando se busca una metodología de bajo costo. En el estudio de Elsayed et al. (2024), que combinó SCoT e ISSR para analizar cinco razas locales en Egipto, se reportaron altos niveles de polimorfismo (hasta 89,5 %) y se aplicaron análisis de similitud y dendrogramas UPGMA. Por su parte, Van Haeringen et al. (2002) implementaron AFLP en una retrocruza experimental para construir mapas de ligamiento y detectar loci asociados a rasgos cuantitativos (QTL).

A pesar de su utilidad, estas técnicas presentan limitaciones metodológicas importantes. Los marcadores dominantes no permiten distinguir entre homocigotos y heterocigotos, lo que restringe el cálculo de algunos indicadores poblacionales clave y su análisis se limita a cálculos de similitud o polimorfismo porcentual. Además, su reproducibilidad puede verse afectada por variaciones en condiciones experimentales, y la estandarización interlaboratorios es limitada. En los artículos revisados, aunque se utilizaron herramientas como GelAnalyzer, SPSS y MapQTL, no se reportaron parámetros como He, FIS o AMOVA, lo cual impide realizar comparaciones cuantitativas consistentes con estudios que emplean marcadores codominantes.

Secuenciación del genoma completo (WGS) y SNP masivos

El uso de tecnologías de secuenciación masiva ha permitido una transición en los estudios genéticos de conejos, pasando de enfoques basados en unos pocos loci a análisis genómicos integrales. En este contexto, la WGS y la detección de millones de SNP distribuidos en todo el genoma representan un avance significativo en términos de resolución, cobertura y potencial interpretativo.

Estudios como el de Bai et al. (2021) muestran cómo la aplicación de la tecnología de lectura larga PacBio permitió ensamblar el genoma completo de un individuo raza NZW con una continuidad estructural superior, corrigiendo gaps y mejorando la anotación de genes clave como los del complejo MHC. Por su parte, Ping et al. (2025) utili-

zaron secuenciación WGS de lectura corta para analizar 117 conejos de distintas razas, identificando regiones ROH, zonas bajo selección positiva y variación estructural mediante herramientas como PLINK y GATK. Ambos estudios reflejan cómo el acceso a plataformas bioinformáticas avanzadas permite no solo estimar diversidad genética, sino también explorar procesos evolutivos como la domesticación, la adaptación local o la consanguinidad histórica.

En comparación, trabajos como el de Bertolini et al. (2014), centrado en el descubrimiento de SNP funcionales, muestran una aplicación más puntual que el enfoque genómico, ya que el uso del WGS se limitó a la identificación de SNP sin extenderse a un análisis poblacional. En este caso, la estrategia empleada fue la secuenciación de bibliotecas de representación reducida (RRL) y la posterior anotación de variantes mediante VEP y SAMtools. Pese a que no se aplicaron estimadores poblacionales como FST o AMOVA, el estudio logró mapear SNP en regiones funcionales relevantes del genoma, incluyendo genes asociados a rasgos productivos.

Un enfoque complementario al WGS tradicional es el uso de técnicas de secuenciación asociadas a sitios de restricción, como RADseq, aplicado por Nerkowski et al. (2024). Este estudio permitió identificar 9794 SNP a lo largo del genoma, caracterizar la estructura genética de poblaciones en peligro y detectar loci potencialmente asociados a adaptación. La aplicación de herramientas como STACKS, PCADAPT y ADMIXTURE permitió no solo inferir estructura genética, sino también evaluar señales de selección local.

Si bien estos enfoques genómicos ofrecen una resolución sin precedentes, también implican exigencias metodológicas, logísticas y analíticas considerables. El acceso a plataformas de secuenciación, capacidad de almacenamiento, procesamiento bioinformático y personal altamente capacitado sigue siendo una limitación en muchos contextos, particularmente en regiones con baja inversión en infraestructura científica. Además, la comparación entre estudios aún es difícil, debido a la ausencia de paneles estandarizados de SNP en conejos, lo que limita la replicabilidad.

Genes asociados a rasgos productivos

Los avances en genética aplicados al conejo muestran que los marcadores moleculares no solo son útiles para describir diversidad, sino también para detectar variantes asociadas con rasgos productivos de alto impacto económico. La identificación de polimorfismos en genes que influyen en el desarrollo muscular, la eficiencia reproductiva o la composición de la carne, permiten la optimización de la selección a través de perfiles genéticos. Para la producción de carne es importante considerar algunos genes, como los codificantes de la proteína dedo de Zinc 423 (Zfp423), el receptor activado por proliferadores de peroxisomas Gama (PPAR γ), la proteína de unión a ácidos grasos 4 (FABP4) y la estearoil-CoA desaturasa (SCD), ya que desempeñan un papel clave en el porcentaje de grasa intramuscular de los conejos, reflejándose en aspectos organolépticos percibidos por el consumidor final (Ahamba

et al., 2024). Otros genes como el factor de crecimiento similar a la insulina II (IGF-II), la hormona de crecimiento (GH), el sustrato del receptor de insulina 1 (IRS-1), el gen de masa magra (LM) y el de obesidad asociada (OB), en conjunto ayudan a determinar la calidad de la canal y la carcasa en el conejo (Safaa et al., 2023; Ahmed et al., 2023).

A nivel económico, es relevante tener en cuenta la mayor cantidad de genes heredables que se puedan transmitir a los gazapos, lo que se traduce en conejos de mayor tamaño y peso. Cabe resaltar que algunas características propias de las razas y los cruces que se realicen pueden mejorar el olor y sabor de la carne al momento del consumo, como es el caso del conejo californiano (Ayyat et al., 2024).

En la selección genética de madres y crías se consideran factores como el tamaño de la camada, la producción de leche, el crecimiento y la producción de carne. Para la determinación de estos aspectos, los genes más relevantes analizados incluyen los genes del receptor de la progesterona (PGR), de la subunidad beta de la hormona folículo estimulante (FSHB), de la glicoproteína oviductal 1 (OVGP1), del inhibidor tisular de metaloproteinasa 1 (TIMP1), del receptor de prolactina (PRLR), de la κ -caseína (CSN3), del sustrato 1 del receptor de insulina (IRS-1) y de los receptores de estrógeno 1 y 2 (ESR1 y ESR2). Estos genes codifican proteínas que influyen en la reproducción, la producción de leche y el crecimiento, aportando características favorables a los gazapos (Helal et al., 2024), es importante señalar que en este caso se mencionan principalmente los genes

como marcadores moleculares; sin embargo, las proteínas que estos codifican también pueden utilizarse como marcadores, aunque su estudio requiere técnicas moleculares distintas como proteómica, que incluye métodos como electroforesis (1D y 2D) y espectrometría de masas (Chakraborty et al., 2022).

Para la identificación de los genes mencionados se emplearon marcadores moleculares tipo SNP, debido a su facilidad de análisis a nivel molecular. La combinación de diferentes técnicas moleculares ha cobrado relevancia en la identificación de genes de interés. La integración de microsatélites y SNP ha permitido caracterizar polimorfismos en el receptor de prolactina (PRLR), evidenciándose una asociación entre el genotipo homocigoto y una mayor producción de leche en conejas (Benedek et al., 2023). Asimismo, el análisis de microsatélites en ADN mitocondrial no ha reportado mutaciones en razas como el baladi local de Oriente Medio y el conejo blanco neozelandés comercial (Safaa et al., 2024). Estos hallazgos resaltan el potencial de los marcadores genéticos en el estudio de las diferentes razas de conejos, contribuyendo a optimizar su cría, producción y comercialización.

Control de la consanguinidad a partir de marcadores moleculares como estrategia de conservación genética en conejos

Los marcadores moleculares constituyen una herramienta clave no solo para la ca-

racterización genética, sino también para el manejo de poblaciones. En el caso de los conejos, la consanguinidad puede generar un riesgo significativo para la productividad y la salud, al propiciar la depresión endogámica. La endogamia hace referencia al cruce entre parientes cercanos, provocando un aumento en la consanguinidad, lo cual sugiere un problema para los productores y para las razas, tanto silvestres como locales, pues un alto grado de consanguinidad incrementa la probabilidad de heredar genes no deseados, bien sea de susceptibilidad a enfermedades o de factores fenotípicos que afecten la producción de carne (Ballan et al., 2022b). El empleo de marcadores moleculares, desde microsatélites hasta paneles SNP y secuenciación de genomas completos, permite cuantificar de manera precisa los niveles de endogamia, mediante estimadores como HO, FIS o a través de medidas ROH y el índice FROH. Esta información es fundamental para organizar los esquemas de reproducción en granjas y poblaciones locales, evitando cruces entre animales emparentados y preservando la vitalidad de la producción.

Paralelamente, los marcadores moleculares en conejos ofrecen una base práctica para la conservación de su diversidad genética. En poblaciones que aún se crían en comunidades rurales, estas herramientas permiten medir la variabilidad real y reconocer variantes únicas (Ballan et al., 2022a; Ping et al., 2025). Un ejemplo es el estudio en conejos del Alto Egipto, donde cerca del 43 % de los alelos detectados eran exclusivos de ciertas poblaciones, lo que evidencia la necesidad de preservarlas en sus propios sistemas de crianza (Emam et al., 2024); de

manera complementaria, los marcadores moleculares también orientan la conformación de bancos de germoplasma, que funcionan como un respaldo frente a la pérdida de diversidad. La recuperación de poblaciones completas a partir de embriones vitrificados durante más de una década confirma que este tipo de reservas permiten conservar linajes minoritarios y recuperar variantes que podrían desaparecer en campo (Marco et al., 2018; Vicente et al., 2023); por otro lado, la FAO respalda que la conservación *ex situ* (incluyendo almacenamiento criogénico de semen, óvulos o embriones) es una estrategia clave para preservar la variabilidad genética dentro de razas autóctonas, especialmente aquellas en peligro o con pequeña población efectiva. Estos bancos permiten capturar la diversidad genética completa y actuar como reserva frente a eventos desfavorables o pérdida irreversible de población (FAO, 2012). Así, la información genética no solo ayuda a evitar los efectos de la consanguinidad, sino que también guía estrategias de conservación que combinan la preservación en los sistemas productivos locales con la protección en bancos de largo plazo.

Vacíos de conocimiento

El análisis sistemático de los estudios encontrados muestra varios vacíos que limitan la comprensión integral de la diversidad genética en conejos. En los estudios revisados, las razas criollas o locales aparecen con menor frecuencia, lo que reduce el conocimiento disponible sobre su variabilidad genética. Esta situación sugiere la necesidad de ampliar su estudio, considerando no solo su capacidad de adaptación a condiciones es-

pecíficas, sino también su aporte potencial a sistemas de producción más sostenibles. La mayoría de investigaciones se concentran en razas comerciales (NZW, californiano, Chinchilla, Flandes) y en países con infraestructura científica consolidada, como China, Egipto o algunas naciones europeas. Esta brecha geográfica y racial en los estudios compromete la construcción de políticas de conservación que reflejen la diversidad real de los sistemas productivos de conejos.

Desde el enfoque geográfico, se evidencia una fuerte concentración de investigaciones en regiones de Europa Occidental, Egipto y, en menor medida, Asia Oriental, mientras que América, África Subsahariana y Oceanía permanecen ampliamente inexplorados. Esta asimetría geográfica impide una visión global de la diversidad genética de los conejos y limita la comparación entre linajes continentales o ecotipos adaptados a distintas presiones ambientales.

Otro aspecto crítico es la variedad de microsatélites utilizados en los estudios, cada investigación selecciona un conjunto diferente de loci, lo que complica la comparación de resultados y limita la posibilidad de construir bases de datos consolidadas o de realizar análisis comparativos más amplios. En el caso de los conejos, no existe actualmente una lista estandarizada de microsatélites recomendados, lo que sugiere la necesidad de realizar más investigaciones para establecer un panel de referencia común. Por ejemplo, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) ha propuesto paneles estandarizados de microsatélites para especies como bovinos,

búfalos, ovinos, caprinos, caballos, cerdos y aves de corral (FAO, 2011). Sin embargo, el conejo no está incluido en dicha recomendación internacional, lo que denota la necesidad de realizar investigaciones que unifiquen y recomiendan los marcadores microsatélites que puedan ser utilizados en estudios para la mejora y conservación de características genéticas que aporten a la producción cunícola.

En varios países, la cría de conejos se ha establecido como una actividad pecuaria organizada, marcada por el uso de técnicas avanzadas, la creación de modelos productivos con diferentes grados de bienestar animal y la participación activa en mercados, tanto de exportación como de importación. En Europa, por ejemplo, se presentan diferentes métodos de manejo que abarcan desde jaulas tradicionales hasta sistemas mejorados y en espacios abiertos; países como España y Hungría destacan como exportadores, y Alemania y Bélgica son los principales destinos comerciales (Compassion in World Farming, 2024). Este panorama global permite comparar la situación actual de Colombia, donde la crianza de conejos tiene un potencial considerable para el desarrollo rural. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018, Mayo 24), hay alrededor de 37 800 unidades de producción que crían aproximadamente 735 000 conejos cada año, sin embargo, a pesar de estas cifras, la cadena de producción de conejos en Colombia enfrenta problemas estructurales, incluyendo la falta de modernización y la urgencia de potenciar la investigación y el desarrollo. El Ministerio de Agricultura ha expresado su compromiso de ayudar a los productores mediante la creación de una

cadena productiva formal, lo que podría mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector. En este marco, la revisión de metodologías moleculares aplicadas al análisis de la diversidad genética en conejos se vuelve importante. La adopción de estas herramientas podría facilitar el mejoramiento genético de las poblaciones de conejos en Colombia, al mejorar la producción y la adaptabilidad de las diferentes razas. Además, fortalecería la base científica necesaria para desarrollar políticas públicas y programas de apoyo que fomenten la cadena de producción de conejos en el país.

Adicionalmente, existe una escasa integración entre datos genéticos y fenotípicos, lo cual representa una limitación significativa para los programas de mejoramiento genético y conservación funcional. Son pocos los estudios que correlacionan los perfiles moleculares con características pro-

ductivas, morfológicas o adaptativas. Entre las excepciones, destacan Abdel-Kafy et al. (2018), quienes vinculan datos genéticos con fenotipos observables, lo que permite identificar genotipos favorables para la selección asistida por marcadores; por otro lado, para la producción cúnícola, el aprovechamiento de la diversidad genética dentro del paradigma “Una Salud” (One Health) puede impulsar significativamente las prácticas sostenibles, el bienestar animal y la seguridad alimentaria.

En conjunto, las brechas metodológicas, las diferencias geográficas y la diversidad en el uso de marcadores moleculares resaltan la necesidad de fortalecer el estudio de la diversidad genética en conejos con bases más completas y comparables, lo cual permitirá progresar en la formulación de conclusiones sólidas y útiles para la conservación, la mejora de productos y el diseño de políticas basadas en evidencia genética.

4

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática muestra que, si bien existe una variedad de enfoques moleculares aplicados al estudio de la diversidad genética en conejos, su uso ha sido diferente en cuanto a profundidad analítica, cobertura poblacional y disponibilidad tecnológica.

Técnicas que implementan el uso de microsatélites y ADN mitocondrial han sido las más empleadas. En particular, los microsatélites siguen destacándose por su capacidad para estimar variabilidad genética en conejos y han demostrado su utilidad en investigaciones sobre razas comerciales, locales y líneas experimentales, consolidándose como

una herramienta adaptable a distintos objetivos genéticos, especialmente en contextos donde el acceso a tecnologías más avanzadas es limitado. Sin embargo, la falta de un panel unificado de loci ha restringido su comparabilidad entre investigaciones. Avanzar hacia un conjunto común de marcadores contribuiría a fortalecer su aplicabilidad y a generar datos acumulables a nivel regional, nacional y global. En contraste, metodologías más recientes, como los SNP de alto rendimiento o la WGS, ofrecen una resolución mayor y permiten estudiar aspectos funcionales del genoma, pero su adopción puede limitarse a

contextos con mayor disponibilidad tecnológica, debido a los altos costos por sus requerimientos en términos de procesamiento en plataformas especializadas y personal altamente capacitado.

Los marcadores moleculares son herramientas fundamentales para evaluar la consanguinidad en conejos y prevenir sus efectos negativos en la producción. Su aplicación facilita el diseño de esquemas reproductivos más seguros y contribuye a conservar la diversidad genética, especialmente en poblaciones locales. De manera complementaria, el análisis de genes asociados a rasgos productivos, en combinación con diferentes tipos de marcadores, constituye una estrategia eficaz para optimizar la producción cúnícola. La identificación de variantes ligadas a características de interés económico y la mayor precisión en las estimaciones genéticas permiten proyectar programas de mejora más eficientes, orientados tanto a la productividad como a la sostenibilidad de los sistemas de cría.

Aunque algunos estudios han comenzado a incluir poblaciones locales, la baja presencia de razas criollas en la literatura revisada sugiere la necesidad de fortalecer su estudio,

especialmente en regiones donde la cunicultura tiene relevancia económica, pero aún carece de representación genética suficiente. Asimismo, avanzar hacia metodologías comparables y criterios compartidos facilitará la construcción de análisis genéticos más robustos y aplicables a distintas realidades productivas.

En ese sentido, la preservación de la diversidad genética en producción cúnícola se vincula directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 2 (Hambre Cero) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) (Naciones Unidas, 2018), ya que mantener una base genética amplia permite fortalecer sistemas agroalimentarios fuertes, sostenibles y adaptables, lo cual cobra especial relevancia dentro del enfoque One Health, que reconoce la interdependencia entre la salud animal, humana y ambiental.

En el marco de este estudio, la identificación de técnicas moleculares apropiadas para evaluar la variabilidad genética en conejos permite fundamentar estrategias de conservación y mejoramiento que contribuyan a una producción más eficiente y sostenible.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: se encargó del diseño metodológico, la investigación, la recopilación y análisis de la información, la redacción inicial del manuscrito y su revisión crítica.

Autor 2: realizó el diseño metodológico, colaboró en la revisión bibliográfica, la or-

ganización de la información, el análisis parcial de datos y la revisión del borrador.

Autor 3: brindó la orientación conceptual y metodológica, supervisó el proceso de revisión, apoyó la discusión crítica de los hallazgos y realizó la revisión y edición final del manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, cuyo respaldo

institucional fue esencial para la ejecución del proyecto que dio origen a esta revisión.

FINANCIAMIENTO

La elaboración de este artículo se enmarca en el proyecto “Evaluación de la diversidad genética en conejos de sistemas productivos en dos regiones de Colombia”, en el

marco de la convocatoria interna Modalidad 1 – Acuerdo 055 de 2022 de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, aprobado por el Acuerdo 092 de 2023.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Para el resumen gráfico, además de las gráficas creadas en Microsoft 365 - Excel, se generaron artificialmente imágenes de conejos con el modelo Gemini 2.5 Flash, utilizan-

do la siguiente instrucción: “Evolución genética de conejos”. La imagen se empleó para complementar el resumen gráfico y reforzar la representación visual del contenido.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Abdel-Kafy, E. M., Ahmed, S. S. , El-Keredy, A., Ali, N. I., Ramadan, S. & Farid, A. (2018). Genetic and phenotypic characterization of the native rabbits in Middle Egypt. *Veterinary World*, 11(8), 1120. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2018.1120-1126>

Adeolu, A. I., Wheto, M., Oleforuh-Okoleh, V. U., Nwose, R. N., Adenaike, A. S., Yaku-
bu, A., Abiola, E. M. & Mohammed, B. G.

(2021). Genetic Diversity of Rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) Population in South Eastern Nigeria Using Microsatellite Markers. *Tropical Animal Science Journal*, 44(3), 280. <https://doi.org/10.5398/tasj.2021.44.3.280>

Ahamba, I. S., Mary-Cynthia Ikele, C., Kink-
pe, L., Goswami, N., Wang, H., Li, Z., Ren,
Z. & Dong, X. (2024). Unraveling the ge-

netic and epigenetic landscape governing intramuscular fat deposition in rabbits: Insights and implications. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 9, 100222. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2024.100222>

Ahmed, S., Ali, N. I., Darwish, H. R., Salem, L. M., Elsayad, R. I. & El-Keredy, A. (2023). Genetic Characterization of Myf5 and POU1F1 Genes in Different Egyptian Local Rabbit Breeds and Their Association with Growth Traits. *Biochemical Genetics*, 62(5), 3540. <https://doi.org/10.1007/s10528-023-10604-5>

Ahmed, S. S. E., Ali, N. I., Abdelhafez, M. A., Darwish, H. R. & El-Keredy, A. (2022). Mitochondrial D-loop sequences and haplotypes diversity in Egyptian rabbit breeds. *World Rabbit Science*, 30(3), 201-207. <https://doi.org/10.4995/wrs.2022.17235>

Alves, J. M., Carneiro, M., Cheng, J. Y., Lemos de Matos, A., Rahman, M. M., Loog, L., Campos, P. F., Wales, N., Eriksson, A., Manica, A., Strive, T., Graham, S. C., Afonso, S., Bell, D. J., Belmont, L., Day, J. P., Fuller, S. J., Marchandea, S., Palmer, W. J., ... Jiggins, F. M. (2019). Parallel adaptation of rabbit populations to myxoma virus. *Science*, 363(6433), 1319-1326. <https://doi.org/10.1126/science.aau7285>

Am, E., Makhlof, M. M., Kunci, K., Genetik, K., Lokal, K. & Hulu, M. (2024). Estimating the Genetic Situation of Native Upper Egypt Subpopulations of Rabbits Using Microsatellite Markers. *Indonesian Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 29(2). <http://dx.doi.org/10.14334/jitv.v29i2.3428>

ASEMUCE. (2015). *Historia, caracterización y situación actual del conejo Antiguo Pardo Español*. https://www.ucm.es/data/cont/docs/345-2016-12-07-Raza_Conejos_Antiguo_Pardo_Espa%C3%B1ol.pdf

Ayyat, M. S., El-Monem, U. M. A., Moustafa, M. M. A., Al-Sagheer, A. A., Mahran, M. D. & El-Attrouny, M. M. (2024). Genetic assessment of litter size, body weight, carcass traits and gene expression profiles in exotic and indigenous rabbit breeds: a study on New Zealand White, Californian, and Gabalirabbits in Egypt. *Trop Anim Health Prod* 56, 244. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-04082-z>

Badr, O., El-Shawaf, I., Khalil, M., Refaat, M. & Ramadan, S. (2019). Molecular genetic diversity and conservation priorities of Egyptian rabbit breeds. *World Rabbit Science*, 27(3) 135-141. <https://doi.org/10.4995/wrs.2019.8923>

Bai, Y., Lin, W., Xu, J., Song, J., Yang, D., Chen, Y. E., Li, L., Li, Y., Wang, Z. & Zhang, J. (2021). Improving the genome assembly of rabbits with long-read sequencing. *Genomics*, 113(5), 3216-3223. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2021.05.031>

Ballan, M., Bovo, S., Schiavo, G., Schiavitto, M., Negrini, R. & Fontanesi, L. (2022a). Genomic diversity and signatures of selection in meat and fancy rabbit breeds based on high-density marker data. *Genetics Selection Evolution*, 54(3). <https://doi.org/10.1186/s12711-022-00696-9>

Ballan, M., Schiavo, G., Bovo, S., Schiavitto, M., Negrini, R., Frabetti, A., Fornasini, D. & Fontanesi, L. (2022b). Comparative

analysis of genomic inbreeding parameters and runs of homozygosity islands in several fancy and meat rabbit breeds. *Animal Genetics*, 53(6), 849-862. <https://doi.org/10.1111/age.13264>

Benedek, I., Altbäcker, V., Zsolnai, A., Nagy, I., Mezőszentgyörgyi, D. & Molnár, T. (2023). The Role of PRLR Gene Polymorphisms in Milk Production in European Wild Rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 13(4), 671. doi: 10.3390/ani13040671. <https://doi.org/10.3390/ani13040671>

Bertolini, F., Schiavo, G., Scotti, E., Ribani, A., Martelli, P. L., Casadio, R. & Fontanesi, L. (2014). High-throughput SNP discovery in the rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) genome by next-generation semiconductor-based sequencing. *Animal Genetics*, 45(2), 304-307. <https://doi.org/10.1111/age.12121>

Bouhali, A., Homrani, A., Ferrand, N., Lopes, S. & Emam, A. M. (2023). Assessment of genetic diversity among native Algerian rabbit populations using microsatellite markers. *Archives Animal Breeding*, 66(3), 207-215. <https://doi.org/10.5194/aab-66-207-2023>

Branco, M., Ferrand, N. & Monnerot, M. (2000). Phylogeography of the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) in the Iberian Peninsula inferred from RFLP analysis of the cytochrome *b* gene. *Heredity*, 85, 307-317. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2000.00756.x>

Branco, M., Monnerot, M., Ferrand, N. & Templeton, A. R. (2002). Postglacial dis-

persal of the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) on the Iberian peninsula reconstructed from nested clade and mismatch analyses of mitochondrial DNA genetic variation. *International Journal of Organic Evolution*, 56(4), 792-803. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2002.tb01390.x>

Carneiro Vieira, M. L., Santini, L., Lima Diniz, A. & Freitas Munhoz, C. (2016). Microsatellite markers: what they mean and why they are so useful. *Genetics and Molecular Biology*, 39(3), 312-328. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2016-0027>

Casane, D., Dennebouy, N., de Rochambeau, H., Mounolou, J. C. & Monnerot, M. (1994). Genetic analysis of systematic mitochondrial heteroplasmy in rabbits. *Genetics*, 138(2), 471-480. <https://doi.org/10.1093/genetics/138.2.471>

Casto-Rebollo, C., Argente, M. J., García, M. L., Pena, R. & Ibáñez-Escriche, N. (2020). Identification of functional mutations associated with environmental variance of litter size in rabbits. *Genetics, selection, evolution: GSE*, 52(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00542-w>

Chakraborty, D., Sharma, N., Kour, S., Sodhi, S. S., Gupta, M. K., Lee, S. J. & Son, Y. O. (2022). Applications of Omics Technology for Livestock Selection and Improvement. *Frontiers in Genetics*, 13, 774113. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.774113>

Chantry-Darmon, C., Urien, C., Hayes, H., Bertaud, M., Chadi-Taourit, S., Chardon, P., Vaiman, D. & Rogel-Gaillard, C. (2005). Construction of a cytogenetically anchored microsatellite map

in rabbit. *Mammalian Genome*, 16(6), 442-459. <https://doi.org/10.1007/s00335-005-2471-z>

Compassion in world farming food business. (2024). Information Sheet Rabbit Meat Production. <https://www.compassionin-foodbusiness.com/media/7458150/rabbit-production-global-review-2024.pdf>

Cuevas, M. F., Chillo, V., Marchetta, A. & Ojeda, R. A. (2011). Mammalia, Lagomorpha, Leporidae, *Oryctolagus cuniculus* Linnaeus, 1758: New record and its potential dispersal corridors for northern Mendoza, Argentina. *Check List*, 7(4), 565-566. <https://doi.org/10.15560/7.4.565>

Cullere, M. & Dalle Zotte, A. (2018). Rabbit meat production and consumption: State of knowledge and future perspectives. *Meat Science*, 143, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.029>

Darwish, H. Y. A. & Emam, A. M. (2024). Mitochondrial DNA (mtDNA) genetic variability of cytochrome B gene (CYTB) in three populations of native rabbits in Egypt. *Reproduction and Breeding*, 4(3), 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.repre.2024.06.002>

El-Sabrout, K. (2017). Associations between single-nucleotide polymorphisms of melanocortin gene and sexual desire behavior in rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *Journal of Veterinary Behavior*, 19, 69-71. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2017.02.005>

Elsayed, N., Mandour, A. E. E., Amin, M. K. A., Reda, F. M., Taha, H. S. A., Di Cerbo, A., Azzam, M. M. & Alagawany, M. (2024).

Evaluation of genetic diversity within different rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) genotypes utilizing start codon targeted (SCoT) and inter-simple sequence repeat (ISSR) molecular markers. *Archives Animal Breeding*, 67(3), 285-295. <https://doi.org/10.5194/aab-67-285-2024>

Emam, A., Makhlof, M., Faid-Allah, E. (2024). Estimating the Genetic Situation of Native Upper Egypt Subpopulations of Rabbits Using Microsatellite Markers. *Jurnal Ilmu Ternak Dan Veteriner*, <https://doi.org/10.14334/jitv.v29i2.3428>

Ennafaa, H., Monnerot, M., El Gaaïed, A. & Petit, C. (1987). Rabbit mitochondrial DNA: Preliminary comparison between some domestic and wild animals. *Genetics Selection Evolution*, 19, 279-287. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-19-3-279>

Etukudo, O. M., Ekerette, E. E., Johnson, E. I. & Okon, B. (2024). A mini review on the nutritional benefits of rabbit meat. *Nutrition & Food Science International Journal*, 13(4). https://www.researchgate.net/profile/Om-Etukudo/publication/385635807_Etukudo_OM_Nutri_Food_Sci_Int_J_A_Mini_Review_on_the_Nutritional_Benefits_of_Rabbit_Meat/links/672db839db208342def2c148/Etukudo-OM-Nutri-Food-Sci-Int-J-A-Mini-Review-on-the-Nutritional-Benefits-of-Rabbit-Meat.pdf

Fekete, Z., Német, Z., Ninausz, N., Fehér, P., Schiller, M., Alnajjar, M., Szenes, Á., Nagy, T., Stéger, V., Kontra, L. & Bartha, E. (2025). Whole-Genome Sequencing-Based Population Genetic Analysis of

- Wild and Domestic Rabbit Breeds. *Animals*, 15(6), 775. <https://doi.org/10.3390/ani15060775>
- Goswami, N., Solomon Ahamba, I., Kinkpe, L., Mujtaba Shah, A., Xiangyang, Y., Song, B., Dong, X., Wang, S. & Ren, Z. (2025). Enhancing rabbit farming efficiency with integrated genomics and nutritional strategies. *Frontiers in Animal Science*, 16(5). <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1514923>
- Hardy, C., Vigne, J., Casañe, D., Dennebouy, N., Mounolou, J. C. & Monnerot, M. (1994). Origin of European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) in a Mediterranean island: Zooarchaeology and ancient DNA examination. *Journal of Evolutionary Biology*, 7(2). <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.1994.7020217.x>
- Helal, M., Sameh, J., Gharib, S., Merghany, R. M., Bozhilova-Sakova, M. & Ragab, M. (2024). Candidate genes associated with reproductive traits in rabbits. *Tropical Animal Health and Production*, 56(2), 94. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03938-8>
- Jochová, M., Novák, K., Kott, T., Volek, Z., Majzlík, I. & Tůmová, E. (2017). Genetic characterization of Czech local rabbit breeds using microsatellite analysis. *Livestock Science*, 201, 41-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2017.03.025>
- Krüger, J. & Schleinitz, D. (2017). Genetic Fingerprinting Using Microsatellite Markers in a Multiplex PCR Reaction: A Compilation of Methodological Approaches from Primer Design to Detection Systems. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, 1492, 1-15. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6442-0_1
- Ladoukakis, E. D. & Zouros, E. (2017). Evolution and inheritance of animal mitochondrial DNA: rules and exceptions. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 24(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s40709-017-0060-4>
- Li, J., Zhao, B., Chen, Y., Zhao, B., Yang, N., Hu, S., Shen, J. & Wu, X. (2020). A Genetic Evaluation System for New Zealand White Rabbit Germplasm Resources Based on SSR Markers. *MDPI AG*, 10(8), 1258. <https://doi.org/10.3390/ani10081258>
- Marco, F., Baselga, M. & Vicente, J. S. (2018). Successful re-establishment of a rabbit population from embryos vitrified 15 years ago: The importance of biobanks in livestock conservation. *PLoS One*, 13(6), e0199234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199234>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018, Mayo 24). MinAgricultura busca apoyar a cerca de 39 mil familias productoras de carne de conejo, conformando la cadena productiva. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/MinAgricultura-busca-apoyar-a-cerca-de-39-mil-familias-productoras-de-carne-de-conejo,-conformando-la-cadena-productiva.aspx>
- Monnerot M., Loreille O., Mougel F., Vachot A.M., Dennebouy N., Callou C., Vigne J.D., Mounolou J.C. (1996). The european rabbit: wild population evolution and do-

mestication, 331-334. <https://hal.science/hal-03132972>

Naciones Unidas. (2018). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3). CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40155>

Nagy, I. & Nguyen, T. A. (2023). Characterizing and Eliminating the Inbreeding Load. *Veterinary Sciences*, 11(1), 8. <https://doi.org/10.3390/vetsci11010008>

Nerkowski, S. A., Waits, L. P., Warheit, K. I. & Hohenlohe, P. A. (2024). Range-wide genomic analysis of pygmy rabbits (*Brachylagus idahoensis*) reveals genetic distinctiveness of the endangered Columbia Basin population. *Authorea, Inc.* <https://doi.org/10.22541/au.172803999.95406825/v1>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2011). Molecular genetic characterization of animal genetic resources. *FAO Animal Production and Health Guidelines*, 9. <https://www.fao.org/4/i2413e/i2413e00.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2012). Cryoconservation of animal genetic resources. *FAO Animal Production and Health Guidelines*, 12. <https://www.fao.org/4/i3017e/i3017e00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO].

(2025). FAOSTAT [Conjunto de datos]. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron,I.,Hoffmann,T. C., Mulrow, C. D.,Shamseer,L., Tetzlaff,J. M., Akl, E. A.,Brennan, S. E.,Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjarts-son, A., Lalu, M. M.,Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S. ... & McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(160). <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Ping, X., Chen, Y., Wang, H., Jin, Z., Duan, Q., Ren, Z. & Dong, X. (2025). Whole-genome sequencing reveals patterns of runs of homozygosity underlying genetic diversity and selection in domestic rabbits. *BMC Genomics*, 26(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11616-8>

Priyono, D. S., Rafina, N., Arisuryanti, T., Lesmana, I., Yustian, I., & Setiawan, A. (2025). The first complete mitochondrial genome of Sumatran striped rabbit *Nesolagus netscheri* (Schlegel, 1880), and its phylogenetic relationship with other Leporidae. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85212-x>

Queney, G., Ferrand, N., Weiss, S., Mougel, F. & Monnerot, M. (2001). Stationary distributions of microsatellite loci between divergent population groups of the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *Molecular Biology and Evolution*, 18(12), 2169–2178. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a003763>

Rabie, T. S. K. M. (2020). Assessment of Genetic Variability and Population Structure of Five Rabbit Breeds by Microsatellites Markers Associated with Genes. *Journal of World's Poultry Research*, 10(2s), 125-132. <https://doi.org/10.36380/jwpr.2020.17>

Ren, A., Du, K., Jia, X., Yang, R., Wang, J., Chen, S. & Lai, S. (2019). Genetic diversity and population structure of four Chinese rabbit breeds. *Public Library of Science (PLOS ONE)*, 14(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222503>

Safaa, H. M., Helal, M., Yasser, S., Raafat, Z., Ayman, H., Mostafa, H., Bozhilova-Sakova, M. & Elsayed, D. A. A. (2024). Genome-Wide in Silico Analysis of Microsatellite Loci in Rabbits. *Animals*, 14(24), 3659. <https://doi.org/10.3390/ani14243659>

Safaa, H. M., Ragab, M., Ahmed, M., El-Gammal, B. & Helal, M. (2023). Influence of polymorphisms in candidate genes on carcass and meat quality traits in rabbits. *Public Library of Science (PLOS ONE)*, 18(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294051>

Setiaji, A., Lestari, D. A., Pandupuspitasari, N. S., Agusetyaningsih, I. & Khan, F. A. (2023). Genetic characteristics of complete mtDNA genome sequence of Indonesian local rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 96. <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00546-1>

Sternstein, I., Reissmann, M., Maj, D., Bieiek, J. & Brockmann, G. A. (2014). A new single nucleotide polymorphism in the

rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) *myostatin (MSTN)* gene is associated with carcass composition traits. *Animal Genetics*, 45(4), 596-599. <https://doi.org/10.1111/age.12165>

Surridge, A. K., Bell, D. J., Rico, C. & Hewitt, G. M. (1997). Polymorphic microsatellite loci in the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) are also amplified in other lagomorph species. *Animal Genetics*, 28(4), 302-305. [10.1111/j.1365-2052.1997.00137.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1997.00137.x)

Van Haeringen, W. A., Bieman, M. G. D., Lankhorst, A., Van Lith, H. A. & Van Zutphen, L. F. M. (2002). Application of AFLP markers for QTL mapping in the rabbit. *Genome*, 45(5), 914-921. <https://doi.org/10.1139/g02-060>

Van Haeringen, W. A., van de Goor, L. H. P., Panneman, H., van Lith, H. A., van Haeringen, H. & van Zutphen, L. F. M. (2003). Detection of universal variable fragments as markers for genetic studies. A novel technology for DNA fingerprinting. *Molecular Biotechnology*, 23(2), 117-125. <https://doi.org/10.1385/MB:23:2:117>

Vicente, J. S., Viudes-de-Castro, M. P. & Marco-Jiménez, F. (2023). In vivo rabbit embryo production and cryopreservation review. Application to ex situ conservation and rederivation. *World Rabbit Science*, 31(2). Universitat Politecnica de Valencia. <https://doi.org/10.4995/wrs.2023.18412>

Vicente, J. S., Viudes-de-Castro, M. P., Lavarra, R. & Mocé, E. (2001). Polimorfismo de 13 microsatélites en una línea seleccionada de conejos. <https://www.aida-itea.org>

org/aida-itea/files/jornadas/2001/comunicaciones/2001_Gen_11.pdf

Villegas. (2018, May 24.). Min Agricultura busca apoyar a cerca de 39 mil familias productoras de carne de conejo, conformando la cadena productiva. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/MinAgricultura-busca-apoyar-a-cerca-de-39-mil-familias-productoras-de-carne-de-conejo,-conformando-la-cadena-productiva.aspx>

Wang, X., Zeng, H. M., Wang, Y., Luo, Y., Yao, X. P. & Yang, Z. (2021). The complete mitochondrial DNA sequence of Chuanbai Rex rabbit (*Oryctolagus cuniculus*).

Mitochondrial DNA Part B, 6(1), 129-130. <https://doi.org/10.1080/23802359.2020.1848476>

Yao, C. Y., Li, Y. Y., Liu, L. X., Ma, C., Liu, Y. G. & Liu, Y. H. (2019). The complete mitochondrial DNA sequence of Yimeng wool rabbit. *Mitochondrial DNA. Part B*, 4(2), 3858-3859. <https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1687022>

Ziege, M., Theodorou, P., Jüngling, H., Merker, S., Plath, M., Streit, B. & Lerp, H. (2020). Population genetics of the European rabbit along a rural-to-urban gradient. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57962-3>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



Fecha de recibido: 13-08-2024

Fecha de aceptado: 05-12-2024

DOI: 10.22490/21456453.8412

ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO: IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL

QUANTITATIVE ETHNOBOTANY IN AGRO-LANDSCAPES OF THE COLOMBIAN CARIBBEAN: IMPLICATIONS FOR THE CONSERVATION OF TROPICAL DRY FOREST (TDF)

Liliana Zuluaga Zuluaga ¹

Adelina Rosa Caballero López ²

Jaime Andrés Arias Rojas ³

Darwin Fabián Lombo Ortiz ⁴

Milton Rivera Rojas ⁵

Citación: Zuluaga, L., Caballero, A., Arias, J., Lombo, D. y Rivera, M. (2026). Etnobotánica cuantitativa en agropaisajes del Caribe Colombiano: Implicaciones para la conservación del bosque seco tropical. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 151 - 182. <https://doi.org/10.22490/21456453.8412>

¹ MSc, Terrasos, Carrera 13 # 90 - 20 OF 503, Bogotá, Colombia
liliana.zuluaga@terrasos.co

² MSc, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia. Km 5 vía Becerril, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia.
acaballerol@agrosavia.co

³ Ingeniero Forestal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia. Km 5 vía Becerril, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia. jarias@agrosavia.co

⁴ MSc, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia. Km 5 vía Becerril, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia. dlombo@agrosavia.co

⁵ MSc, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia. Km 5 vía Becerril, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia. mrivera@agrosavia.co

RESUMEN

Contextualización: Los bosques secos tropicales (Bs-T) son ecosistemas importantes para la vida de las comunidades, aunque presentan un alto grado de amenaza. La región Caribe de Colombia cuenta con la mayor cobertura de Bs-T en el país y muchas de estas áreas se encuentran integradas a los agropaisajes, por tanto, las estrategias de conservación de estos ecosistemas deben vincular a las comunidades y demás actores del territorio, para propender por un desarrollo sostenible, en el que la naturaleza, el desarrollo productivo y la inclusión social estén armonizados. En este sentido, los métodos de etnobotánica cuantitativa son fundamentales para la conservación de la biodiversidad, documentan el conocimiento tradicional sobre el uso de los árboles y proporcionan herramientas técnicas, para preservar la riqueza biocultural, orientar la integración de árboles en los paisajes de manera sostenible y fortalecer el empoderamiento poblacional en la gestión de los recursos naturales para la subsistencia y el desarrollo local.

Vacío de conocimiento: En la región Caribe de Colombia existen pocos estudios sobre etnobotánica cuantitativa orientada a las especies arbóreas, información necesaria para la construcción de estrategias enfocadas al manejo sostenible y la conservación de los recursos florísticos bajo la escala de agro-paisaje en los que se encuentran inmersos los Bs-T.

Objetivos: Documentar conocimientos etnobotánicos sobre los usos de las especies arbóreas, mediante la consulta a diferentes actores del territorio (expertos, conocedores

y productores agropecuarios) y el análisis de la información a través de métodos cuantitativos, en los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, La Guajira, Magdalena y Sucre.

Metodología: Realización de entrevistas semiestructuradas con 75 informantes, distribuidos en diferentes grupos de consulta, como expertos (25), conocedores (18) y productores (32), donde se indagaron los usos etnobotánicos y parte de la planta útil de las especies empleadas en la zona de estudio.

Resultados y conclusiones: Se identificaron 313 especies, dentro de las cuales predomina la familia Fabaceae con 80 especies y un índice de Shannon de 5,5, lo cual sugiere una diversidad considerable en el conocimiento tradicional sobre el uso de las plantas; el índice de Pielou fue de 0,66, reflejando que no hay una especie dominante en el número de usos n. Las especies con mayor número de usos son *Genipa americana* L, con 17 usos; *Cordia Alba* Jacq, con 16 usos; *Guazuma ulmifolia* Lam y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, con 15 usos, respectivamente. Este estudio resalta la diversidad del saber tradicional y la necesidad de conservar el conocimiento de los recursos naturales que sustentan las prácticas de uso. Los hallazgos ofrecen una base para futuras investigaciones etnobotánicas y brindan una guía valiosa para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo sostenible de la biodiversidad en la región Caribe colombiana.

Palabras clave: bosque seco tropical, conocimiento tradicional, diversidad biocultural, etnobotánica, valor de uso.

ABSTRACT

Contextualization: Tropical dry forests (Bs-T) are important ecosystems for community life, although they pose a high degree of threat. The Caribbean region of Colombia has the largest coverage of Bs-T in the country and many of these areas are integrated into agro-landscapes, therefore, conservation strategies for these ecosystems must link communities and other actors in the territory, to promote sustainable development, in which nature, productive development and social inclusion are harmonised.

In this sense, quantitative ethnobotany methods are fundamental for biodiversity conservation, documenting traditional knowledge about the use of trees and providing technical tools to preserve biocultural wealth, guide the integration of trees into landscapes in a sustainable manner and strengthen population empowerment in the management of natural resources for subsistence and local development.

Knowledge gap: Lack of documentation on species and their traditional uses, added to the scarcity of research analysing how this knowledge is transmitted between generations, understanding the cultural and social mechanisms that allow the conservation and use of this knowledge.

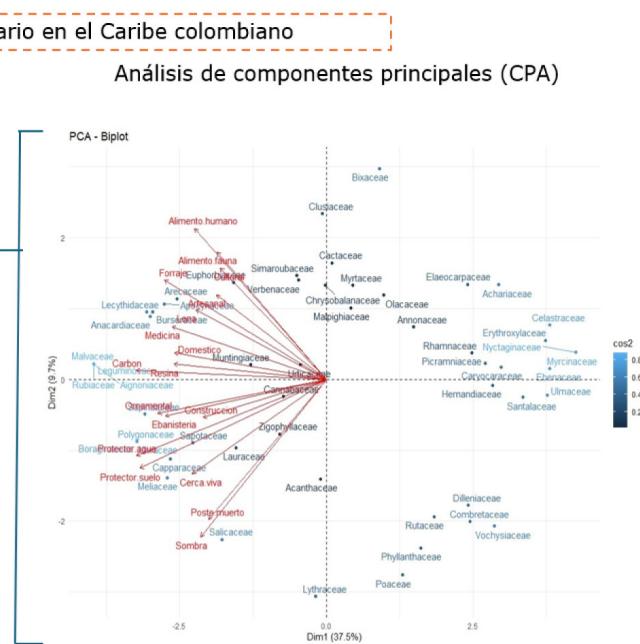
Objectives: To document traditional knowledge about the use of trees, and their useful parts, in the departments of Atlántico, Bolívar, Cesar, La Guajira, Magdalena and Sucre.

Methodology: Conducting semi-structured interviews with 75 informants, distributed in different consultation groups such as experts (25), experts (18) and producers (32) where ethnobotanical uses and part of the useful plant of the species used in the study area were investigated

Results and conclusions: 313 species were identified, among which the Fabaceae family predominates with 80 species and a Shannon index of 5.5, which suggests a considerable diversity in traditional knowledge on plant use; the Pielou index was 0.66, reflecting that there is no dominant species in the number of uses n. The species with the highest number of uses are *Genipa americana* L, with 17 uses; *Cordia Alba* Jacq, with 16 uses; *Guazuma ulmifolia* Lam and *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb with 15 uses respectively. This study highlights the diversity of traditional knowledge and the need to conserve knowledge of the natural resources that support use practices. This study highlights the diversity of traditional knowledge and stresses the need to conserve knowledge as the natural resources that sustain use practices. The findings provide a basis for future ethnobotanical research and provide valuable guidance for the development of biodiversity conservation and sustainable management strategies in the Colombian Caribbean region.

Keywords: Tropical dry forest, traditional knowledge, biocultural diversity, ethnobotany, use value.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

La etnobotánica se ha establecido como un campo fundamental para analizar las interacciones entre las comunidades humanas y las plantas en diversos contextos ecológicos y culturales. Este enfoque proporciona información valiosa sobre el uso de especies vegetales y permite una evaluación crítica de su significancia cultural y ecológica. Investigaciones recientes subrayan la relevancia de la etnobotánica en la confrontación de desafíos contemporáneos, tales como la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad de los recursos. (Maffi, 2005)

Desde la perspectiva de la etnobotánica cuantitativa, se aplican diversas categorías que facilitan el análisis del uso de las plantas, evaluando su importancia cultural y ecológica. Entre estas categorías se incluyen el valor de uso, la significancia cultural y el estatus de especies clave dentro de la comunidad (Zenderland et al., 2019; Albuquerque et al., 2006). Los índices de importancia cultural, como el valor de uso, no solo cuantifican la relevancia de las especies, sino que también permiten explorar su papel en la identidad cultural y en las prácticas de subsistencia de las comunidades (Rosero-Toro et al., 2018).

No obstante, es crucial reconocer que muchos de estos índices no siempre reflejan adecuadamente el estatus de especies que son culturalmente significativas, lo que enfatiza la necesidad de adoptar enfoques más detallados en la investigación etnobotánica (Coe & Gaoue, 2020).

En este contexto, los bosques secos tropicales (Bs-T) se presentan como un caso paradigmático, estos biomas enfrentan amenazas considerables, debido a la deforestación y el cambio climático (Siyum, 2020). En Colombia, estos bosques cubren alrededor de 735 514 hectáreas, con un 39,2 % de esta área ubicada en la región Caribe. Esta región ha experimentado transformaciones significativas, convirtiéndose en una de las zonas con mayores tasas de cambio en el uso del suelo en el país (Armenteras-Pascual et al., 2011; Pizano y García, 2014). A pesar de su importancia ecológica, los bosques secos tropicales de la región Caribe están amenazados por la conversión de tierras para actividades agrícolas, pecuarias y otros usos, lo que compromete su estado de conservación (Armenteras y Rodríguez, 2014). Estos ecosistemas también enfrentan desafíos globales, como la variabilidad en las precipitaciones y el incremento de incendios forestales (Barrance et al., 2009; Jiménez-Romero et al., 2019).

La importancia de los bosques secos se manifiesta en su papel vital para el sustento de muchas comunidades rurales, que dependen de recursos como productos maderables y no maderables (Castillo y Jácome, 2022). La comprensión de la diversidad de especies y sus usos resulta esencial no solo

para la conservación de estos ecosistemas, sino también para la planificación sostenible de su aprovechamiento. En este contexto, el concepto de agro-paisaje cobra relevancia, ya que integra prácticas agrícolas con la conservación de elementos clave del paisaje, promoviendo un uso sostenible de los recursos y fortaleciendo la resiliencia de las comunidades locales (Blackie et al., 2014). En este marco, el agro-paisaje se presenta como un entorno donde las interacciones entre la agricultura y la biodiversidad son esenciales para mantener la funcionalidad del ecosistema, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al bienestar social.

La etnobotánica, por tanto, se convierte en una herramienta crucial para la conservación de la biodiversidad en agro-paisajes, permitiendo a las comunidades gestionar sus recursos de manera sostenible (Phillips & Gentry, 1993). Los estudios etnobotánicos han evidenciado la riqueza y diversidad de especies en los bosques secos tropicales y su relevancia para las comunidades locales. Estas investigaciones han mostrado cómo las comunidades utilizan plantas para fines medicinales, alimenticios y de construcción, reflejando un conocimiento profundo del entorno (Rosero-Toro et al., 2018; Zenderland et al., 2019). La variabilidad en el uso de especies entre comunidades también ilustra adaptaciones culturales que favorecen la conservación (Albuquerque et al., 2017; Coe & Gaoue, 2020; Marín-Corba et al., 2005). Ante la amenaza que representan la deforestación y el cambio climático para estos ecosistemas, es vital documentar y valorar este conocimiento. Así, el presente artículo tiene como objetivo contribuir con datos etnobo-

tánicos actualizados sobre especies arbóreas en la región Caribe, ofreciendo una base sólida para desarrollar estrategias de conservación y manejo sostenible en agro-paisajes.

Para llevar a cabo esta investigación, se han recopilado conocimientos etnobotánicos sobre especies arbóreas de la región Caribe a través de entrevistas con expertos y productores locales, complementadas con técnicas de análisis cuantitativo, tales como los índices de diversidad de Shannon y Pie-lou. Estos índices son fundamentales para caracterizar la riqueza y uniformidad de las especies identificadas en el estudio. No solo permiten cuantificar la biodiversidad de las plantas utilizadas por las comunidades, sino que también brindan una comprensión más profunda de cómo la variabilidad de los recursos vegetales puede impactar el bienestar social y cultural. Al integrar estos índices en

el análisis etnobotánico, esta investigación propone un enfoque innovador que aporta significativamente al campo, subrayando la importancia de la diversidad biológica en las prácticas de uso y conservación (Medeiros et al., 2011).

Las preguntas de investigación formuladas fueron las siguientes: i) ¿Cuáles son las especies y familias más importantes en términos de uso en la región Caribe? y ii) ¿Cuáles son los usos específicos y las partes de las plantas que se emplean de las especies más relevantes en la región Caribe? Se espera que los hallazgos de este estudio contribuyan a llenar vacíos en el conocimiento etnobotánico sobre especies arbóreas en la región Caribe y que sirvan como referencia para la conservación y el manejo sostenible de los recursos en el agro-paisaje.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló durante 12 meses, en la región Caribe de Colombia en 22 localidades en los departamentos del **Atlántico** (Barranquilla), **Bolívar** (Cartagena, Turbaco, San Juan Nepomuceno, Arjona,

San Jacinto, El Carmen de Bolívar y Mangué), **Cesar** (Becerril, Agustín Codazzi, Chiriguaná, Curumaní, La Jagua de Ibirico, Valledupar), **La Guajira** (Riohacha, Uribia), **Magdalena** (El Banco, Tamalameque, Santa Marta, Sabanas de San Ángel) y **Sucre** (Majagual y San Marcos) (Figura 1).

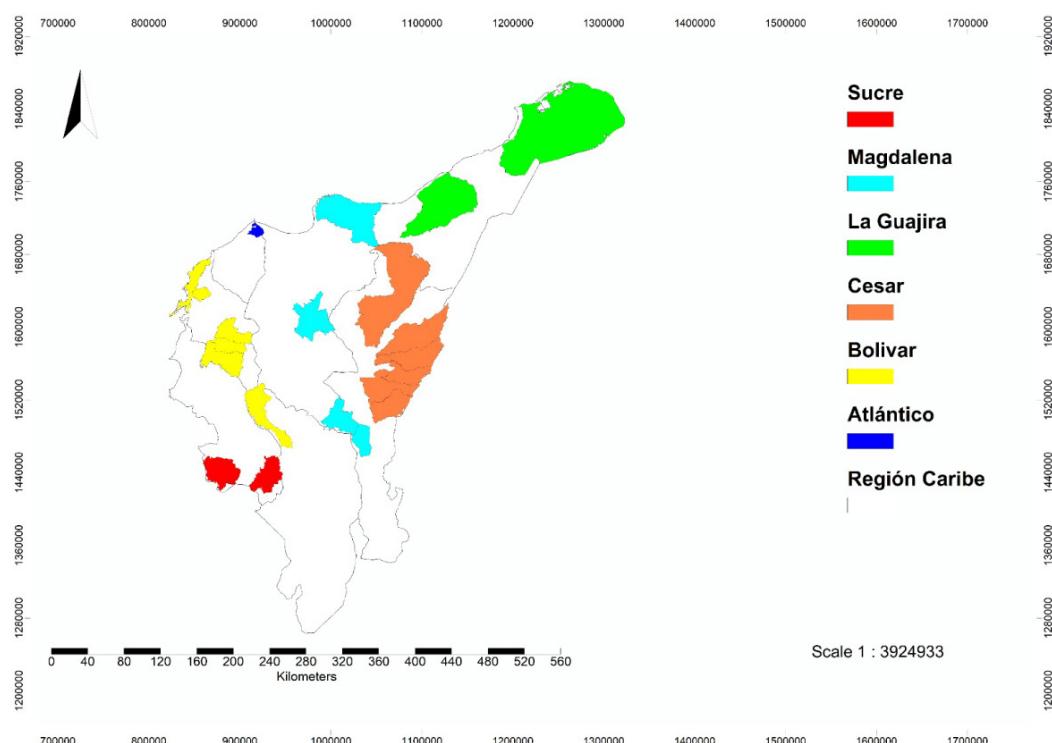


Figura 1. Área de estudio región Caribe de Colombia

Fuente: autores.

Esta región ocupa el 11,6 % de la superficie de Colombia, concentra el 21,8 % de la población y produce un 15 % del producto interno bruto (PIB); las actividades económicas más representativas son: industria, construcción, minería y agropecuaria (Aranza et al., 2017). Corresponde a una zona de vida denominada bosque seco tropical (Bs-T), que se caracteriza por tener un clima cálido y suelos poco húmedos, lo cual ocasiona una baja productividad agrícola, lo que ha llevado a que predomine la ganadería extensiva y cambios en el uso del suelo. Sin embargo, está conformada mayoritariamente por tierras bajas y planas, contiene numerosas bahías naturales con excelentes condiciones para recibir embarcaciones y se puede integrar por vía fluvial al país a través del río Magdalena y

sus afluentes como los ríos Cauca, San Jorge, Nechí, Cesar y Lebrija (Aguilera et al., 2013). Además, se caracteriza por reunir empresas que desarrollan actividades de aserrío, venta y comercialización de madera inmunizada, fabricación de tableros aglomerados, chapados y contrachapados, hasta empresas fabricantes y comercializadoras de muebles y accesorios diversos para el hogar, oficinas e industria en general, entre otros usos (Sallas-Navarro, 2013). Estas condiciones hacen de la región Caribe una zona con potencial para exportar y comercializar productos y derivados extraídos de los diferentes usos de los árboles en los agroecosistemas (ganadería, silvicultura y agricultura) como alternativa económica, social y ambiental para los pobladores de la región.

Metodología

La investigación consistió en el levantamiento de entrevistas de campo con informantes clave, adoptando técnicas de preguntas abiertas y semiestructuradas (Awan et al., 2021). El diseño metodológico se realizó en una fase de reconocimiento preliminar, que incluyó la definición de las tipologías de los entrevistados, con el propósito de obtener información de diferentes fuentes, lo que permitiría documentar la diversidad de especies arbóreas, usos e importancia en la región. Se utilizó el método de bola de nieve, considerado un método de muestreo exponencial no probabilístico y no discriminatorio (Klingen et al., 2012). Se consultó un primer grupo, denominado expertos o personas con conocimiento técnico y científico de los árboles, que trabajaban en organizaciones gubernamentales y no gubernamental de referencia en la región, tales como oficinas de Parques Nacionales, Corporaciones Autónomas Regionales, Universidades, Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), los cuales, después de ser entrevistados, refirieron a un siguiente grupo, denominado conocedores, conformado por técnicos o profesionales con conocimiento y experiencia sobre las arbóreas. Estos a su vez recomendaron el grupo de productores agropecuarios, cerrando así el ciclo de obtención de información primaria. En total se realizaron 75 entrevistas distribuidas de la siguiente manera: 25 expertos, 18 conocedores y 32 productores.

Se aplicaron entrevistas semiestructuradas; en el caso de productores dueños de fincas se indagó sobre las especies que existían

en su predio, posteriormente se les consultó sobre el uso reconocido que tenía la misma en el desarrollo de sus actividades cotidianas como productor: al grupo de técnicos y expertos se les preguntó sobre las especies que reconocían en el territorio además del uso que ellos reconocían de las mismas por parte de los productores y las comunidades; el reconocimiento de las especies se hizo mediante experticia del equipo en campo. Para las especies en las que se tuvo duda, se colectaron muestras que fueron enviadas al herbario del Jardín Botánico de Cartagena Guillermo Piñeres. Para la recolección de información se desarrolló un instrumento que contenía la siguiente información de las especies: i) nombre vernáculo del árbol; ii) 18 categorías de uso adaptadas de (Cárdenas et al., 2000 como construcción (CO), leña (LE), carbón (CA), postes muertos (PM), ebanistería (EB), alimento humano (AH), forraje (FO), alimento para la fauna (AF), sombrío (SO), cerca viva (CV), protector de agua (PA), protector de suelo (PS), medicinal (ME), ornamental (OR), artesanía (AR), resina o látex (RL), símbolo cultural (SC), uso doméstico en el hogar (UD) iii) se considera de alta relevancia identificar si el uso de un recurso puede ser o no mantenido en el tiempo y cómo afecta la explotación a los volúmenes disponibles del mismo; para tal fin se consultó sobre cuál es la parte de árbol con mayor uso según las siguientes categorías: fuste (FU), fruto (FR), planta viva (PV), hoja (HO), corteza (CO), exudado (EX), semilla (SE), cogollo (CO), flor (FL), raíz (RA) (Marín-Corba et al., 2005).

Para corroborar los nombres vernáculos de las especies entre los diferentes encues-

tados se utilizó la información consignada en bases de datos como Word flora on line <https://www.worldfloraonline.org/> y del herbario de la Universidad Nacional de Colombia / nombres comunes de plantas de Colombia, <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/es/>. En los casos en que existía alguna duda, el experto entrevisor corroboraba en campo la coincidencia de los nombres dados por los entrevistados, mediante identificación de la especie.

Etnobotánica cuantitativa

En la etnobotánica se han utilizado técnicas cuantitativas para comparar los usos y la importancia cultural de diferentes taxones de plantas (Albuquerque et al., 2006). Estos análisis son de gran interés científico, ya que reflejan sistemas de valores culturales y también pueden ayudar en la conservación de la biodiversidad (Byg & Balslev, 2001). La información cuantitativa aumenta la probabilidad de mejorar el conocimiento y comprensión de las especies, lo que se refleja en la metodología empleada para determinar el valor de uso de las especies.

Valor de uso de las especies

Para determinar el valor de uso de una especie o una familia se empleó el enfoque de sumatoria de usos (Boom, 1989; Boom, 1990; Phillips, 1996), que consiste en sumar el número de usos dentro de cada categoría. Cada una posee un valor de uno (1), sin importar el número de usos registrados y en caso de encontrarse una especie con varios usos dentro de la misma categoría, se divide la unidad por el número de usos. Al respecto,

el valor máximo de la importancia de uso de un taxón equivale al número de categorías propuestas y no al número de usos diferentes dados a una especie (Marín-Corba et al., 2005). El valor final de uso por especie fue definido por el total de usos diferentes, es decir las categorías de uso, reportados en las entrevistas realizadas. Según Phillips (1996), el potencial de esta metodología radica en la rapidez de su aplicación y en que provee datos cuantitativos confiables para grandes áreas a un costo relativamente bajo.

Análisis de diversidad

Con el propósito de identificar la importancia en términos de diversidad de cada una de las familias y especies reportadas, se aplicaron índices de diversidad al conocimiento cultural mediante los siguientes índices:

Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H')

El índice de diversidad de Shannon (H') (Shannon y Weiner, 1963), comúnmente los valores de (H') varían entre 1,5 y 3,5, ocasionalmente sobrepasan los 4,5 (Magurran, 1988), valores altos de H' indican una abundante diversidad de usos y conocimientos sobre las especies locales por parte de las comunidades. Así, el análisis de H' proporciona no solo información sobre la estructura biológica de los agroecosistemas, sino también sobre las dinámicas culturales y las relaciones entre las comunidades y su entorno vegetal. Este índice se obtiene aplicando la ecuación 2, es una herramienta valiosa en análisis etnobotánicos debido a su capacidad para cuantificar la diversidad del uso de

plantas en las comunidades, al proporcionar una medida cuantitativa de la diversidad de plantas conocidas y utilizadas por los pobla-

dores, no solo mide la cantidad de especies útiles diferentes, sino también cómo se distribuyen el uso entre estas especies. (Ecuación 1).

$$H' = \sum \pi_i \ln(\pi_i)$$

(1)

Donde:

H' = índice de Shannon-Wiener

π_i = (n_i/N) abundancia proporcional relativa

n_i = número de individuos de i ésima especie

N = número de individuos totales

Índice de Equidad de Pielou

El índice de equidad de Pielou cuantifica la proporción de la diversidad observada en relación con la máxima diversidad que podría esperarse en un entorno dado. Su escala varía de cero a uno (0 a 1), donde un valor de uno (1) indica una distribución equitativa de las especies utilizadas, sugiriendo que todas

tienen una abundancia similar. En contraste, un valor de cero (0) refleja una marcada desigualdad, con una o pocas especies dominando el uso. Este índice, por lo tanto, no solo proporciona información sobre la biodiversidad, sino que también permite inferir patrones de uso y gestión de los recursos vegetales por parte de las comunidades locales (Pielou, 1975; Magurran, 1988). (Ecuación 2).

$$J' = \frac{H}{\log_2 S}$$

(2)

Donde,

J' = índice de equidad de Pielou

H = índice de Shannon-Wiener

$\log_2 S$ = es igual que la diversidad máxima obtenida si la abundancia de especies en la comunidad fuera perfectamente equitativas (Logaritmo₂ de la suma total de especies).

Análisis de datos

Con la información recopilada se construyó la base de datos de las especies y sus usos en Microsoft Excel. Para agrupar las familias botánicas de acuerdo con las categorías de uso reportadas para las familias, se realizó un análisis de componentes prin-

cipales (CPA) por el criterio de raíz latente, utilizando los paquetes FactoMineR y Factoextra. Se realizaron test de esfericidad de Bartlett y Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) para los supuestos de multicolinealidad de las correlaciones con el uso del paquete Psych (Kaiser & Rice, 1974; Reis, 2001) y descartaron variables con valores de communalidad

< 0,5 para el CPA. La visualización de datos se manejó utilizando el paquete ggplot2 proporcionando un marco cohesivo para la visualización integral de datos. Los análisis

computacionales se realizaron utilizando el lenguaje de programación R (versión 4.3.1) (R Core Team, 2023).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Valor de uso de las especies

Según los usos de la especie, se reportaron 18 categorías, destacando el interés económico de la madera para la construcción (163), alimento para fauna (150), uso medicinal (143), postes muertos (135), uso do-

méstico y hogar (118), leña (111), alimento humano (106), ebanistería (100), protección de suelo (88), carbón (865), sombra (79), uso ornamental (77), forraje (73), protección de fuentes de agua (74), resinas y látex (53), cercas vivas y símbolo cultural (34) y artesanías (33) (Figura 2).

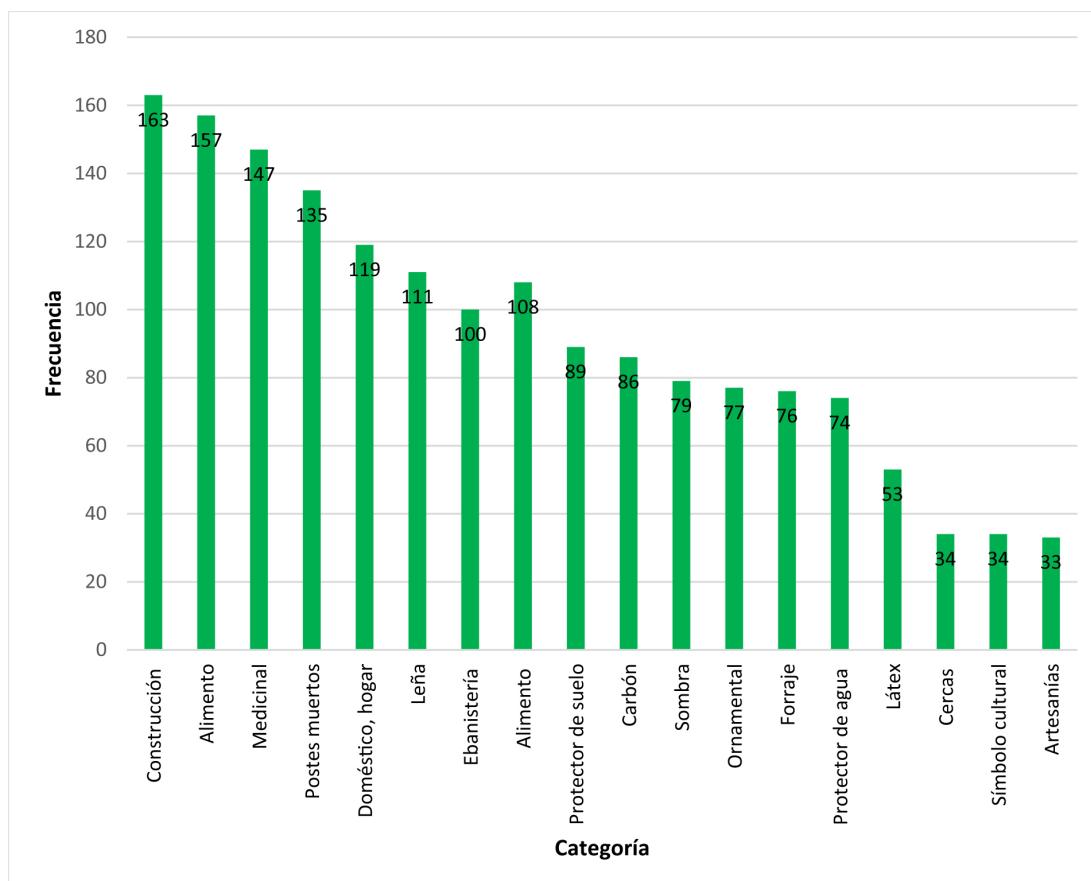


Figura 2. Frecuencia de uso de especies arbóreas por categoría

Fuente: autores.

Las especies con mayor número de usos son *Genipa americana* L. (jagua), con 17 usos; *Cordia Alba*. Jacq (uvito), con 16 usos;

Guazuma ulmifolia Lam. (guácimo) y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (orejero), con 15 usos (Tabla 1).

Tabla 1. Especies con mayor número de usos informados

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Rubiaceae	<i>Genipa americana</i> L.	Jagua, palo de jagua, caruto, huito, majagua, encerao, zapatiño, pijiño	CO, LE, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD.	17
Boraginaceae	<i>Cordia alba</i> (Jacq.)	Cansaviejo, uvita macho, uvito, jobito	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL UD.	16
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Guacimo, mielquemada	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME AR, RL, UD	15
Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Carita, carito, orejero	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL.	15
Anacardiaceae	<i>Spondias mombin</i> L.	Jobo, hobo, ciruelo, ciruela criolla	CO, LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD	14
Malvaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Bonga, ceiba bonga, ceiba bruja	CO, CA, EB, AH, AF, SO, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD.	14
Bignoniaceae	<i>Crescentia cujete</i> L.	Totumo	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, AR, RL, SC, UD.	14
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i> L.	Jaboncillo, pepo, siminuñe	CO, SA, L, PM, L, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL.	13
Fabaceae	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Algarrobo	CO, LE, PM, AH, FO, SO, PA, PS, ME, AR, RL, SC, UD.	13
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Gusanero, quebracho, santa-cruz	CO, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL, SC, UD.	13

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS
Malvaceae	<i>Stterculia apetala</i> (Jacq.) H.Karst.	Camajoru, camajorudo, camajon, piñon	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, PA, PS, ME, OR, UD. 13
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro, cedro cebollo, cedro rojo	CO, LE, CA, PM, EB, AF, SO, CV, PA, PS, ME, RL, UD. 13
Fabaceae	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.	Trupillo, cují, trupí	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL. 13
Boraginaceae	<i>Cordia collococca</i> L.	Muñeco, arato, caujaro	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, ME, UD. 12
Rubiaceae	<i>Calycophyllum candissimum</i> (Vahl) DC.	Guayabo, guayabo macho, guayabo colorado	CO, LE, CA, PM, AH, FO, SO, PA, PS, ME, OR, UD. 12
Fabaceae	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.	Matarraton, madre del cacao	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, UD. 12
Fabaceae	<i>Cassia grandis</i> L.f.	Cañafistula, cañandonga, acacia rosada, jamanare	CO, LE, PM, EB, AH, FO, SO, PA, ME, OR, RL, UD. 12
Fabaceae	<i>Inga densiflora</i> Benth.	Guamo mico	LE, CA, PM, AH, AF, SO, PA, PS, ME, AR, RL, UD. 12
Lecythidaceae	<i>Lecythis minor</i> Jacq.	Cocuelo, olla de mono	CO, CA, PM, AH, FO, AF, PA, PS, ME, AR, SC, UD. 12
Fabaceae	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	Campano, algarroblillo	CO, LE, CA, PM, EB, FO, AF, SO, PA, PS, OR, UD. 12
Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i> Swarth.	Guaimaro, palanco	CO, LE, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, OR, RL. 12
Muntingiaceae	<i>Muntingia calabura</i> L.	Guayuyo, vara de paloma, niguítio, chitato, nigua, PeriquitoCrys	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL, UD. 12

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Cannabaceae	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	Surrumbo, zurrumbo, maja-guillo	CO, LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME.	11
Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	Aceituno	CO, LE, EB, AH, FO, AF, SO, PS, ME, SC, UD.	11
Fabaceae	<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton y Rose	Chicho, baranó	LE, CA, EB, AH, FO, AF, SO, PS, ME, RL, UD.	11
Fabaceae	<i>Vachellia macracantha</i> (Humb. y Bonpl. ex Willd.) Seigler y Ebinger	Aromo	CO, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, UD.	11
Moraceae	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don e1 Steud. Ó <i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Gaudich. e1 Benth	Mora, dinde, amarillo	CO, LE, CA, PM, EB, AF, SO, PS, ME, OR, UD.	11
Arecaceae	<i>Sabal mauritiiformis</i> (H. Karst.) Griseb. y H. Wendl.	Palma amarga, amarga, chingale, anchambe, enhamba	CO, PM, AH, FO, AF, PS, ME, OR, AR, SC, UD.	11
Polygonaceae	<i>Triplaris americana</i> L.	Varasanta, volador blanco	CO, LE, CA, PM, EB, AF, CV, PA, PS, ME, UD.	11
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum caimito</i> L.	Caimito, maduraverde	CO, PM, EB, AH, AF, SO, PA, PS, ME, RL, UD.	11
Fabaceae	<i>Vachellia farnesiana</i>	Aromo	CO, LE, CA, PM, FO, SO, PA, PS, ME, RL, UD.	11

⁽¹⁾ **Construcción.** (CO), leña (LE), carbón (CA), postes muertos (PM), ebanistería (EB), alimento humano (AH), forraje (FO), alimento para la fauna (AF), sombrío (SO), cerca viva (CV), protector de agua (PA), protector de suelo (PS), medicinal (ME), ornamental (OR), artesanía (AR), resina o látex (RL), símbolo cultural (SC), uso doméstico en el hogar (UD).

Se reportan especies con más de diez usos.

Fuente: autores.

De acuerdo con, Lombo et al. (2023) en árboles dispersos en pasturas en el departamento del Cesar, identificaron que el 65 % de las especies censadas presentan importancia para la subsistencia y están asociadas a usos no maderables, forraje, frutos y sombrío para el ganado, además de cerca viva y medicina. Entre estas especies se desatacaron *A. saman*, *G. ulmifolia*, *A farnesiana*, *G. sepium*, *C. cujete* y *C alba*. Mientras las especies con uso principal maderable (32 %) están asociadas a individuos con importancia económica en el mercado local o usados al interior de la finca, como leña y construcciones agropecuarias o viviendas mediante la transformación de la madera en tablas, vigas, postes y listones. Entre las especies más importantes se encontraron *M. tinctoria*, *T. rosea*, *T. ochacea* y *S. apetala* y *C. pentandra*.

En el presente estudio, se identificaron varias especies que destacaron por la cantidad de usos reportados por las comunidades locales; entre estas especies sobresalen la *G. americana*, con 17 usos, reconocida por sus múltiples funciones; es una especie beneficiaria del ambiente, proveedora de diversos productos útiles para los humanos y con potencial para reforestación orientada a la provisión de bienes no maderables como tintas; es una especie pionera, crucial para incluirla en proyectos de restauración ecológica debido a su rápido crecimiento y su contribución significativa de biomasa al suelo. Además, sus frutos comestibles son atractivos para la fauna que participa en la polinización y dispersión de semillas (UNAL, 2023).

La especie *C. alba*, con 16 usos, es valorada por su capacidad para proteger el suelo,

se utiliza, en cercas vivas y sistemas silvopastoriles de árboles dispersos en potreros y, su madera es apreciada en mercados internacionales (Lombo et al., 2022). Seguidamente, con 15 usos, se ubica *G. ulmifolia*, considerado un árbol versátil debido a la amplia gama de productos y servicios que proporciona a la agricultura, ganadería, industria cosmética y medicina, al respecto es de uso común en sistemas agroforestales como cerco vivo y como sombrío en sistemas silvopastoriles (Torres et al., 2006), además de ofrecer estructura y protección a la flora, fauna y fuentes de agua (Beetz, 2006; Jiménez y Estupiñan, 2011).

Otras especies, como *E. cyclocarpum*, ofrecen beneficios significativos en paisajes ganaderos; este es valorado por su capacidad para proporcionar sombra para el ganado, su sistema radicular profundo contribuye a la estabilidad del suelo, proporciona hábitats para la fauna silvestre, además su follaje y frutos son utilizados como forraje en época de escasez de alimentos para el ganado, mejorando así la disponibilidad de nutrientes en el año (Chaves et al., 2009).

Estas plantas no solo juegan un papel crucial en la subsistencia y cultura de las comunidades, sino que también ofrecen oportunidades significativas para el desarrollo sostenible y la conservación de los recursos naturales en la región Caribe. Por otro lado, el conocimiento de las partes usadas de las especies arbóreas es importante porque puede influir en la preservación de la sabiduría ancestral y las prácticas culturales de las comunidades, adicionalmente puede contribuir con la conservación de las especies y

del ecosistema, dado que el uso irracional de un recurso arbóreo puede amenazar su sostenibilidad (Martin, 1995) En relación con esto, se encontró que el fuste es la parte más usada, con un 25 %, seguido del fruto y la planta viva con un 18 % y 15 %, respectivamente (Figura 3). El uso del tallo implica la eliminación de la planta, este puede poner

en riesgo la especie, sobre todo si no se manejan adecuadamente las prácticas de conservación, por tanto, las comunidades deben sensibilizarse acerca de la implementación de principios de manejo sostenible, que permitan la recuperación de la especie a través del replante de los individuos eliminados.

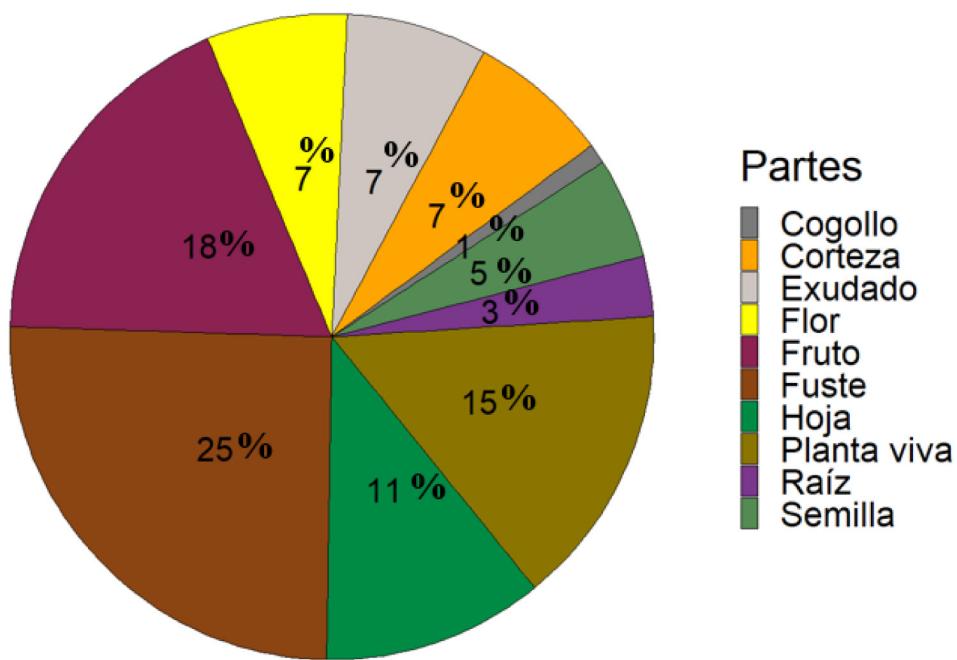


Figura 3. Partes útiles de las arbóreas

Fuente: autores.

Análisis de diversidad

Se registró un total de 313 especies arbóreas, pertenecientes a 54 familias y 187 géneros. estas especies se configuran como las “especies culturales claves” (Garibaldi & Turner, 2004), debido a su importancia en las costumbres, tradiciones y conocimientos de las comunidades locales. Al estar vinculadas al “patrimonio etnobotánico local”, (Pardo y Gómez, 2003) reflejan la conexión entre

la diversidad biológica y las prácticas culturales, resaltando la necesidad de preservar tanto los recursos biológicos como los saberes tradicionales que favorecen su manejo sostenible. Se constituyen, por tanto, en el punto de partida para la formulación de los planes de manejo orientados a usos y conservación (Garibaldi, 2004).

En cuanto a la predominancia de las familias botánicas, la familia Fabaceae que

abarcía el 25,56 % aportó el mayor número de especies, caracterizándose por ser una familia representativa del ecosistema bosque seco tropical, tal como lo demuestran los estudios de Sánchez-Merlos et al. (2005), al igual que lo reportado por IAvH (1998), Rodríguez et al. (2012) y Polania (2019) en relictos conservados de bosque seco tropical en condiciones naturales. Esta condición está influenciada por su amplia distribución y diversidad en el trópico (Gentry 1995; Rodríguez et al., 2012), favorecida también por su capacidad de adaptación, colonización, facilidad de propagación y crecimiento, además de ser fijadoras de nitrógeno (Pizano y García 2014; Zuluaga y Castro 2018). Con un 5,11 %, Malváceae, conocida por sus especies adaptadas a diversos hábitats, contribuye a la estabilidad de los ecosistemas y sirve como fuente de recursos para las comunidades locales que aprovechan sus fibras y flores (Judd et al., 2009).

Arecaceae, con 5,11 %, otra familia destacada, es fundamental para la fauna; varias especies son aprovechadas para alimentación y materiales, lo cual fomenta prácticas de conservación mediante un uso sostenible (Pedersen & Balslev, 1993).

Familias como Bignonaceae, Moraceae y Rubiaceae, con 4,79 %, 4,15 %, 3,83 % respectivamente, también aportan a la estabilidad ecológica: Bignonaceae incluye especies con flores adaptadas para atraer a polinizadores específicos, promoviendo la polinización cruzada (Gentry, 1995); Moraceae proporciona frutos que son recursos clave para la fauna, en especial para aves y mamíferos (Berg, 2007), mientras que Rubiaceae, con

su diversidad de especies, es importante en servicios ecosistémicos y medicina tradicional, especialmente en los trópicos (Delprete & Cortés, 2004).

Por último, Boraginaceae y Polygonaceae representan el 3,51 % y el 3,19 %, respectivamente. Aunque con menor representación, tienen especies que contribuyen a la restauración de suelos y a la biodiversidad en áreas degradadas, dado su potencial para adaptarse a condiciones adversas (Rodríguez et al., 2012). Estas familias, en conjunto, subrayan la necesidad de conservar una gama amplia de especies para asegurar la resiliencia de los ecosistemas locales frente a presiones ambientales y cambios climáticos.

Nuestros resultados concuerdan con los reportados por López et al. (2016), quienes identificaron 364 especies distribuidas en 85 familias botánicas, en un estudio de uso de las especies en la región Caribe. Así mismo, Rojas et al. (2021), en una investigación en diversidad de árboles dispersos en pasturas en el departamento del Cesar, determinaron que la familia Fabaceae tuvo la mayor representación, seguida de Malvaceae, Moraceae y Boraginaceae. Por otro lado, Zuluaga y Escobar (2018) concuerdan en que la familia Fabaceae es la de mayor representación en coberturas de bosque seco tropical (Bs-T) en el departamento de Bolívar, al igual que Sanmartín et al. (2016) en bosques del Departamento de Sucre. Finalmente, Carbonó et al. (2021) en Bs-T en los departamentos de Atlántico, Bolívar, La Guajira y Magdalena, la familia con mayor riqueza específica y representación fue la fabaceae. Los resultados reportados en estos estudios concuer-

dan que esta familia botánica tiene mucha importancia para los bosques y relictos de bosque seco en la región Caribe.

La familia Fabaceae se considera una de las más diversas que existen, lo cual está asociado a su alta variabilidad ecológica, fisiológica y morfológica (Azani et al., 2017). En el presente estudio el uso común de especies de esta familia puede explicarse por las variadas ventajas que ofrece, dentro de las que resaltan la fijación de nitrógeno atmosférico al suelo a través de la simbiosis con bacterias nitrificantes, aporte valorado por la mejora de suelo (Rao et al., 2015); además se caracterizan por presentar un sistema de raíz profundo, que garantiza la eficiencia en la utilización del agua, y la tolerancia a la sequía (Shelton, 2004). En términos de funcionalidad dentro de los sistemas agropecuarios, las leguminosas presentan una alta producción de biomasa y capacidad de rebrote, lo que proporciona una oferta forrajera en épocas de sequía, son tolerantes al manejo y consumo de los animales, además de contribuir con el bienestar animal al suministrar sombra (Shelton, 2004; Kebede et al., 2016).

Los efectos del cambio climático en los trópicos, manifestado en el aumento de la temperatura y las sequías frecuentes, plantea como una alternativa de mitigación y adaptación el incremento de la cobertura arbórea con el fin de absorber carbono, regular el clima y conservar la biodiversidad; en este sentido, las Fabaceas tienen un rol importante para la recuperación de paisajes secos. El estudio de Gei et al. (2018), realizado en más de 40 sitios en el neotrópico, incluyendo

regiones de Suramérica, encontraron en tres décadas de evaluación que las Fabaceas eran dos veces más comunes en los bosques secos que en bosques húmedos, mostrando su tolerancia y preferencia a ecosistemas secos, lo cual soporta la importancia de esta familia en el repoblamiento del Bs-T, así como la importancia de la selección e integración de las especies arbóreas para la restauración eficaz de las tierras tropicales degradadas.

Índice de diversidad de Shannon-Wiener

Este índice de diversidad se ha aplicado extensamente en estudios etnobotánicos, comenzando con la identificación de las especies vegetales dominantes en diversos entornos, considerando tanto su diversidad como su equidad. Se aprovecha la información sobre los individuos de la i -ésima especie. (En este contexto representados por el número de referencias o informantes para cada especie) (Gheno-Heredia et al., 2011).

Para este estudio, el índice de Shannon – Wiener fue de 5,5, según Begossi (1996) este valor indica una notable diversidad en el conocimiento tradicional que las comunidades tienen sobre las plantas; esto sugiere que los pobladores tienen un amplio saber sobre la variedad de especies vegetales, así como sus usos, aplicaciones y las prácticas de manejo asociadas. Este valor indica que la comunidad tiene una historia importante de interacción con su entorno natural, lo cual sugiere una larga trayectoria de observación y uso de la biodiversidad local que los ha llevado a la acumulación de un acervo de conocimientos sobre las plantas propias del

ecosistema, es decir las comunidades valoran y hacen uso de una amplia gama de recursos vegetales para fines diversos, como alimentación, medicina, materiales de construcción y ebanistería, rituales culturales, entre otros.

Diversos estudios han arrojado valores altos, demostrando gran diversidad de conocimiento general de las plantas; en Ecuador, Vásquez (2014) y Jiménez et al. (2019) obtuvieron valores superiores a 3,42; por otro lado, Gheno-Heredia et al. (2011), en México, con poblaciones indígenas registraron valores entre 1,01 y 3,68, estando muy por debajo de los datos obtenidos en este estudio; sin embargo, concluyeron que los valores más bajos hacen referencia a zonas con menor número de referencias por especie, contrario a un valor de índice más alto con un mayor número de especies reportadas. Para el caso del índice menor, no está asociado a la existencia o no de las especies, sino al conocimiento de los informantes acerca de la diversidad y uso de estas. Esto podría estar asociado a preferencias por algunas especies, tal cual como lo afirman Toledo y Barrera-Bassols (2008), por razones culturales más que ecológicas.

Índice de equidad de Pielou

El índice de Pielou fue de 0,66, valor que refleja una distribución medianamente equitativa de las especies en la región, lo cual puede estar asociado al conocimiento diferencial que tienen los informantes sobre las arbóreas usadas en la región, es decir no hay una especie dominante que monopolice los usos, sino que varias especies están presen-

tes en proporciones similares en las diferentes categorías de uso; por consiguiente, la existencia de una amplia diversidad de recursos en el área de estudio conlleva beneficios significativos para las comunidades que dependen de estas plantas para una variedad de propósitos. Por ejemplo, se han identificado 163 especies asociadas con la construcción, 150 especies como fuente de alimento para la fauna, y 143 especies con propiedades medicinales; además, se han reconocido 135 especies que son adecuadas para su uso como postes muertos, entre otros. Estos datos respaldan los resultados obtenidos en el índice de equidad de Pielou, destacando la importancia de la distribución equitativa de especies para sustentar la diversidad y la utilidad de los recursos vegetales en el ecosistema estudiado.

Sin embargo, existen estudios con resultados altos como los evidenciados por Ríos (2016) en México, con 0,73 para el total de las zonas muestreadas, este resultado indica que la diferencia entre la abundancia específica, excluyendo al matorral desértico micrófilo (1), entre las otras coberturas vegetales, no es significativamente distinta; por su parte, en el municipio de Filomeno se obtuvieron valores entre 0,88 y 0,97, lo cual indica una distribución muy equitativa en la importancia relativa de las especies, es un indicativo de una rica diversidad de conocimientos o usos de estas, donde varias especies tienen una relevancia similar para los informantes (López et al., 2019).

La prueba del análisis factorial mostró que la prueba de esfericidad de Bartlett con $p\text{-value} < 1,17153\text{e}^{-38}$ presenta una fuerte-

mente intercorrelación entre las variables. Mientras, la prueba de (KMO) con el valor de 0,71 de idoneidad en la relación de las variables evaluadas (Kaiser y Rice, 1974), así mismo se descartaron once factores “usos” con valores de comunalidad $< 0,5$ que no presentaron contribuciones importantes en la correlación.

Según el criterio de la raíz latente, el análisis de componentes principales (PCA) mostró dos componentes principales superiores (valor propio ≥ 1), que explican el 74,4 % de la variación total de los parámetros estudiados, aportando un grado de solidez a las inferencias > 60 % de la variación de los datos (Thioulouse et al., 2018). Para facilitar la selección de familias en función de los usos estudiados, se creó un biplot, utilizando los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2). El CP1 explicó el 58,8 % de la variación total y estuvo fuertemente influenciada por carbón, alimento humano, forraje y ornamental. Mientras que el CP2 explicó el 15,6 % de la variación total y estuvo significativamente influenciada por el uso sombra, protección agua y protección suelo (Figura 4).

El CP1 separó las familias que asocian un mayor número de usos, de las reportadas con pocos usos; entre las que se destacan Biognoniaceae, Leguminaceae, Malvaceae, Boraginaceae, Moraceae, Polygonaceae, Rubiaceae y Sapindaceae, con siete usos respectivamente, seguido de Anacardiaceae, Apocynaceae, Arecaceae, Burseraceae, Cannabaceae, Capparaceae, Lecythidaceae, Malpighiaceae, Meliaceae, Muntingiaceae, Sapotaceae con seis usos respectivamente. Las familias localizadas en el CP2 recibieron los pesos positivos más altos y se asocian con pocos usos como Chrysobalanaceae, Myrtaceae y Olacaceae con dos usos cada una, seguidas de Annonaceae, Achariaceae, Caryocaraceae, Combretaceae, Rutaceae y Elaeocarpaceae con solo un uso, respectivamente. De acuerdo con el análisis de coseños al cuadrado “cos2”, se aprecia que cuanto mayor es el valor de cos2, mejor se representa esa observación en esa componente, es decir familias con valores superiores a 0,5 presentan mejor ajuste en el modelo (Figura 4). Finalmente, se generaron cuatro grupos de familias, con base en la similitud entre las categorías de usos reportados. Los grupos se pueden distinguir por la diferencia de color.

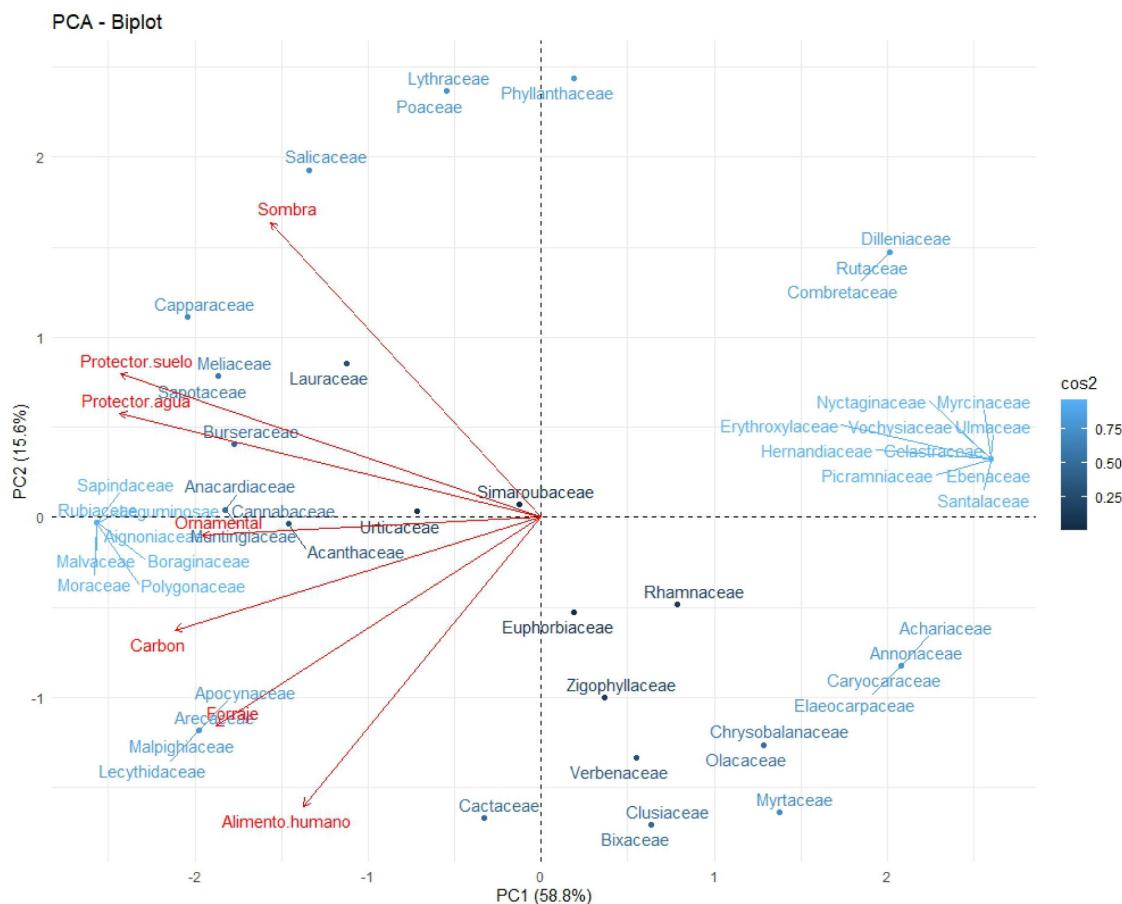


Figura 4. Análisis de componentes principales para las variables uso y familias reportadas para la región Caribe de Colombia.

Fuente: autores.

Con las actuales presiones sobre los relictos de bosque seco tropical en la región Caribe, la etnobotánica es definitivamente una estrategia importante para orientar las estrategias de conservación sostenible de la biodiversidad en el territorio (De Alburquerque, 2009) y potencializar los beneficios de las plantas, contribuir a su adaptación y resiliencia, y servir como fuente de materia prima para las comunidades locales que dependen directamente de los árboles (Worku et al., 2014; Ogwu & Osawaru 2022).

De acuerdo con nuestros resultados, las especies de la familia fabáceas presentan mayor abundancia y usos reportados como ha sido demostrado por otros autores en estudios de caracterización florística en bosques naturales y en el agro-paisaje en la región Caribe, apoyando la “hipótesis de apariencia” en etnobotánica que establece que las especies abundantes en un área ecológica dada son las más utilizadas y, por consiguiente, sometidas a una mayor presión (Guèze et al., 2014). Sin embargo, nuestros hallazgos muestran otro número impor-

tante de familias entre las que se destacan: Malvaceae, Rubiaceae, Anacardiaceae, Boraginaceae, Burseraceae, Lecythidaceae y Moraceae, caracterizadas por un número importante de especies y usos diversos que pueden contribuir a reducir la presión selectiva sobre especies con usos más específicos, como madera para postes para cerca y/o leña altamente demandada en la región, que al mismo tiempo pueden formar parte de programas de restauración y/o rehabilitación de áreas degradadas y conservación de especies amenazadas.

Las estrategias de conservación deben integrar tanto las especies como las prácticas culturales asociadas. Un enfoque holístico puede facilitar el manejo sostenible, asegurando la regeneración de las especies utilizadas y fomentando la educación y concienciación en la comunidad. Así, estos hallazgos no solo enriquecen el entendimiento de la diversidad biológica, sino que también

establecen un camino hacia una conservación efectiva, alineando intereses culturales y ecológicos para el bienestar de las generaciones venideras.

Aunque el uso de métodos etnobotánicos cuantitativo es relativamente reciente para probar diferentes hipótesis sobre la relación entre las especies de plantas y los humanos (Prance 1991; Höft et al., 1999; Ong & Kim 2014), pueden presentar sesgos asociados al conocimiento local sobre el uso de las especies y esto puede llevar a diferencias entre el número de especies citadas y las utilizadas efectivamente (Albuquerque & Hanazaki 2009; Albuquerque et al., 2010). No obstante, en nuestro estudio se validaron previamente varias categorías de uso y especies ampliamente reconocidas en el área de investigación, lo cual permitió minimizar posibles sesgos al momento de aplicar las encuestas con los informantes clave.

4 CONCLUSIONES

Los resultados del estudio revelan una diversidad significativa en los usos de las especies arbóreas, con un total de 18 categorías identificadas. Las aplicaciones más comunes incluyen el uso de la madera para la construcción (163 menciones), seguido por el alimento para fauna (150), el uso medicinal (143) y la utilización de postes muertos (135). También se destacan el uso doméstico y para el hogar (118), leña (111), alimento humano (106) y ebanistería (100). Otras aplicaciones relevantes incluyen la protección del suelo (88), la producción de

carbón (65), el suministro de sombra (79), el uso ornamental (77), forraje (73), y la protección de fuentes de agua (74). Además, se identificaron usos como resinas y látex (53), cercas vivas, simbolismo cultural (34) y artesanías (33). Esta variedad de usos refleja no solo la riqueza del conocimiento local sobre las plantas, sino también la importancia de estas especies en las prácticas culturales y económicas de la comunidad.

En términos generales, las arbóreas informadas presentan características multipropósito, sin embargo, resalta el reconocimiento a

los usos que denotan un aprovechamiento directo, como postes, leña, carbón, construcción, ebanistería, forraje y medicina, lo cual refleja la importancia socioeconómica para las comunidades y demanda estrategias para el manejo racional de las mismas, de tal forma que no se comprometa su existencia.

Se destaca la importancia de *G. americana*, *C. Alba*, *G. ulmifolia* y *E. cyclocarpum* como las más utilizadas en las prácticas tradicionales de las comunidades locales. La alta frecuencia de usos reportados subraya su relevancia cultural y utilitaria, sugiriendo que deben ser prioritarias en la planificación de proyectos que permitan integrar estas especies en iniciativas de restauración y gestión de paisajes agropecuarios, esto no solo conservará el conocimiento ancestral y promoverá la biodiversidad local, sino que también fortalecerá la resiliencia de los sistemas agroecológicos frente a los desafíos ambientales y socioeconómicos actuales.

La familia Fabácea es considerada la más representativa, debido a su amplia diversidad y usos tradicionales, incluyen todas las categorías de uso definidas para este estudio; esta familia es crucial para la restauración ecológica, ya que sus especies fijadoras de nitrógeno mejoran la fertilidad del suelo, controlan la erosión y facilitan la sucesión ecológica. Además, su integración en paisajes agropecuarios mediante sistemas agroforestales y silvopastoriles potencia la sostenibilidad agropecuaria, incrementa la productividad de los suelos y reduce la dependencia de insumos externos, subrayando su valor multifacético en la gestión de ecosistemas y la agricultura sostenible.

El estudio evidencia un conocimiento tradicional profundamente arraigado entre las comunidades locales, acerca del uso de plantas, lo cual pone de manifiesto la necesidad de preservar y registrar este valioso legado cultural. Este conocimiento no solo representa siglos de interacción humana con el entorno natural, sino que también ofrece una fuente inestimable de recursos medicinales, alimenticios y materiales que sustentan la vida y la salud de las comunidades. La conservación de estas prácticas tradicionales fortalece la resiliencia de las comunidades frente a los desafíos ambientales y socioeconómicos contemporáneos, al tiempo que fomenta el respeto por la sabiduría local y su integración en estrategias de desarrollo sostenible. Adicionalmente, el conocimiento puesto en grupos poblacionales como expertos y técnicos facilitaría la interacción con la población rural, orientando al mismo tiempo políticas adecuadas para los propósitos de manejo, restauración y conservación del paisaje.

La amplia variedad de especies vegetales aprovechadas en este estudio resalta la excepcional biodiversidad del bosque seco tropical, enfatizando la importancia de conservar los remanentes de este tipo de ecosistema que se encuentran en la región Caribe colombiana, específicamente en los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, La Guajira, Magdalena y Sucre. La conservación de estas áreas es crucial para asegurar la continua disponibilidad de recursos vegetales, los cuales no solo sustentan usos tradicionales, sino que también son fundamentales para mantener la salud y la resiliencia de los ecosistemas locales y la preservación global

de la biodiversidad y el equilibrio ecológico a largo plazo.

Se recomienda integrar el conocimiento etnobotánico en políticas y prácticas de ma-

nejo ambiental, así como en programas de educación ambiental para fomentar el uso sostenible de recursos vegetales y promover la coexistencia armoniosa entre comunidades humanas y el entorno natural.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: análisis de datos, escritura, borrador original, revisión y edición.

Segundo autor: análisis de datos, escritura, revisión.

Tercer autor: análisis de datos, escritura y revisión.

Cuarto autor: análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Quinto autor: logística, adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, revisión, escritura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, por el desarrollo del proyecto *Sistema de información para monitoreo, evaluación, seguimiento y gestión de plantaciones forestales basado en factores biofísicos, productivos y económico-financieros de plantaciones localizadas en diferentes agroecosistemas de Colombia*. Agradecemos igualmente el apo-

yo del personal técnico y administrativo en el Centro de Investigación Motilón. Finalmente, manifestamos nuestro agradecimiento a todas las personas que dedicaron su tiempo a responder las encuestas durante la fase de recolección de información, personal de instituciones aliadas en la región y a los productores, dueños y administradores de predios que nos atendieron en sus parcelas y nos manifestaron su apoyo al proyecto.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación se desarrolló gracias al apoyo financiero del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, a través de los recursos de la transferencia variable TV 16, destinados al macroproyecto denominado *Estrategias de planificación y*

manejo de plantaciones forestales en agroecosistemas de Colombia, proyecto *Materiales nativos e introducidos de especies arbóreas caracterizados y evaluados para uso múltiple*.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El presente artículo fue elaborado íntegramente por los autores. No se emplearon herramientas de inteligencia artificial para la

generación, redacción, análisis ni interpretación de los contenidos presentados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de interés que pueda haber

influido en los resultados ni en la interpretación de los datos presentados en este artículo.

LITERATURA CITADA

Aguilera, M., Reina, Y., Orozco Gallo, A., Vega, J. Y. y Barcos Robles, R. (2013). Composición de la economía de la región Caribe de Colombia. *Banco de la República-Economía Regional*. <https://www.banrep.gov.co/es/publicaciones/ensayos-economia-regional/composicion-economia-region-caribe-colombia>

Albuquerque, U. P., Lucena, R. F., Monteiro, J. M., Florentino, A. T. & Almeida, C. D. F. C. (2006). Evaluating two quantitative ethnobotanical techniques. *Ethnobotany research and applications*, 4, 051-060. <https://ethnobotanyjournal.org/index.php/era/article/view/101>

Albuquerque, U. P. & Hanazaki, N. (2009). Five problems in current ethnobotanical research—and some suggestions for strengthening them. *Human Ecology*, 37, 653–661. <https://doi.org/10.1007/s10745-009-9259-9>

Albuquerque, U. P., Soldati, G. T., Sieber, S. S., Medeiros, P. M., Caetano de Sa, J. & de Souza, L. C. (2010). Rapid ethnobotani-

cal diagnosis of the Fulni-ô Indigenous lands (NE Brazil): Floristic survey and local conservation priorities for medicinal plants. *Environment, Development and Sustainability*, 13, 277-292. <https://doi.org/10.1007/s10668-010-9261-9>

Aranza, M. A. D. Y. R., Vega, A. O. G. J. Y., & Robles, R. B. (2017). Evolución socioeconómica de la región Caribe colombiana entre 1997 y 2017.

Armenteras, D. y Rodríguez Eraso, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latino América: una revisión desde 1990. *Colombia forestal*, 17(2), 233-246. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>

Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbres, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., Gonzalez-Alonso, F. & Morales-Rivas M. (2011) Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3),

- 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>
- Awan, A., Akhtar, T., Jamil, A. M. y Murtaza, G. (2021). Quantitative ethnobotany of medicinal plants uses in the Jhelum valley, Azad Kashmir, Pakistan. *Acta Ecologica Sinica. Volume 41*(2), 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2020.09.002>
- Azani, N., Babineau, C., Baoley, H., Banks, A., Barbosa, R., Barbosa, J., Boatwright, L. (2017). A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon*, 66(1), 44-77. <https://doi.org/10.12705/661.3>
- Barrance, A., Schreckenberg, K., Gordon, J., de la Cadena, A., & Neira, E. (2009). *Conservación mediante el uso: Lecciones aprendidas en el bosque seco tropical mesoamericano*. Londres: Overseas Development Institute.
- Beetz, A., & Rinehart, L. (2006). Pastures: sustainable management. *Pastures: sustainable management*. sustpast
- Begossi, A. (1996). Use of ecological methods in ethnobotany: diversity indices. *Economic botany*, (50)3, 280-289. <https://www.jstor.org/stable/4255843>
- Berg, C. (2007). New species of Ficus (Moraceae) from South America. *Blumea-Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 52(3), 569-594. Centro de Biodiversidad Naturalis. <https://doi.org/10.3767/000651907X608954>
- Blackie, R., Baldauf, C., Gautier, D., Gumbo, D., Kassa, H., Parthasarathy, N., & Sunderland, T. (2014). Bosques tropicales se- cos. *El estado del conocimiento global y recomendaciones*. Bogor, Indonesia: Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR. https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/39132122/Bosques_tropicales_secos-libre.pdf?1444683131=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBosques_tropicales_secos_El_estado_del_c.pdf&Expires=1759276484&Signature=Wo-2tqovvLB4fHfmo~JC-~aAH2yzp5vS3J-MwLFJncMbPrbK8OMQ7GxI0qbWalTmJEtljQHwO6IuMK7BYQSI8c-TF1iDwOdSDFtlafGXwKMHKUS-k0w-~8J1JtW0RPiVBuUHpHswY2PmdvXu-93Z52AIrdUsdvuyCyJj-6wkIjfnSa9potUFKL0c5Wx3tIpwtI2RVu9xKi656LR-1hOYmNHWDWvQskyrV7hCel6fK-fczQN-Qfx7OjCLzE~tPbPFLa6RM-NZnJe2FR8rmC8GYGAt0xWG7i67C-9tAd6aOXzfgRUNO2s56c6V5s06b~L-rW01ZriKGgVGg99NfbGYAt6Wu7XdV-g__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSL-RBV4ZA
- Boom, B. M. (1989). Use of Plant Resources by the Chácobo. *Advances in Economic Botany*, 7, 78-96. <http://www.jstor.org/stable/43927546>
- Boom, B. M. (1990). Useful Plants of the Panare Indians of the Venezuelan Guayana. *Advances in Economic Botany*, 8, 57-76. <http://www.jstor.org/stable/43927567>
- Byg, A. & Balslev, H. (2001). Diversity and use of palms in Zahamena, eastern Madagascar. *Biodiversity & Conservation*, 10, 951-970. <https://doi.org/10.1023/A:1016640713643>

Lombo Ortiz, D. F., Arias Rojas, J. A., Rive-
ra Rojas, M., Caballero Lopez, A. R., Rúa
Bustamante, C. V., & Hernandez Martíne-
z, C. C. (2022). Growth and initial devel-
opment of native trees in a silvopastoral
arrangement in La Guajira, Colombia.

Carbonó-DelaHoz, E., Barranco-Pérez, W.,
& García, H. (2021). Diversidad beta del
bosque seco tropical en el norte del Ca-
ribe colombiano. *Revista de la Academia
Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas
y Naturales*, 45(174), 95-108. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1267>

Cárdenas López, D. E., Marín-Corba, C.,
Suárez-Suárez, S., Guerrero, C. y Nofuya,
P. (2002). Plantas útiles en dos comuni-
dades del Departamento de Putumayo.
*Instituto Amazónico de Investigaciones
Científicas – Sinchi*.

Castillo, J. C. y Jacome, J. F. (2022). Evalu-
ación preliminar del potencial ecoturísti-
co y estrategia de implementación con
fines de protección y conservación del
bosque seco tropical (bs-t) en el munici-
pio de Melgar- Tolima. <http://hdl.handle.net/11349/30451>

Chaves, M., Ramírez, M., Trejos, H. (2009).
Importancia del guanacaste (*Enterolo-
bium cyclocarpum*) en sistemas agrofo-
restales y en la conservación de la bio-
diversidad en Guanacaste, Costa Rica.
Agroforestería en las Américas, 15(58),
77-84.

Coe, M. A. & Gaoue, O. G. (2020). Most
cultural importance indices do not pre-
dict species' cultural keystone status. *Hu-*

man Ecology, 48(6), 721-732. <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00192-y>

Delprete, P. G. & Cortés-B, R. (2004). A
phylogenetic study of the tribe Sipanee-
ae (Rubiaceae, Ixoroideae), using trnL-F
and ITS sequence data. *Taxon*, 53(2), 347-
356. <https://doi.org/10.2307/4135613>

de Albuquerque, U. P., de Sousa Araújo, T.
A., Ramos, M. A., Do Nascimento, V. T.,
de Lucena, R. F. P., Monteiro, J. M., ... & de
Lima Araújo, E. (2009). How ethnobotany
can aid biodiversity conservation: reflec-
tions on investigations in the semi-arid
region of NE Brazil. *Biodiversity and Con-
servation*, 18(1), 127-150.

Garibaldi, A. & Turner, N. (2004). The Na-
ture of Culture and Keystones. *Ecology
and Society* 9(3): r2. [http://www.ecolog-
yandsociety.org/vol9/iss3/resp2/](http://www.ecolog-
yandsociety.org/vol9/iss3/resp2/)

Gei, M., Rozendaal, D. M., Poorter, L.,
Bongers, F., Sprent, J. I., Garner, M. D., ...
& Powers, J. S. (2018). Legume abundance
along successional and rainfall gradients
in Neotropical forests. *Nature Ecology &
Evolution*, 2(7), 1104-1111. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0559-6>

Gentry, A. H. (1995). Diversity and flo-
ristic composition of neotropical dry
forests. In: Bullock SH, Mooney HA,
Medina E, eds. *Seasonally Dry Trop-
ical Forests*. Cambridge University
Press, 146-194. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753398.007>

Guèze, M., Luz, A. C., Paneque-Gálvez, J.,
Macía, M. J., Orta-Martínez, M., Pino, J.
y Reyes García, V. (2014). Are ecological-

ly important tree species the most useful? A case study from indigenous people in the Bolivian Amazon. *Economic Botany*, 68, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12231-014-9257-8>

Gheno-Heredia, Y., Nava-Bernal, G., Martínez-Campos, A. R. y Sánchez-Vera, E. (2011). Las plantas medicinales de la organización de parteras y médicos indígenas tradicionales de Ixhuatlancillo, Veracruz, México y su significancia cultural. *Polibotánica*, 31, 199-251. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682011000100012&lang=es&tlang=es.

Höft, M., Barik, S. K. & Lykke, A. M. (1999). Quantitative ethnobotany. Applications of multivariate and statistical analyses in ethnobotany. *People and Plants working paper* 6. UNESCO, Paris.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt [IAvH]. (1998). El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia. Programa de Inventario de la Biodiversidad Grupo de Exploraciones y Monitoreo Ambiental GEMA-IAvH. Bogotá, Colombia.

Jiménez-Escobar, N. D. & Estupiñán-González, C. (2011). Useful trees of the Caribbean region of Colombia. *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability*, 5(1), 65-79. https://www.researchgate.net/publication/280569884_Useful_Trees_of_the_Caribbean_Region_of_Colombia

Jiménez González, A., Macías Egas, Á. F., Ramos Rodríguez, M. P., Tapia Zúñiga,

M. V. & Rosete Blandariz, S. (2019). Indicadores de sostenibilidad con énfasis en el estado de conservación del bosque seco tropical. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(2), 197-211. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692019000200197&lang=es&tlang=es

Jiménez-Romero, E. M., Moreno-Vera, A. N., Villacís-Calderón, A. C., Rosado-Sabando, J. K., Morales Moreira, D. M., & Bravo Bravo, A. D. (2019). Estudio etnobotánico y comercialización de plantas medicinales del bosque protector Muro-comba y su área de influencia del cantón Valencia, Ecuador. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 491-506. <https://doi.org/10.21930/rcta.vol20num3art:1597>

Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E. A., Stevens., P. F. y Donoghue, M. J. (2009). Sistemática de plantas: un enfoque filogenético. Artmed Editora.

Kaiser, H. & Rice, J. (1974). Little jiffy mark IV. *Educational and Psychological Measurement*, 34(1), 111-117. <https://doi.org/10.1177/001316447403400115>

Kebede, G., Assefa, G., Feyissa, F. & Mengistu, A. (2016). Forage legumes in crop-livestock mixed farming systems: A review. *International Journal of Livestock Research*, 6(4), 1-18. <http://dx.doi.org/10.5455/ijlr.20160317124049> Klingen, K. E., de Graaff, J., Botelho, M. I. V., & Kessler, A. (2012). Farmers visions on soils: A case study among agroecological and conventional smallholders in Minas Gerais, Brazil. *Journal of Agricultural Education and*

Extension, 18(2), 175-189. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2012.655969>

Lombo, D. F., Burbano, E., Arias, J. A., & Rivera, M. (2023). Carbon storage in tree biomass dispersed in pastures in the arid Caribbean region of Colombia. *Forest Systems*, 32(1), e002-e002. <https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/view/18932>

López, A., López, M., Cunill, J. y Medina, S. (2019). Valor socioeconómico de las plantas para una comunidad indígena totonaca. *Interciencia*, 44(2), 94-100. <https://www.redalyc.org/journal/339/33958304008/html/>

López, R., Sarmiento, C., Espitia, L., Barrero, A. M., Consuegra, C. y Gallego, B. (2016). 100 plantas del Caribe colombiano. Usar para conservar: aprendiendo de los habitantes del bosque seco. Fondo Patrimonio Natural.

Maffi, L. (2005). Linguistic, cultural, and biological diversity. *Annu. Rev. Anthropol.*, 34(1), 599-617. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.34.081804.120437>

Magurran, A. E. (1988). Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press.

Marín-Corba, C., Cárdenas-López, D., Suárez-Suárez, S. (2005). Utilidad del valor de uso en etnobotánica. Estudio en el departamento de Putumayo (Colombia). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas. *Caldasia*, 27(1), 89-101. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-52322005000100004

Martin, G. (1995). Etnobotánica: manual de métodos. Fondo Mundial para la Naturaleza.

Medeiros, M. F. T., Silva, O. S. y Albuquerque, U. P. (2011). Cuantificación en la investigación etnobotánica: una visión general de los índices utilizados desde 1995 hasta 2009. *Sitientibus série Ciências Biológicas*, 11(2), 211-230.

Ogwu, M. C. & Osawaru, M. E. (2022). Traditional Methods of Plant Conservation for Sustainable Utilization and Development. In: Chibueze Izah, S. (eds) Biodiversity in Africa: Potentials, Threats and Conservation. *Sustainable Development and Biodiversity*, 29. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3326-4_17

Ong H. G. & Kim Y. D. 2014. Quantitative ethnobotanical study of the medicinal plants used by the Ati Negrito indigenous group in Guimaras island, Philippines. *Journal of Ethnopharmacology*, 157, 228-242. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.09.015>

Pardo, M. y Gómez, E. (2003). Etnobotánica: aprovechamiento tradicional de plantas y patrimonio cultural. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 60(1), 171-182.

Pedersen, H. B. y Balslev, H. (1993). Palmas útiles: especies ecuatorianas para agroforestería y extractivismo. Editorial Abya Yala.

Phillips, O. L. (1996). Some quantitative methods for analyzing ethnobotanical knowledge. *Advances in economic botany*, 10, 171-197. <https://www.jstor.org/stable/43927619>

- Phillips, O. & Gentry, A. H. (1993). The Useful Plants of Tambopata, Peru: II. Additional Hypothesis Testing in Quantitative Ethnobotany. *Economic Botany*, 47(1), 33-43. <http://www.jstor.org/stable/4255480>
- Pielou, E. C. (1975). Ecological diversity. *Jhon Wiley&Sons*, 168. Ecological diversity : Pielou, E. C., 1924-2016 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive
- Pizano, C. & García, H. (Editores) 2014. El bosque seco tropical en Colombia. *Insti-
tuto de Investigación de Recursos Biológico-
cos Alexander von Humboldt*, Bogotá (Colombia) Ministerio de Ambiente y De-
sarrollo Sostenible, Bogotá (Colombia). El bosque seco tropical en Colombia
- Polania, K. A. (2019). Biomasa aérea en esta-
dos sucesionales del bosque seco tropical en el norte del Tolima, Colombia. <http://hdl.handle.net/11349/15488>
- Prance, G. T. (1991). What is ethnobotany today? *Journal of Ethnopharmacology*, 32(1-3), 209-216. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(91\)90120-3](https://doi.org/10.1016/0378-8741(91)90120-3)
- R Core Team. (2023). R a Language and En-
vironment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing Vi-
enna. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Iglesias, E., Cuenca, K., & Quizhpe, W. (2020). Manejo integrado de agroeco-
sistemas en América Latina: Una opción para maximizar la producción resguar-
dando la biodiversidad. *Tekhné*, 23(1). <https://doi.org/10.62876/tekhn.v23i1.4472>
- Albuquerque, U. P., Ramos, M. A., Júnior, W. S. F., & de Medeiros, P. M. (2017). Approaches and interests of ethnobo-
tanical research. In *Ethnobotany for Be-
ginners* (pp. 17-26). Cham: Springer In-
ternational Publishing.
- Rao, I., Peters, M., Castro, A., Schultze-
Kraft, R., White, D. Fisher, M... Rudel, T. (2015). LivestockPlus. The sustainable in-
tensification of forage based agricultural
systems to improve livelihoods and eco-
system services in the tropics. *Tropical
Grasslands. Forrajes Tropicales*, 3(2), 59-
82. [https://doi.org/10.17138/tgft\(3\)59-82](https://doi.org/10.17138/tgft(3)59-82)
- Reis, E. (2001). *Estatística Multivariada
Aplicada*, 2. Silabo.
- Ríos, A. (2016). Etnobotánica de los recursos
vegetales, sus formas de uso y manejo, en
Bustamante, Nuevo León, México. Tesis
para optar a título de Doctor en: Ciencias
con acentuación en manejo y adminis-
tración de recursos vegetales. Universi-
dad Autónoma de Leon. [http://eprints.
uanl.mx/id/eprint/17783](http://eprints.
uanl.mx/id/eprint/17783)
- Rodríguez, G. M., Banda-R., K., Reyes S. P.
y Estupiñán González, A. C. (2012). Lis-
ta comentada de las plantas vasculares de
bosques secos prioritarios para la con-
servación en los departamentos de Atlán-
tico y Bolívar (Caribe colombiano. *Biota
Colombiana*, 13(2). [https://revistas.hum-
boldt.org.co/index.php/biota/article/
view/261](https://revistas.hum-
boldt.org.co/index.php/biota/article/
view/261)
- Rojas, J., A., Ortiz, D., Lopez, A., Rojas, M.,
Erazo, E. (2021). Caracterización y diver-
sidad de árboles dispersos en pasturas de
un paisaje de bosque seco tropical en el
Caribe Colombiano. *Livestock Research
for Rural Development*, 33(7), 1-12.

Caracterizacion-y-diversidad-de-arboles-dispersos-en-pasturas-de-un-paisaje-de-bosque-seco-tropical-en-el-Caribe-Colombiano.pdf

Rosero-Toro, J. H., Romero-Duque, L. P., Santos-Fita, D. y Ruan-Soto, F. (2018). Cultural significance of the flora of a tropical dry forest in the Doche vereda (Villa-vieja, Huila, Colombia). *Journal of Ethnobiology Ethnomedicine* 14, 22. <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0220-0>

Salas-Navarro, K. P. (2013). Modelo de la cadena de abastecimiento del sector madera y muebles de la Región Caribe de Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 7(14), 38-49. <https://doi.org/10.31908/19098367.605>

Sánchez-Merlos, D., Harvey, C. A., Grimalva, A., Medina, A., Vílchez, S. y Hernández, B. (2005). Diversidad, composición y estructura de la vegetación en un agropaisaje ganadero en Matiguás, Nicaragua. *Revista de Biología Tropical*, 53(3-4), 387-414. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442005000200009&lng=en&tlang=es

Sanmartín-Sierra, D. R., Angarita-Hernández, D. F. & Mercado-Gómez, J. D. (2016). Estructura y composición florística del bosque seco tropical de Sangaré-Sucre (Colombia). *Ciencia en desarrollo*, 7(2), 43-56. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-74882016000200004&lng=en&tlang=es

Shannon, C. E. y Wiener, W. (1963). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.

Shelton, H. (2004). Perspectives on forage tree legumes. *Grassland: Development, opportunities, prospective* (87-118). FAO and Science Pub ent, opportunities, prospective Roma: FAO and Science Pub.

Siyum, Z. G. (2020). Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives. *Ecological Processes*, 9(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00229-6>

Thioulouse, J., Dray, S., Dufour, A. B., Sibberchicot, A., Jombart, T. & Pavoine, S. (2018). Multivariate analysis of ecological data with ade4. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8850-1>

Toledo, V. M. y Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural. La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Editorial Icaria.

Torres, J. A., Castellanos, A. M., Luna, G., Nava, L. G., Quintanilla, A. R., Rosales, R., ... & Vargas, J. (2006). Los sistemas agrosilvopastoriles con ovinos en el centro de Veracruz, México. In *Experiencia de Docencia-Investigación. IV Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible, Matanzas, Cuba* (p. 72).

Universidad Nacional de Colombia [UNAL]. (2023). Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia. <https://ipt.biodiversidad>.

co/sib/resource?r=catalogo_plantas_liquenes

Vásquez, P. (2014). Importancia cultural de la flora mantenida en los jardines de las viviendas de las Parroquias Urbanas del Cantón Loja [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

Worku, A., Pretzsch, J., Kassa, H. & Auch, E. (2014). The significance of dry forest income for livelihood resilience: The case of the pastoralists and agro-pastoralists in the drylands of southeastern Ethiopia. *Forest Policy and Economics*, 41, 51-59., <https://doi.org/10.1016/j.forepol.2014.01.001>

Zenderland, J., Hart, R., Bussmann, R.W. (2019). The Use of “Use Value”: Quantifying Importance in Ethnobotany. *Econ Bot* 73, 293-303. <https://doi.org/10.1007/s12231-019-09480-1>

Zuluaga Zuluaga, L. y Castro Escobar, E. S. (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO₂ en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Luna Azul*, 47, 1-20. <https://doi.org/10.17151/lua.2018.47.1>

 **Conflictos de intereses**
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.



Fecha de recibido: 13-08-2024

Fecha de aceptado: 05-12-2024

DOI: 10.22490/21456453.8412

ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO: IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL

Citación: Zuluaga, L., Caballero, A., Arias, J., Lombo, D. y Rivera, M. (2026). Etnobotánica cuantitativa en agropaisajes del Caribe Colombiano: Implicaciones para la conservación del bosque seco tropical - Anexos. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.8412>

ANEXOS

Anexo 1. Listado de especies y usos.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS
Rubiaceae	<i>Genipa americana L.</i>	Jagua, palo de jagua, caruto, huito, majagua, encerao, zapatillo, pijiño	CO, LE, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD. 17
Boraginaceae	<i>Cordia alba (Jacq.) Roem. y Schult. Ó Cordia dentata Poiret</i>	Cansaviejo, uvita macho, uvito, jobito	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL UD. 16
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia Lam.</i>	Guacimo, mielquemada	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME AR, RL, UD 15
Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb.</i>	Carita, carito, orejero	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL. 15
Anacardiaceae	<i>Spondias mombin L.</i>	Jobo, hobo, ciruelo, ciruela criolla	CO, LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD 14
Malvaceae	<i>Ceiba pentandra (L.) Gaertn.</i>	Bonga, ceiba bonga, ceiba bruja	CO, CA, EB, AH, AF, SO, PA, PS, ME, OR, AR, RL, SC, UD. 14

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS
Bignoniaceae	<i>Crescentia cujete L.</i>	Totumo	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, AR, RL, SC, UD. 14
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i>	Jaboncillo, pepo, siminuñe	CO, SA, L, PM, L, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, OR, RL. 13
Fabaceae	<i>Hymenaea courbaril L.</i>	Algarrobo	CO, LE, PM, AH, FO, SO, PA, PS, ME, AR, RL, SC, UD. 13
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolens Jacq.</i>	Gusanero, quebracho, santacruz	CO, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL, SC, UD. 13
Malvaceae	<i>Stterculia apetala (Jacq.) H.Karst.</i>	Camajoru, camajorudo, camajon, piñon	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, PA, PS, ME, OR, UD. 13
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro, cedro cebollo, cedro rojo	CO, LE, CA, PM, EB, AF, SO, CV, PA, PS, ME, RL, UD. 13
Fabaceae	<i>Prosopis juliflora (Sw.) DC.</i>	Trupillo, cují, trupí	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL. 13
Boraginaceae	<i>Cordia collococca</i>	Muñeco, arato, caujaro	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, ME, UD. 12
Rubiaceae	<i>Calycophyllum candidissimum (Vahl) DC.</i>	Guayabo, guayabo macho, guayabo colorado	CO, LE, CA, PM, AH, FO, SO, PA, PS, ME, OR, UD. 12
Fabaceae	<i>Gliricidia sepium (Jacq.) Walp.</i>	Matarraton, madre del cacao	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, CV, PA, PS, ME, UD. 12
Fabaceae	<i>Cassia grandis L.f.</i>	Cañaefistula, cañandonga, acacia rosada, jamanare	CO, LE, PM, EB, AH, FO, SO, PA, ME, OR, RL, UD. 12
Fabaceae	<i>Inga densiflora</i>	Guamo mico	LE, CA, PM, AH, AF, SO, PA, PS, ME, AR, RL, UD. 12
Lecythidaceae	<i>Lecythis minor Jacq.</i>	Cocuelo, olla de mono	CO, CA, PM, AH, FO, AF, PA, PS, ME, AR, SC, UD. 12
Fabaceae	<i>Albizia saman (Jacq.) Merr.</i>	Campano, algarrobillo	CO, LE, CA, PM, EB, FO, AF, SO, PA, PS, OR, UD. 12

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i>	Guaimaro, palanco	CO, LE, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, OR, RL.	12
Muntingiaceae	<i>Muntingia calabura L.</i>	Guayuyo, vara de paloma, niquito, chitato, nigua, PeriquitoCrys	LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, RL, UD.	12
Cannabaceae	<i>Trema micrantha (L.) Blume</i>	Surrumbo, zurrumbo, majaguillo	CO, LE, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME.	11
Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i>	Aceituno	CO, LE, EB, AH, FO, AF, SO, PS, ME, SC, UD.	11
Fabaceae	<i>Acacia glomerosa</i>	Chicho, baranó	LE, CA, EB, AH, FO, AF, SO, PS, ME, RL, UD.	11
Fabaceae	<i>Acacia macracantha Willd.</i>	Aromo	CO, CA, PM, AH, FO, AF, SO, PA, PS, ME, UD.	11
Moraceae	<i>Maclura tinctoria (L.) D. Don e1 Steud. Ó Chlorophora tinctoria (L.) Gaudich. e1 Benth</i>	Mora, dinde, amarillo	CO, LE, CA, PM, EB, AF, SO, PS, ME, OR, UD.	11
Arecaceae	<i>Sabal mauritiiformis (H. Karst.) Griseb. y H. Wendl.</i>	Palma amarga, amarga, chingale, anchambe, en-chamba	CO, PM, AH, FO, AF, PS, ME, OR, AR, SC, UD.	11
Polygonaceae	<i>Triplaris americana L.</i>	Varasanta, volador blanco	CO, LE, CA, PM, EB, AF, CV, PA, PS, ME, UD.	11
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum cainito</i>	Caimito, maduraverde	CO, PM, EB, AH, AF, SO, PA, PS, ME, RL, UD.	11
Fabaceae	<i>Vachellia farnesiana (L.) Willd.</i>	Aromo (arbolito, arbusto)	CO, LE, CA, PM, FO, SO, PA, PS, ME, RL, UD.	11
Euphorbiaceae	<i>Hura crepitans L.</i>	Ceiba blanca, ceiba de leche, tronador	LE, PM, EB, AF, ME, AR, RL, SC, UD	10
Fabaceae	<i>Dialium guianense Willd y Steud.</i>	Chicharron	CO, LE, CA, EB, AH, FO, SO, CV, ME, UD.	10

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS
Meliaceae	<i>Carapa guianensis Aubl.</i>	Mazabalo, andiroba, Tangaré, Ébano brasileño, Carapa, Cedro güino	CO, LE, CA, EB, AF, SO, PA, ME, OR, RL. 10
Lythraceae	<i>Lafoensia punicifolia DC.</i>	Pelincú, guayacan, granadillo	CO, PM, EB, AF, SO, CV, PA, PS, OR, RL 10
Anacardiaceae	<i>Anacardium excelsum Skeels.</i>	Caracoli, espavé, mijao	CO, LE, EB, AH, AF, PA, PS, ME, RL, DO. 10
Fabaceae	<i>Pseudalbizzia niopoides</i> (<i>Abeto ex Benth.</i>) EJM Koenen & Duno	Guacamayo, bayeto, bayo	CO, LE, CA, PM, EB, FO, AF, SO, PS, UD. 10
Fabaceae	<i>Myroxylon balsamum (L.) Harms</i>	Balsamo, balsamo de olor	CO, CA, PM, SO, PA, PS, ME, AR, RL, UD 10
Fabaceae	<i>Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth.</i>	Tirico, chiraco, gallinero, payandé	LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, SO, RL, US. 10
Fabaceae	<i>Pseudosamanea guachapele</i> (<i>Kunth</i>) Harms	Iguá, naumo, tabaca, igua amarillo	CO, LE, PM, EB, FO, SO, PA, PS, OR, RL. 10
Boraginaceae	<i>Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken</i>	Canalete, canalete blanco, canalete prieto, moho, nogal cafetero.	CO, LE, CA, PM, EB, AF, SO, ME, OR, UD. 10
Sapotaceae	<i>Manilkara zapota (L.) P. Royen</i>	Nispero, chicle	CO, LE, PM, AH, AF, SO, PA, PS, ME, RL. 10
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) DC.</i>	Roble, roble rosado	CO, LE, CA, PM, EB, SO, PA, PS, ME, OR. 10
Acanthaceae	<i>Bravaisia integerrima</i> (<i>Spreng.</i>) Standl.	Palo de agua, zancoaraño	CO, CA, PM, FO, PA, PS, ME, OR, UD. 9
Cactaceae	<i>Leuenbergeria guamacho</i> (<i>FAC Weber</i>) Lodé	Guamacho, mokochira	CO, CA, AH, FO, AF, PA, ME, RL, UD. 9
Lauraceae	<i>Nectandra cuspidata</i> Nees & Mart.	Laurel, laurel amarillo	CO, LE, CA, PM, EB, AH, AF, ME, AR. 9
Fabaceae	<i>Erythrina fusca Lour.</i>	Cantagallo	LE, AH, FO, AF, SO, CV, PA, ME, OR. 9

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Haemato Xylum brasiletto</i>	Brasil	CO, LE, PM, FO, AF, ME, RL, SC, UD.	9
Fabaceae	<i>Platymiscium pinnatum</i> (Jacq.) Dugand	Trebol, corazon fino, korrizon	CO, LE, CA, PM, FO, SO, PA, SC, UD.	9
Malvaceae	<i>Pachira aquatica</i> Aubl.	Cacao de monte	CO, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS.	9
Moraceae	<i>Ficus tonduzii</i> Standl.	Higueron, caucho, higuerón grande, higuerón pequeño, higueroncillo, lechero, matapalo	CO, PM, EB, AH, FO, AF, SO, PA, PS.	9
Capparaceae	<i>Morisonia odoratissima</i> (Jacq.) Christenh. & Byng	Olivo hembra	CO, CA, AF, SO, CV, PA, ME, OR, SC.	9
Salicaceae	<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	Ondequera, dondequera, elemento,	CO, LE, CA, AF, CV, PA, PS, ME, OR.	9
Arecaceae	<i>Attalea butyracea</i> (Mutis ex Lf) Wess.Boer	Palma de vino, corua	CO, AH, FO, AF, PA, PS, AR, SC, UD.	9
Anacardiaceae	<i>Spondias purpurea</i> L.	Ciruela	CA, EB, AH, FO, AF, ME, RL, SC, UD.	9
Anacardiaceae	<i>Spondias radlkoferi</i> Donn. Sm.	Hobo macho	CO, LE, CA, PM, EB, AH, FO, AF, ME.	9
Fabaceae	<i>Centrolobium paraense</i> Tul.	Colorado, amarillo, baluastre	CO, CA, PM, EB, SO, PS, AR, UD.	8
Olaceae	<i>Ximenia americana</i> L.	Huevo de morrocoyo, caimito de monte, ciruelo, espino de brujo, limoncillo de playa, limoncillo, limoncito, limoracho	LE, CA, PM, EB, AH, AF, AR, RL.	8
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Indio en cueros, resbalamono.	CO, LE, FO, AF, CV, ME, RL, UD.	8
Capparaceae	<i>Morisonia indica</i> (L.) ined.	Carne de venado, caimitillo, olivo macho	CO, LE, PM, EB, AF, PS, ME, OR.	8

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Senna atomaria (L.) HS Irwin & Barneby</i>	Cuchillito, palo zorrillo, frijolillo	LE, CA, PM, FO, PS, ME, OR, SC.	8
Fabaceae	<i>Pterocarpus acapulcensis Rose</i>	Sangregao, paca vieja, sangre mono	CO, LE, CA, EB, AF, PS, ME, OR.	8
Fabaceae	<i>Cassia leiandra Benth.</i>	Coralito, cañafistol llanero, carao amarillo, coralillo	LE, PM, EB, AF, SO, PS, ME, OR.	8
Arecaceae	<i>Bactris guineensis (L.) H.E. Moore</i>	Corozo de lata, lata, corozo, uvita de lata	LE, PM, EB, AF, SO, PS, ME, OR.	8
Boraginaceae	<i>Cordia gerascanthus L.</i>	Canalete, canalete de humo, solera, vara de humo, moho, nogal, moncoro	CO, PM, EB, SO, CV, ME, OR, UD.	8
Fabaceae	<i>Pithecellobium lanceolatum (Humb. y Bonpl. ex Willd.) Benth.</i>	Carne fresca, tiribuchi, pintamono, buche, espino	CO, LE, CA, PM, AF, PA, RL, UD.	8
Fabaceae	<i>Zygia inaequalis (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Pittier</i>	Guamo arroyero, carbonero, guamo macho	LE, CA, PM, AF, SO, PS, ME, UD.	8
Capparaceae	<i>Crateva palmeri Rose</i>	Naranjuelo, toco blanco, naranjito	CO, CA, FO, AF, PA, PS, ME, UD.	8
Fabaceae	<i>Libidibia coriaria (Jacq.) Schltdl.</i>	Dividivi, chicharron, dividivi negro	CO, CA, PM, FO, AF, ME, RL, UD.	8
Polygonaceae	<i>Coccoloba caracasana Meisn.</i>	Uvera uvita, palo bolero, martin moreno, uvita roja	LE, PM, AH, FO, AF, SO, PA, OR.	8
Fabaceae	<i>Pterocarpus officinalis Jacq.</i>	Sangregao blanco, corcho, juana mestiza	CO, LE, CA, PM, FO, SO, PA, ME.	8
Bignoniaceae	<i>Handroanthus billbergii (Bureau & K. Schum.) SO Grose</i>	Polvillo, coralibe, lumbre	CO, CA, PM, EB, FO, OR, SC, UD.	8
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale L.</i>	Marañon criollo, cajuil	PM, EB, AH, AF, ME, AR, UD.	7
Bixaceae	<i>Cochlospermum vitifolium (Willd.) Spreng.</i>	Papayote, papayuelo, ma-jaguillo	LE, FO, AF, ME, 1, SC, UD.	7

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Lauraceae	<i>Nectandra hihua (Ruiz & Pav.) Rohwer</i>	Laurel	CO, LE CA, PM, SO, PA, PS.	7
Lauraceae	<i>Nectandra membranacea</i>	Aguacatillo aguacate, ira, quizarrá	CO, EB, AF, CV, PA, PS, ME.	7
Lauraceae	<i>Nectandra mollis (Kunth) Nees</i>	Laurel	CO, LE CA, PM, SO, PA, PS.	7
Fabaceae	<i>Lecythis tuyrana Pittier</i>	Olleto	CO, LE, CA, AH, PS, OR, UD.	7
Fabaceae	<i>Ormosia colombiana Rudd.</i>	Chocho, peronilo	CO, LE, PM, SO, CV, PS, AR.	7
Fabaceae	<i>Swartzia simplex (Sw.) Spreng.</i>	Arará, corocito	CO, PM, AH, AF, PS, OR, UD.	7
Malvaceae	<i>Pseudobombax septenatum (Jacq.) Dugand</i>	Majagua, majagua colora	EB, AF, PA, ME, OR, AR, UD.	7
Sapindaceae	<i>Allophylus triphyllus Merr.</i>	Crispeta	LE, CA, PM, EB, AF, PS, ME.	7
Sapindaceae	<i>Melicoccus bijugatus Jacq.</i>	Mamon, mamoncillo, mamon criollo	CO, CA, AH, FO, AF, ME, OR.	7
Sapotaceae	<i>Pouteria durlandii (Standl.) Baehni</i>	Nispero, nispero de monte, caimitillo, sapotillo	CO, CA, AH, AF, SO, PS, UD.	7
Malvaceae	<i>Apeiba glabra Aubl.</i>	Peine mono, corcho, erizo	CO, LE, EB, PS, ME, OR, UD.	7
Malvaceae	<i>Luehea candida (Moc. & Sé ex DC.) Mart.</i>	Algodoncillo	CO, LE PM, EB, PA, PS, UD.	7
Polygonaceae	<i>Ruprechtia ramiflora (Jacq.) CAMey.</i>	Volador, cargamuchacho	CO, LE CA, EB, FO, AF, PS.	7
Salicaceae	<i>Casearia corymbosa Kunth</i>	Vare piedra, vara de piedra de humo, palo blanco, ondequera	CO, LE, PM, AF, CV, OR, UD.	7
Apocynaceae	<i>Plumeria rubra L.</i>	Azuceno rojo, florón, flor de mayo, frangipan	LE, CA, AH, ME, OR, RL, UD.	7

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Inga vera subsp. vera Humb. & Bonpl. ex Willd.</i>	Guamo, guamo arroyero	CO, LE, PM, AH, AF, SO, PS.	7
Malvaceae	<i>Bombax ceiba L.</i>	Ceiba roja	CO, LE, EB, SO, CV, ME, AR.	7
Malvaceae	<i>Luehea seemannii Triana & Planch.</i>	Guacimo malagano, malagano, guacimo colorado	CO, LE, PM, SO, PA, PS, UD.	7
Urticaceae	<i>Cecropia pachystachya Trécul</i>	Guarumo, yarumo	CO, LE, CA, FO, DV, ME, UD.	7
Arecaceae	<i>Elaeis oleifera (Kunth) Cortés</i>	Palma aceitera, nolí, corozo de manteca, coroza, anoli	AH, FO, AF, PS, ME, SC, UD.	7
Lecythidaceae	<i>Gustavia superba (Kunth) O.Berg</i>	Membrillo, pacó, mortecino	AH, AF, CV, ME, OR, SC, UD.	7
Apocynaceae	<i>Aspidosperma megalocarpon subsp. curranii (Standl.) Marc.-Ferr.</i>	Carreto	CO, LE, CA, PM, EB, ME, UD.	7
Fabaceae	<i>Inga nobilis Willd.</i>	Guamo churimo	CO, LE, PM, EB, AH, OR, UD.	7
Malvaceae	<i>Guazuma tomentosa Kunth</i>	Guacima	PM, EB, AH, FO, CV, ME, UD.	7
Bignoniaceae	<i>Tecoma stans (L.) Juss. ex Kunth</i>	Guacharaco, tapacontodo, chirlobirlo, fresno	CO, LE, PM, EB, ME, OR, UD.	7
Sapindaceae	<i>Melicoccus oliviformis Kunth</i>	Mamón cutuplí, mamón de mico, mamón de maria, cotoprí	CA, PM, AH, AF, SO, OR, UD.	7
Zigophyllaceae	<i>Guaiacum officinale L.</i>	Guayacan negro, guayaco, guayacan eltranjero	CO, EB, CV, ME, OR, RL, UD.	7
Arecaceae	<i>Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex R. Keith</i>	tamaca, corozo	LE, CA, AH, FO, AF, ME, UD.	7
Apocynaceae	<i>Aspidosperma polyneuron Müll.Arg.</i>	Carreto, quimula	CO, CA, EB, FO, AF, ME, SC.	7
Bignoniaceae	<i>Handroanthus ochraceus var. aguaraguensis M.A.Zapater & Califano</i>	Polvillo	CO, PM, EB, AF, CV, ME, OR.	7

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Pterocarpus rohrii Vahl</i>	Guamo arroyero	CO, PM, EB, CV, PS ME, OR.	7
Poaceae	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	Guadua,	CO, PM, SO, PA, PS, OR, AR.	7
Myrtaceae	<i>Eugenia acapulcensis Steud.</i>	Café macho, escobillo, cotoptri	CO, PM, AH, FO, AF, ME, UD.	7
Boraginaceae	<i>Cordia panamensis L. Riley</i>	Muñeco blanco, candelerro, cunula, cuzú, guacimo peludo, nogal, quesero	CO, LE, PM, EB, AH, AF,	6
Boraginaceae	<i>Cordia subcordata Lam.</i>	Nomeolvides, san joaquin	EB, AH, AF, ME, OR, UD.	6
Burseraceae	<i>Protium sp.</i>	Canime	CO, EB, AH, SO, PA, PS.	6
Capparaceae	<i>Morisonia frondosa (Jacq.) Christenh. & Byng</i>	Malenterrado, carne de venado	LE, EB, FO, AF, ME, UD.	6
Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla King.</i>	Caoba	CO, PM, EB, SO, PA, PS.	6
Myrtaceae	<i>Psidium guajava L.</i>	Guayaba dulce, guayabo macho	LE, PM, AH, FO, AF, ,ME.	6
Polygonaceae	<i>Coccoloba acuminata Kunth</i>	Maiz tostao, maizcocho	LE, PM, AH, AF, SO, OR.	6
Sapotaceae	<i>Manilkara bidentata (A.DC.) A.Chev.</i>	Nispero silvestre, Nispero, mispero, balata	SO, PM, EB, AH, AF, RL.	6
Sapotaceae	<i>Pouteria sapota (Jacq.) HEMoore & Stearn</i>	Mamey	CO, EB, AH, ME, OR, UD.	6
Verbenaceae	<i>Vitex compressa Turcz.</i>	Aceituno	CO, PM, AH, AF, ME ,UD.	6
Verbenaceae	<i>Vitex flavens Kunth</i>	Aceituno	EB, AH, AF, OR, AR, UD.	6
Zigophyllaceae	<i>Plectrocarpa arborea (Jacq.) Christenh. & Byng</i>	Yogui	CO, LE, CA, PM, FO, UD.	6

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana grandiflora</i> Jacq.	Cojon de fraile, hueva de berraco, borrachero Turma perro, Gueva Perro	CO, AH, ME, OR, RL, SC.	6
Fabaceae	<i>Erythrina velutina</i> Willd.	Arepito, arepo	LE, PM, EB, SO, PS, ME.	6
Malpighiaceae	<i>Malpighia glabra</i> L.	Cereza de monte, cereza, huesito, acerola	CA, AH, FO, AF, PA, ME.	6
Meliaceae	<i>Trichilia acuminata</i> C.DC.	Negrito, mangle blanco, negro viejo	LE, PM, EB, AH, AF, UD.	6
Bignoniaceae	<i>acaranda caucana</i> Pittier	Chingale, gualanday, caco, flormorado, caballito, caro, cornique, guayacán, palo de boba, piñón de oreja.	CO, PM, EB, PS, ME, OR.	6
Burseraceae	<i>Bursera graveolens</i> (Kunth) Triana y Planch. O	Caraña, palo santo, caspín, tatamaco, trementina bijo	EB, PA, ME, OR, RL, SC.	6
Fabaceae	<i>Parasenegalnia visco</i> (Lorentz ex Griseb.) Seigler & Ebinger	Chicho, guacamayo, chicható	CO, CA, PM, PS, ME, OR.	6
Fabaceae	<i>Poeppigia procera</i> (Poepp. ex Spreng.) C.Presl	Flor amarilla, guaje	CO, PM, EB, ME, RL, UD.	6
Arecaceae	<i>Crocus chrysanthus</i> subespecie <i>chrysanthus</i>	Coco	AH, CV, PS, ME, OR, UD.	6
Lecythidaceae	<i>Cariniana pyriformis</i> Miers	Abarco, albarco,	CO, PM, EB, AH, AR, UD.	6
Fabaceae	<i>Coulteria mollis</i> Kunth	Yaguaro, piula	CO, PM, FO, AF, ME, UD.	6
Clusiaceae	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Caucho, arbol de Santa maria	CO, LE, EB, FO, AR, RL.	6
Fabaceae	<i>Albizia</i> sp.	Baranoa	CO, LE, CA, PM, EB, UD.	6
Fabaceae	<i>Calliandra magdalena</i> (Bertero ex DC.) Benth.	Carbonero, rayado	CA, AF, SO, PA, ME, OR.	6

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Moraceae	<i>Ficus nymphaeifolia</i> mill.	Higueron , cope	LE, EB, AF, PA, PS, ME.	6
Sapindaceae	<i>Dilodendron costaricense</i> (Radlk.) AHGentry y Steyermark.	Mamon de maria, loro, iguano	CO, AH, AF, PA, ME, OR.	6
Fabaceae	<i>Prioria copaifera</i> Griseb.	Cativo	CO, EB, AF, ME, RL, UD.	6
Malvaceae	<i>Pachira quinata</i> W.S. Alverson	Ceiba colora, ceiba roja, tolua	CO, CA, EB, AF, PA, UD.	6
Fabaceae	<i>Senna atomaria</i> (L.) H.S. Irwin y Barneby	Chivato, caranganito	CP, LE, PM, FO, AF, ME.	6
Bignoniaceae	<i>Handroanthus ochraceus</i> subsp. <i>neochrysanthus</i> (AHGentry)	Nn Polvillo	CO, PM, EB, AF, CV, OR.	6
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysanthus</i> (Jacq.) S.O.Grose ó <i>Tabebuia chrysanthus</i>	Guayacan ,polvillo, cañahuate, cañaguate, guayacan brasilero	CO, PM, EB, SO, ME, OR.	6
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysanthus</i> subespecie <i>chrysanthus</i>	Polvillo	CO, PM, EB, AF, CV, OR.	6
Bignoniaceae	<i>Roseodendron chryseum</i> (S.F.Blake) Miranda o <i>Tabebuia chrysea</i> S.F. Blake	Alumbre, cañaguate, puy, roble blanco	CO, PM, EB, SO, ME, UD.	6
Chrysobalanaeae	<i>Moquilea magnifructa</i> Sothers & Prance	Carbonero de orilla, carbonero	CO, LE, CA, PM, AF, UD.	6
Anacardiaceae	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	Jobo macho, fresno, pepesama	CO, PM, EB, AR, RL.	5
Combretaceae	<i>Terminalia oblonga</i> (Ruiz y Pav.) Steud.	Vara de leon	CO, LE, PM, EB, SO.	5
Dilleniaceae	<i>Curatella americana</i> L.	Curata, parica, peralejo macho, carne fiambre,	LE, PM, SO, CV, ME.	5
Euphorbiaceae	<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	Ñipiñipi, piñiqui piñiqui,	CO, CA, ME, SC, UD.	5

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Lauraceae	<i>Ocotea aurantiodora</i> (Ruiz & Pav.) Mez	Laurel	CO, PM, SO, PA, PS.	5
Malvaceae	<i>Cavanillesia platanifolia</i> (Bonpl.) Kunth	Macondo, volandero	EB, AF, PS, ME, UD.	5
Meliaceae	<i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	Zambocedro, cedro macho, cedrillo, mestizo, cananeo, bilibil	CO, AF, PA, PS, OR.	5
Polygonaceae	<i>Coccoloba uvifera</i> L.	Papaturro, uvo de playa, uva de playa, murta	CA, EB, AH, AF, RL.	5
Chrysobalanaceae	<i>Chrysobalanus icaco</i> L.	Icaco, hicaco (arbolito)	LE, PM, AH, AF, ME.	5
Fabaceae	<i>Lonchocarpus velutinus</i> Benth.	Bollo limpio	CO, CA, PM, EB, UD.	5
Apocynaceae	<i>Plumeria alba</i> L	Floron, azuceno	LE, CA, ME, OR, RL.	5
Fabaceae	<i>Brownea grandiceps</i> Jacq.	Florisanto, palocruz, ariazal	PM, SO, ME, OR, UD.	5
Fabaceae	<i>Guilandina bonduc</i> L.	Granadillo	CO, LE, CA, PM, EB.	5
Fabaceae	<i>Erythrina berteroana</i> Urb.	Pionío	PM, AH, FO, CV, ME.	5
Fabaceae	<i>Inga spectabilis</i> (Vahl) Willd.	Guamo	LE, AH, AF, SO, PS.	5
Myrtaceae	<i>Psidium guineense</i> Sud.	Guayaba cimarron	EB, AH, FO, AF, ME.	5
Rhamnaceae	<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam.	Manzanita, guinda guinda, manzanita costeña	AH, FO, AF, SO, CV.	5
Arecaceae	<i>Bactris major</i> Jacq.	Lata arroyera, corozo de lata	CO, PM, AH, AF, UD.	5
Apocynaceae	<i>Aspidosperma desmanthum</i> Benth. ex Müll.Arg.	caney	CO, EB, PA, PS, ME.	5

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Clusiaceae	<i>Garcinia benthamiana</i> (<i>Planch. & Triana</i>) Pipoly	Madroño, mamey	AH, AF, ME, OR, RL.	5
Polygonaceae	<i>Coccoloba coronata</i> Jacq.	Vare piedra, Juan garrote	CA, PM, AH, AF, UD.	5
Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i> Willd.	Sauce lloron	LE, PM, SO, PA, PS.	5
Fabaceae	<i>Enterolobium shomburgkii</i>	Orejero, hediondo	CO, EB, FO, AF, PS.	5
Fabaceae	<i>Inga edulis</i> Mart.	Guamo mico	LE, AH, FO, AF, SO.	5
Annonaceae	<i>Xylopia frutescens</i> Sieber ex C. Presl sinónimo de <i>Annona squamosa</i> L.	Malaqueto macho, friso-lillo	LE, PM, CV, ME, UD.	5
Boraginaceae	<i>Cordón bicolor</i> A.DC.	Muñeco, paico	CO, PM, AH, AF, PS.	5
Fabaceae	<i>Diphysa carthagenensis</i> Jacq.	Chicharrón, carate	CO, LE, CA, PM, ME.	5
Fabaceae	<i>Vachellia tortuosa</i> (L.) Seigler & Ebinger	Cacho de cabra	LE, CA, AH, FO, UD.	5
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana amygdalifolia</i> Jacq.	Cojon de fraile, cojon de gato, frailecillo, huevo de perro, jazmín de monte, lirio macho, cruceta	AH, ME, OR, RL, SC.	5
Burseraceae	<i>Dacryodes colombiana</i> Cuatrec.	Caraño, cariaño	SO, EB, AF, ME, RL.	5
Fabaceae	<i>Machaerium biovulatum</i> Michelii	Siete cueros	CO, PM, PA, PS, UD.	5
Sapotaceae	<i>Pradosia colombiana</i> (Standl.) TDPenn. ex TJAyers y Boufford	Mano de tigre, mamon de leche, mamon de puerco	CO, LE, PM, AH, AF.	5

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Achariaceae	<i>Mayna grandiflora</i> (H. Karst.) Warb. Ó <i>Dendrostylis grandifolia</i> H. Karst. Sinónimo de <i>Carpotroche grandiflora</i> Spruce ex Eichler	Puercoespin, manzana de venado	CO, LE, AH, AF.	4
Caryocaraceae	<i>Caryocar amygdaliferum</i> Mutis	Almendrillo, cagui, genené, maní, chalmagra, jenene	CO, PM, AH, AF.	4
Fabaceae	<i>Platypodium elegans</i> Vogel.	Lomo de caiman, cajón, carbonero, combito, matarratón eltranjero, canoito	CO, OR, RL, UD.	4
Verbenaceae	<i>Vitex cymosa</i> Bertero ex Spreng.	Aceituno	CA, EB, AF, SC.	4
Vochysiaceae	<i>Vochysia lehmannii</i> Hieron.	Centello, salado, saladillo	CO, PM, EB, CV.	4
Capparaceae	<i>Capparidastrum frondosum</i> (Jacq.) 1. Cornejo & H.H.Iltis ó <i>Capparis frondosa</i> Jacq. sinónimo de <i>Morisonia frondosa</i> (Jacq.) Christenh. & Byng	Alcaparro, sincogollo	PM, EB, AF, ME.	4
Malvaceae	<i>Apeiba tibourbou</i> Aubl.	Algodoncillo	CO, FO, AF, SO.	4
Hernandiaceae	<i>Gyrocarpus americanus</i> Jacq.	Banco	PM, ME, SC, UD.	4
Fabaceae	<i>Caesalpinia ebano</i> H.Karst. Sinónimo de <i>Libidibia punctata</i> (Willd.) Britton	Ebano	CO, FO, ME, OR.	4
Fabaceae	<i>Machaerium arboreum</i> ((Jacq.) Vogel	Latigo, purgación, rejo, corazon fino	CO, CA, SO, OR.	4
Malvaceae	<i>Matisia cordata</i> Bonpl.	Chupa chupa	CO, EB, AH, AF.	4
Fabaceae	<i>Acacia riparia</i> Bertero ex Spreng. Sinónimo de <i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Aromo, mulato	SO, PS, ME, OR.	4

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Machaerium capote Triana ex Dugand</i>	Siete cueros, baro blanco	CO, LE, CA, PM	4
Phyllanthaceae	<i>Phyllanthus elsiae</i>	Pimenton, pimentillo, garbancito, manzanillo	SO, PA, PS, ME.	4
Fabaceae	<i>Piptadenia viridiflora (Kunth) Benth. Sinonimo de Lachesiodendron viridiflorum (Kunth) PGRibeiro, LPQuerroz & Luckow</i>	Baranoa, chicharron, chicho, bocachico	CO, CA, PM, UD.	4
Bignoniaceae	<i>Handroanthus serratifolius (Vahl) SOGrosa</i>	Guayacan	CO, AF, ME, OR.	4
Picramniaceae	<i>Picramnia latifolia Tul.</i>	Quina simple , quina	CO, LE, ME, UD.	4
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana robinsonii (Woodson) AOSimões & MEEndress</i>	Cabo de hacha, cojon de fraile, hueva de toro, cabalonga	ME, OR, RL, SC.	4
Boraginaceae	<i>Cordia lucidula I.M.Johnst.</i>	Arato	CO, PM, AF, UD.	4
Fabaceae	<i>Platymiscium hebestachyum Benth.</i>	Bao, baho	CO, PM, CV, PS.	4
Salicaceae	<i>Mayna grandifolia (H.Karst. & Triana) Warb.</i>	Puerco espin, manzana de venado	CO, PM, EB, AF.	4
Boraginaceae	<i>Cordia cymosa (Donn.Sm.) Standl.</i>	Pacocillo, muñeco, laurel negro	CO, PM, AH.	3
Combretaceae	<i>Terminalia amazonia (JFGmel.) Exell</i>	Vara de Leon	CO, LE, PM.	3
Santalaceae	<i>Acanthosyris glabrata Stauffer</i>	Yaya de sangre	PM, AF, UD.	3
Annonaceae	<i>Annona purpurea Moc. & Sessé ex Dunal</i>	Guanábana matimbá, guanacona, gallina gorda, cabezona.	AH, AF, ME.	3
Annonaceae	<i>Annona rufinervis (Triana y Planch.) H. Rainer</i>	Guanábana de monte	AH, AF, ME.	3

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Annonaceae	<i>Annona squamosa</i> Vell. <i>Sinonimo de Annona mucosa</i> <i>Jacq.</i>	Anón	AH, ME, UD.	3
Capparaceae	<i>Morisonia americana</i> L	Níspero de monte, toco	FO, ME, SC.	3
Euphorbiaceae	<i>Acalypha macrostachya</i> <i>Jacq sinonimo de Acalypha</i> <i>macrostachya</i> <i>Jacq.</i>	Rascadera, vara de alcalde, rompe peinilla, zanca de mula, doña Juana, vara de Juana	FO, PA, ME.	3
Fabaceae	<i>Lonchocarpus punctatus</i> <i>Kunth</i>	Bálsamo amargo	AH, ME, UD.	3
Malpighiaceae	<i>Byrsonima crassifolia</i> Lunan <i>ex Griseb.</i> Sinónimo de <i>Byrsonima cinerea</i> DC.	Peralejo, noro, chaparro	AF, PS, OR.	3
Rubiaceae	<i>Alibertia edulis</i> (Rich.) A.Rich. ex-DC.	Trompito, madroño, zumbo, canilla de venado, tabasco, yaya de cajon, rabiacana	AH, AF, AR.	3
Burseraceae	<i>Bursera tomentosa</i> (Jacq.) Triana & Planch.	Bijo, tatamaco, balsamo de incienso, caraño	ME, AR, RL.	3
Chrysobalanaceae	<i>Licania arborea</i> Seem.	Garcero	CO, PM, AF.	3
Meliaceae	<i>Trichilia hirta</i> L.	Jobo macho, jobo verde, hobo verde	CO, PM, AF.	3
urticaceae	<i>Cecropia angustifolia</i> Trécul	Guarumo	AF, PA, PS.	3
urticaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	Guarumo	AF, PA, PS.	3
Arecaceae	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth	Macana, manaca, chinamato	CO, AH, UD.	3
Arecaceae	<i>Coccothrinax argentata</i> (Jacq.) LHBailey	Palmicha	CO, OR, UD.	3

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Bixaceae	<i>Bixa orellana L.</i>	Bijo, achiote, acotillo	AH, ME, OR.	3
Fabaceae	<i>Caesalpinia punctata Willd.</i>	Granadillo, quebracho, quebrahacha	CO, SO, OR.	3
Fabaceae	<i>Cloroleucon mangense (Jacq.) Britton & Rose</i>	Vivaseca, chicharron	LE, CA, PM.	3
Moraceae	<i>Sorocea sprucei (Baill.) JFMacbr.</i>	Pimpinillo , pempinillo, Guáimaro, Lechero, Mamón de leche, Pimpinillo	PM, AF, UD.	3
Polygonaceae	<i>Coccoloba obtusifolia Jacq.</i>	Corralero, tacaloa	LE, CA, AF.	3
Arecaceae	<i>Astrocaryum malybo H.Karst.</i>	Estera, chingalé, enhambá	AR, SC, UD.	3
Fabaceae	<i>Peltogyne purpurea Pittier</i>	Tananeo, nazareno	CO, PM, EB.	3
Fabaceae	<i>Piptadenia psilostachya (DC.) Benth. Sinónimo Marlimorimia psilostachya (DC.) LPQueiroz & Marc.F.Simon</i>	Rabo de iguana, caviche blanco, palo pelusa, arenillo	CO, PM, EB.	3
Chrysobalanaceae	<i>Licania apetala (E. Mey.) Fritsch. Sinónimo de Leptobalanus apetalus (E.Mey.) Sothers & Prance</i>	Cagui, mezcla	CO, EB, AR.	3
Elaeocarpaceae	<i>Sloanea sp.</i>	Cajon	CO, LE, AR.	3
Lecythidaceae	<i>Eschweilera caudiculata R.Knuth</i>	Guasco colorado, tete	LE, AH, AF.	3
Fabaceae	<i>Uribia tamarindoides Du-gand & Romero</i>	Tamarindo, tamarindo de mico, algarrobillo	CO, AH, AF.	3
Moraceae	<i>Helicostylis scabra (JFMacbr.) CCBerg</i>	Chmigua, ojo de culebra, mirikiu	AH. ME, RL.	3

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Arecaceae	<i>Copernicia tectorum (Kunth) Mart.</i>	Palmiche, palma zará	CO, UD.	2
Bignoniaceae	<i>Amphitecna latifolia (Mill.) A.H.Gentry</i>	Totumo silvestre	AR, SC.	2
Celastraceae	<i>Maytenus longipes Briq. Sinónimo de Maytenus sieberiana Krug & Urb.</i>	Corocito, malenterrado prieto	LE, AF.	2
Ebenaceae	<i>Diospyros inconstans Jacq.</i>	Juan de Dios	CO, AF.	2
Phyllanthaceae	<i>Margaritaria nobilis L.f.</i>	Azulejo	PM, UD.	2
Salicaceae	<i>Casearia aculeata Jacq.</i>	Azulito, vara blanca	EB, ME.	2
Sapindaceae	<i>Matayba scrobiculata Radlk.</i>	Guacharaco, laso, Matillo, Laso prieto	AF, UD.	2
Annonaceae	<i>Annona glabra Forssk. Sinónimo de Annona squamosa L.</i>	Anon de agua, anon de puerco, anon de pantano, Guanábana de pantano	AH, ME.	2
Annonaceae	<i>Fusaea longifolia (Aubl.) Saff.</i>	Anón	AH, AF.	2
Cannabaceae	<i>Celtis iguanaea (Jacq.) Sarg.</i>	Manzanito, tabardillo.	AH, AF.	2
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum novogranatense (D.Morris) Hieron.</i>	Coca	ME, SC.	2
Euphorbiaceae	<i>Acalypha diversifolia Rusby sinónimo de Acalypha diversifolia Jacq.</i>	Sangretoro, palito feo, prende prende	LE, AF.	2
Fabaceae	<i>Piscidia carthagenensis Jacq.</i>	Arepito, matapez, barbasco,	CO, UD.	2
Fabaceae	<i>Senna occidentalis (L.) Link</i>	Chivato, bicho, brusca	LE, ME.	2

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Meliaceae	<i>Trichilia appendiculata</i> (Triana y Planch.) C. DC.	Mangle blanco, hobito, yaya	PM, SO.	2
Rubiaceae	<i>Faramea occidentalis</i> (L.) A. Rich.	Malibu, comida de danta, huesito, jazmin, marfilito amarillo, palo de cucharo, piedrito	EB, ME.	2
Chrysobalanaceae	<i>Parinari pachyphylla</i> Rusby	Pereguetano, perehueto, clavellino negro, merecure, siervito	CO, AH.	2
Fabaceae	<i>Acacia collinsii</i> Saff. Sinónimo de <i>Vachellia collinsii</i> (Saff.) Seigler & Ebinger	Cachito	AF, ME.	2
Fabaceae	<i>Inga hayesii</i> Benth.	Guamito, guamita	AH, AF.	2
Fabaceae	<i>Lonchocarpus sanctae-marthae</i> Pittier. Sinónimo de <i>Muellera sanctae-marthae</i> (Pittier) MJSilva & AMGAzevedo	Mucurutú, mucuruto, mucurrutu, macurutú, jepí	EB, UD.	2
Rutaceae	<i>Zanthoxylum microcarpum</i> Griseb. Sinonimo de <i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	Tachuelo	SO, ME.	2
Rutaceae	<i>Zanthoxylum setulosum</i> P. Wilson	Tachuelo, agujon amarillo, barbasco, arbacu,	PM, UD.	2
Rutaceae	<i>Zanthoxylum fagara</i> Sarg.	Colina, correosa, uña de gato, tachuelo	CO, EB.	2
Arecaceae	<i>Acoelorraphe wrightii</i> (Griseb. & H.Wendl.) H.Wendl. ex Becc.	Paja silvestre	CO, OR.	2
Arecaceae	<i>Bactris brongniartii</i> Mart.	Caña negra, chacarra, palma cubarro	AR, UD.	2
Arecaceae	<i>Ceroxylon vogelianum</i> (Engel H.Wendl.)	Gallinazo, palma negra	OR, SC.	2

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Fabaceae	<i>Pithecellobium subglobosum</i> Pittier	Corioto, azabache	PA, PS.	2
Fabaceae	<i>Pseudopiptadenia pittieri</i> (Harms) GP Lewis. Sinonimo de <i>Marlimorimia pittieri</i> (Harms) LP Queiroz & LM-Borges	Chicharrón	CO, CA.	2
Salicaceae	<i>Homalium racemosum</i> Jacq.	Vara de piedra, angelino, caramacate, chamizo, iguano	CO, ME.	2
Fabaceae	<i>Senna reticulata</i> (Willd.) HS Irwin & Barneby	Bajagua, majaguito	AF, ME.	2
Malpighiaceae	<i>Malpighia emarginata</i> DC.	Cerezo, cerezo montano	AH, AF.	2
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum euryphyllum</i> T.D. Penn.	Cainito	AH, AF.	2
Fabaceae	<i>Pseudopiptadenia</i> sp.	Baranoa	CO, CA.	2
Boraginaceae	<i>Burreria exsucca</i> Jacq.	Uvito macho, flor blanca, guatacaro	LE, OR.	2
Elaeocarpa-ceae	<i>Sloanea grandiflora</i> Sm.	Achiotillo, erizo	AH, ME.	2
Fabaceae	<i>Lonchocarpus pictus</i> Pittier. Sinonimo de <i>Deguelia picta</i> (Pittier) RAC Camargo & AM-G Azevedo	Majagua de gallina	CO, AF.	2
Fabaceae	<i>Machaerium goudotii</i>	Chicho	PM, UD.	2
Meliaceae	<i>Trichilia trifolia</i> L.	Palo fierro, conejo colo-rado	LE, PM.	2
Salicaceae	<i>Lunania parviflora</i> Abeto ex Benth.	Yumbé, hormigo	PA, PS.	2

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Euphorbiaceae	<i>Croton malambo H.Karst.</i>	Malambo	ME.	1
Lauraceae	<i>Cinnamomum triplinerve</i> (Ruiz & Pav.) Kosterm. <i>Sinonimo de Aiouea montana</i> (Sw.) R.Rohde	Laurel, amarillo laurel, aguacatillo	CO.	1
Fabaceae	<i>Senna fruticosa</i> (Mill.) HSIrwin & Barneby	Cigarron	LE.	1
Moraceae	<i>Ficus dendrocidia</i> Kunth	Matapalo, caucho, suan, abraza palo	AF.	1
Rubiaceae	<i>Chomelia spinosa</i> Jacq.	Cacaito, chocolatillo	ME.	1
Sapindaceae	<i>Talisia oliviformis</i> Radlk. <i>Sinonimo de Melicoccus olivi-formis</i> Kunth	Mamon de mico, mamon de maria	AF.	1
Fabaceae	<i>Senna bacillaris</i> (Lf) HSIrwin y Barneby	Cigarron	LE.	1
Salicaceae	<i>Xylosma intermedia</i> (Parece.) Triana & Planch.	Carita de santo	AF.	1
Sapindaceae	<i>Cupania latifolia</i> Kunth	Guacharaco	EB.	1
Burseraceae	<i>Bursera glabra</i> (Jacq.) Triana & Planch	Resbalamono	RL.	1
Malvaceae	<i>Pseudobombax máximo</i> A. Robyns	Ceiba bonga, bonga	UD.	1
Rutaceae	<i>Zanthoxylum caribaeum</i> Lam.	Mapurito	SO.	1
Ulmaceae	<i>Ampelocera macphersonii</i> Todzia	Vara blanca	LE.	1

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
urticaceae	<i>Pourouma cecropiifolia</i> Mart.	Uva de monte, Uva cai-marona, caimaron, uva de árbol, uvilla, cucura, ca-muirro, mapati, tanaribe, puruma y purrum	AF.	1
urticaceae	<i>Urera caracasana</i> (Jacq.) Gaudich. ex Griseb.	Pringamosa arborea	ME.	1
Arecaceae	<i>Cryosophila kalbreyeri</i> (Dammer ex Burret) Dahlgren	Palmicha , Barbasco de Ramos, palma de escoba	AR.	1
Ulmaceae	<i>Phyllostylon rhamnoides</i> (J.Poiss.) Taub.	Corra, varo blanco	CO.	1
Fabaceae	<i>Pithecellobium unguis-cati</i>	Coralito	FO.	1
Moraceae	<i>Brosimum guianense</i> Huber ex Ducke	Fruta de pava	AF.	1
Polygonaceae	<i>Coccoloba lehmannii</i> de Lindau	Guaraguao, papaturro	OR.	1
Polygonaceae	<i>Coccoloba obovata</i> Kunth	Juan garrote, bagre, buche gallina	AH. ME, RL.	1
Polygonaceae	<i>Coccoloba</i> sp.	Mangle, mangle blanco	LE.	1
Malvaceae	<i>Ochroma piramidal</i> (Cav. ex Lam.)	Balsa, lana, balso	UD.	1
Moraceae	<i>Ficus insipida</i> Willd.	Higuerón	CO.	1
Moraceae	<i>Ficus pallida</i> Vahl	Cope, Pividjay	AF.	1
Moraceae	<i>Ficus trigonata</i> L.	Caucho, laurel	UD.	1
Moraceae	<i>Ficus ypsilonphlebia</i> Dugand	Cope, abrazapalo	ME.	1

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Annonaceae	<i>Xylopia aromática Baill.</i> <i>Sinonimo Xylopia nitida Dunal</i>	Fruto de burro, sembe, malagueto hembra, azota-caballo	ME.	1
Fabaceae	<i>Enterolobium sp.</i>	Chicho	AF.	1
Rubiaceae	<i>Pittoniotis trichantha Griseb.</i>	Marerito, marerito blanco	AH.	1
Bignoniaceae	<i>Handroanthus coralibe (Standl.) S.O.Grose</i>	Coralibe	CA.	1
Lecythidaceae	<i>Gustavia grandibracteata croata y samori</i>	Huevoemorroco	ME.	1
Rubiaceae	<i>Randia armata (Sw.) DC.</i>	Cruceto, mariangola, cruceña negra, pilon, tachuelo, mariangola de espina	AF.	1
Rubiaceae	<i>Randia dioica H.Karst.</i>	Cruceto, mariangola	FO.	1
Rubiaceae	<i>Randia formosa (Jacq.) K.Schum. Sinónimo de Rosenbergiodendron formosum (Jacq.) Fagerl.</i>	Maria angola	AF.	1
Annonaceae	<i>Oxandra panamensis R.E.Fr.</i>	Anon	AH.	1
Capparaceae	<i>Capparis pulcherrima Jacq.</i> <i>Sinonimo de Morisonia pulcherrima (Jacq.) Christenh. & Byng</i>	Tutumazo	PS.	1
Fabaceae	<i>Platymiscium pinnatum var. pinnatum</i>	Campanero	FO.	1
Meliaceae	<i>Trichilia martiana C.DC.</i>	Vara de piedra, cedrillo	AF.	1
Myrcinaceae	<i>Stylogyne turbacensis (Kunth) Mez</i>	Patica de paloma	AF.	1

**ETNOBOTÁNICA CUANTITATIVA EN AGROPAISAJES DEL CARIBE COLOMBIANO:
IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE SECO TROPICAL**
Zuluaga, Z., Caballero, L., Arias, R., Lombo, O., Rivera, R.

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USOS ⁽¹⁾ / NÚMERO DE USOS	
Nyctaginaceae	<i>Neea nigricans</i> Fawc. y Rendle	Buche sapo, esponjoso, sapo	AF.	1
Rubiaceae	<i>Randia gaumeri</i> Greenm. & CHHomps.	Kachuit	FO.	1
Rubiaceae	<i>Rondeletia purdiei</i> Hook. F	Arroz con coco, bola de titi	AF.	1
Salicaceae	<i>Casearia praecox</i> Griseb.	Sapo	ME.	1
Fabaceae	<i>Myrospermum frutescens</i> Jacq.	Mano de pilon, bálsamo	LE.	1
Fabaceae	<i>Geoffroea spinosa</i> (Molina) De Moussay. Sinónimo de <i>Geoffroea decorticans</i> (Gillies ex Hook. & Arn.) Burkart	Silbadero, puy	LE.	1
Bixaceae	<i>Cochlospermum orinocense</i> (Kunth) Steud.	Bototo, flechero, poro-poro	LE.	1

⁽¹⁾ **Construcción.** (CO), leña (LE), carbón (CA), postes muertos (PM), ebanistería (EB), alimento humano (AH), forraje (FO), alimento para la fauna (AF), sombrío (SO), cerca viva (CV), protector de agua (PA), protector de suelo (PS), medicinal (ME), ornamental (OR), artesanía (AR), resina o látex (RL), símbolo cultural (SC), uso doméstico en el hogar (UD).

Fuente: Autores.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 01-12-2024
Fecha de aceptado: 30-05-2025
DOI: 10.22490/21456453.8955

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

CARBON CAPTURE IN SOILS UNDER THREE PLANT COVERS IN THE BOYACÁ PÁRAMOS COMPLEXS

Jorge Augusto Vásquez González ¹

Germán Eduardo Cely Reyes ²

Pablo Antonio Serrano Cely ³

Citación: Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A. (2026). Captura de carbono en suelos, bajo tres coberturas vegetales en complejos de páramos de Boyacá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 183-219. <https://doi.org/10.22490/21456453.8955>

¹ Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. jorgeavasquezg@gmail.com

² Doctor en Agrociencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. german.cely@uptc.edu.co

³ Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Tunja-Colombia. pablo.serrano@uptc.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Los páramos son ecosistemas con una gran variedad ambiental y una serie de aspectos ecológicos importantes, para el desarrollo de capacidades aprovechables en función de los seres vivos, que están inmersos en los mismos, y que con las acciones antrópicas alteran las condiciones de sustentabilidad de los procesos sinérgicos naturales, los cuales son esenciales para la formación del páramo que genera gran cantidad de agua y logra la captura de carbono atmosférico, que disminuye el cambio climático.

Vacío de conocimiento: La diversidad de páramos en el país representa una oportunidad para avanzar en el estudio de la variabilidad en cuanto a la captura de carbono orgánico, respecto al uso de los suelos y coberturas vegetales, que son ecosistemas fundamentales para la supervivencia de la población, que resulta ser la misma causante de actividades que alteran las condiciones de los procesos de captura de carbono, cuyo estudio es esencial para ampliar el saber de las causas y efectos hacia el medio natural.

Propósito: Evaluar y determinar la variabilidad en cuanto a la captura de carbono orgánico respecto al uso de los suelos y coberturas vegetales presentes en tres sistemas de páramos: Iguaque Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, ubicados en Boyacá, evaluando los cambios temporales de carbono orgánico, mediante la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación y definición de la densidad aparente.

Metodología: Se establecieron parcelas de muestreo en tres zonas específicas (intervenida, en recuperación y no intervenida) dentro de las 500 hectáreas piloto designadas para este estudio. Se llevó a cabo un tipo de muestreos de suelo a dos niveles de profundidad (0-15 y 15-30 centímetros), para un posterior análisis de la cantidad de carbono orgánico en el laboratorio, aplicando un método de Walkley Black.

Resultados y conclusiones: Se obtuvieron resultados que indican que, de los tres complejos de páramos, el de Guantiva-La Rusia obtuvo los valores de carbono orgánico más altos, así: Recuperación (87,95, ton $ha^{-1}C$), Intervenida (95,03 ton $ha^{-1}C$) y No intervenida (144,93 ton $ha^{-1}C$). Para la parcela intervenida, el páramo de Iguaque, a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, tuvo el valor más alto, de 79,7 (ton $ha^{-1}C$). En cuanto a los páramos en recuperación, el de La Rusia obtuvo el promedio más alto de CO, con un valor de 87,2 ton $ha^{-1}C$ a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm. En cuanto a los contenidos de COS para los páramos no intervenidos, se determinó que el complejo con el nivel más bajo de almacenamiento es el de Iguaque-Merchán con datos de 25,18 ton. $ha^{-1}C$ para la profundidad 0-15 cm y 40,36 ton. $ha^{-1}C$ para la de 15-30. Esto evidenció los efectos nocivos producidos por las actividades antrópicas en un suelo de una biodiversidad de alta montaña, los cuales se identifican por ser sumideros importantes de carbono y agentes, que impiden la liberación de gas que producen efecto invernadero hacia la atmósfera.

Palabras clave: análisis de suelo, carbono orgánico del suelo, cobertura de suelos, pá-

ramos, recuperación de suelos, suelo de alta montaña.

ABSTRACT

Contextualization: The moors are ecosystems with a great environmental variety and a series of important ecological aspects for the development of exploitable capacities based on the living beings that are immersed in them, and that with anthropic actions alter the conditions of sustainability of the natural synergistic processes; which are essential for the formation of the moor that generates a large amount of water and achieves the capture of atmospheric carbon, which decreases climate change.

Knowledge gap: The diversity of moors in the country represents an opportunity to advance in the study of variability in terms of the capture of organic carbon with respect to the use of soils and plant covers, which are fundamental ecosystems for the survival of the population, which happens to be the same cause of activities that alter the conditions of the carbon capture processes, whose study is essential to expand the knowledge of the causes and effects on the natural environment.

Purpose: To evaluate and determine the variability in organic carbon capture in relation to the use of soils and vegetation cover present in three páramo systems: Iguaque Merchán, Guantiva la Rusia and Cocuy, located in Boyacá; evaluating temporal changes in organic carbon by obtaining soil samples to quantify and define bulk density.

Methodology: Sampling plots were established in three specific areas (intervened,

in recovery and non-intervened) within the 500 pilot hectares designated for this study. A type of soil sampling was carried out at two depth levels (0-15 and 15-30 centimeters) for a later analysis of the amount of organic carbon in the laboratory, applying a Walkley Black method.

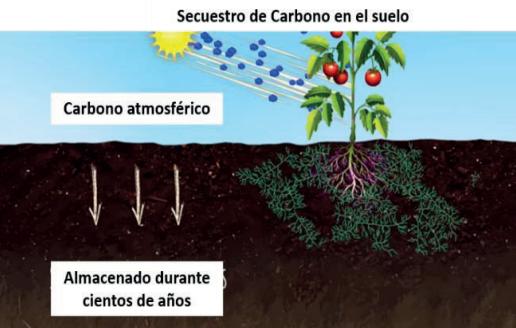
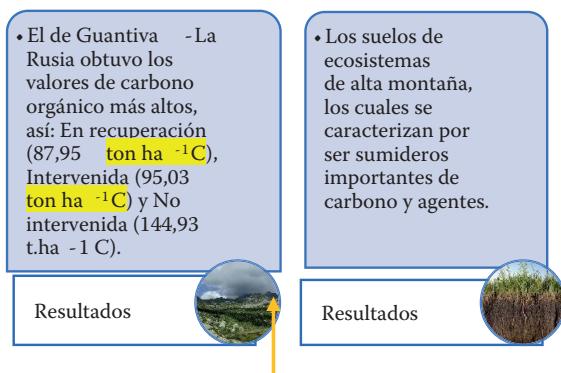
Results and conclusions: The results obtained indicate that, of the three páramos complexes, Guantiva and La Rusia obtained the highest organic carbon values, as follows: Recovery (87.95 ton ha⁻¹C), Intervened (95.03 ton ha⁻¹C), and Non-intervened (144.93 ton ha⁻¹C). For the intervened plot, the Iguaque páramos at a depth of 15 to 30 cm had the highest value of 79.7 (ton ha⁻¹C). Regarding the páramos in recovery, La Rusia obtained the highest average CO with a value of 87.2 ton ha⁻¹C at a depth of 15 to 30 cm. Regarding SOC content for undisturbed páramos, the Iguaque-Merchán complex was found to have the lowest storage level, with data of 25.18 ton.ha⁻¹C for the 0-15 cm depth and 40.36 ton.ha⁻¹C for the 15-30 cm depth. This demonstrates the harmful effects produced by human activities on a high-mountain soil with a biodiversity, which are identified as important carbon sinks and agents that prevent the release of greenhouse gases into the atmosphere.

Keywords: Soil analysis, soil organic carbon, soil cover, moorlands, soil restoration, high mountain soil.

RESUMEN GRÁFICO



Complejos de páramo de:
Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy



<https://quimcasa.blog/2021/06/08/como-se-almacena-el-carbono-en-el-suelo/>

Metodología



Toma de Muestras



1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de páramos “son ecosistemas naturales primordiales en el ciclo hídrico y la captura de carbono en el suelo, por el tipo de vegetación y los suelos de las zonas de alta-montaña, están relacionadas con una importante provisión de servicios ecosistémicos” (Eze et al., 2018a; 2018b; Pérez y Rodríguez, 2019); pero “se conoce que las actividades agrícolas y pecuarias han llevado a cambios progresivos en los parámetros físicos, químicos y agotamiento del carbono orgánico (CO) y nitrógeno del suelo, contribuyendo a la pérdida de calidad edáfica e incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)” (Gómez-Balanta y Ramírez-Nader, 2022), lo cual afecta el medio ambiente.

El cambio climático tiene efectos negativos en los procesos ecológicos, económicos y sociales que interactúan en la tierra (Ruiz et al, 2019). El cambio climático es inducido, principalmente, por gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO_2), los cuales provocan el incremento de la concentración en la atmósfera. En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, estos se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles (Cuervo, 2019).

En el contexto del secuestro de carbono, el derecho al futuro se relaciona con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el cambio climático y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras. El secuestro de carbono se refiere a la captura y almacenamiento de CO_2 de la atmósfera, con el fin de reducir las emisiones y mitigar los efectos del cambio climático (Pinilla y Pareja, 2023).

El CO_2 es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) impulsores del cambio climático, sus emisiones hacia la atmósfera son tanto de origen natural como antrópico). En este sentido, el cambio de uso del suelo y la silvicultura representaron el 6,3 % (46,9 millones de toneladas de CO_2) de las emisiones totales (Luna et al., 2023). La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que también es afectada fuertemente por el manejo del suelo. Existen prácticas de manejo que generan un detrimento del COS en el tiempo, a la vez que hay prácticas que favorecen la acumulación (Flóres y Calderón, 2021).

No se cuenta con información detallada sobre los almacenes de carbono por tipo de ecosistema y uso del suelo ni de los flujos netos de carbono derivados de los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional (Aburto, 2022). Las transformaciones en el uso del suelo resultan propulsoras del cambio global y de impactos ambientales asociados con la provisión de servicios ecosistémicos vinculados al recurso edáfico. El cambio de uso de la tierra afecta fuertemente el stock de carbono orgánico del suelo, fuerza fundamental para la calidad y los servicios del suelo (Somoza y Vázquez, 2023), por lo que los sistemas agroforestales proveen bienes ecosistémicos, tal como la mitigación del cambio climático al capturar carbono en biomasa (Andrade et al., 2018).

Los suelos del páramo generalmente están compuestos de una gran cantidad de carbono orgánico, lo cual se da a temperaturas bajas que minimizan la descomposición de la materia orgánica, que se ha venido acumulando durante largos períodos de tiempo. El principal objeto de estos suelos es regular los niveles de CO_2 emitidos de manera atmosférica por intervenciones antrópicas y así conlleva a la realización ecosistémica para un aporte favorable al ámbito climático a nivel global, actuando como fuente mas no como vertedero (Pinos-Morocho et al., 2021). Dichos servicios ecosistémicos, aunados con los análisis llevados a cabo en la presente investigación, tienen como objetivo fundamental ayudar a la conservación de

los suelos de la alta montaña. Sin embargo, es relevante indicar que “en la última década los ecosistemas de páramo ubicados en zonas de alta montaña han forjado una intensiva degradación como consecuencia de la pérdida parcial o total de la cobertura vegetal” (Vargas, et al., 2022).

Por lo anterior, el objetivo del estudio es determinar la captura de carbono en suelos de tres coberturas vegetales en los complejos de páramos de Boyacá, como el de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, evaluando los cambios temporales de carbono orgánico (CO), mediante la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación y definición de la densidad aparente (ρ_b).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

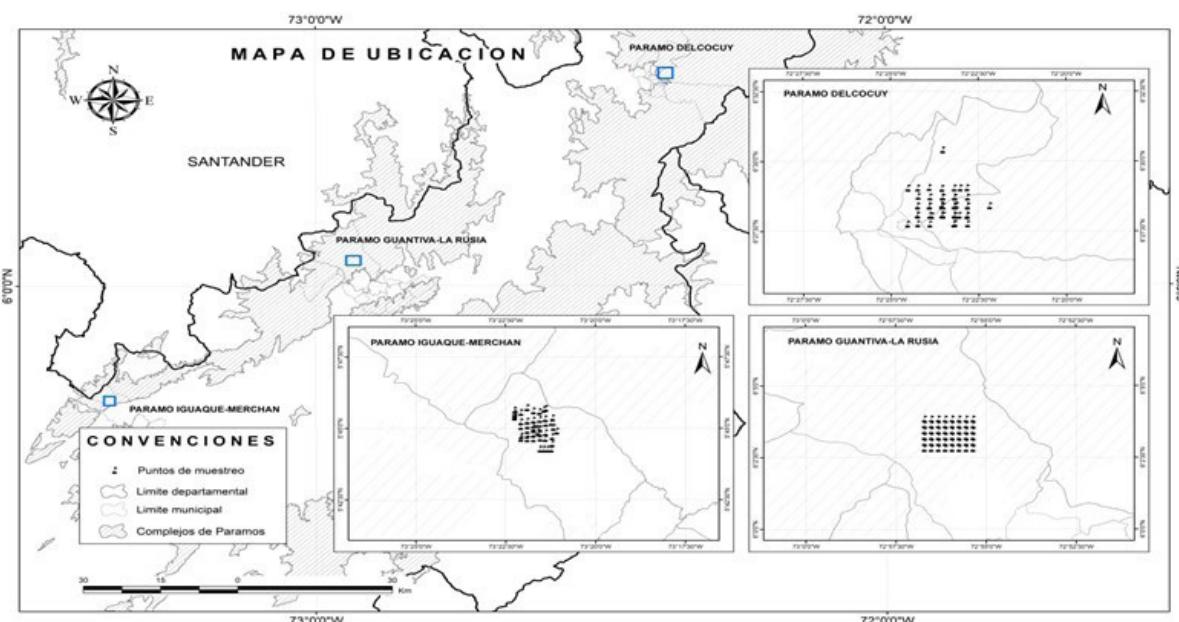


Figura 1. Lugar geográfico de los páramos de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy.

Fuente: elaboración propia

Área de estudio. El estudio fue realizado en los complejos de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy, ubicados como se muestra en la figura 1.

Sitios de muestreo y obtención de muestras. Los complejos de páramo en Boyacá tienen un área piloto de 500 hectáreas (has) en cada uno. Dichos ecosistemas se ubican en la cordillera Oriental en los municipios de Arcabuco, Belén y Guicán, con alturas entre los 3000 y los 5400 m s. n. m. Con el propósito de realizar la obtención de muestras de los suelos para la cuantificación de carbono orgánico (CO) y densidad denominada aparente (ρ_b), fueron escogidos 48 puntos de muestreo para cada complejo de páramo, distribuidos de manera equidistante en las 500 has piloto designadas por la Corporación Autónoma de Boyacá. También se definieron tres zonas permanentes para realizar

la obtención de muestras, con el objetivo de evaluar cambios temporales de carbono orgánico (CO), obteniendo de esta manera datos confiables y verificables. Es importante indicar que el complejo de páramo de Guantiva-La Rusia es de tipo de frailejones; el páramo de Iguaque-Merchán y el de El Cocuy son de tipo herbáceo o pajonal.

La definición de las parcelas se llevó a cabo después del reconocimiento y muestreo total de los 48 puntos del área piloto, en donde se logró identificar las tres zonas, cada cual con una dimensión de $10 \times 10 \text{ m}^2$, tal como se indica en la figura 2, en cuyos sitios se recolectaron de los suelos intervenidos algunas muestras, en recuperación o intervenido, teniendo en cuenta cuáles son los usos de los suelos y las coberturas vegetales, tal como se observa en las figuras 3, 4 y 5.

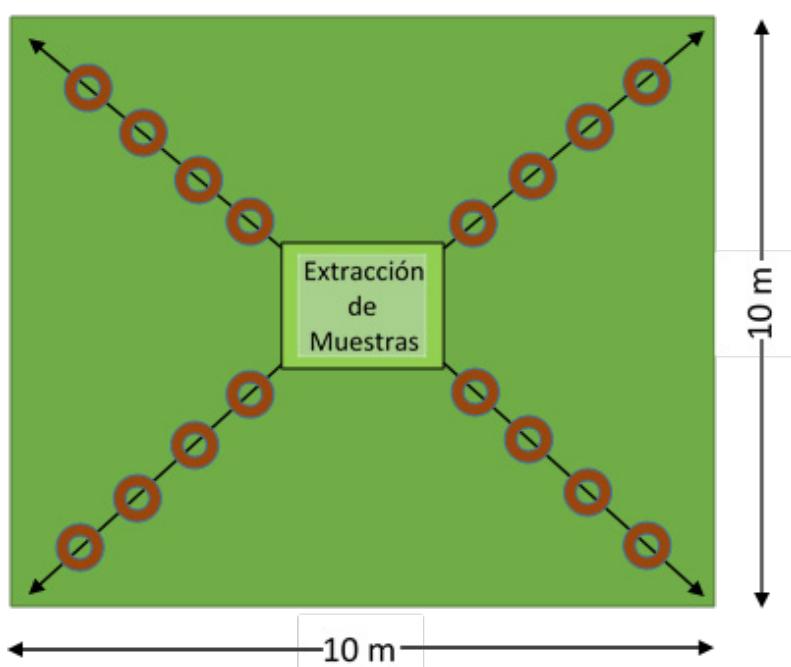


Figura 2. Diseño de PPM y obtención de muestras para densidad aparente y carbono orgánico

Fuente: elaboración propia



Figura 3. PPM área no intervenida, en el páramo de El Cocuy

Fuente: elaboración propia



Figura 4. PPM área en recuperación, complejo de páramo de Iguaque-Merchán

Fuente: elaboración propia



Figura 5. PPM área en intervenida, complejo de páramo de Guantiva-La Rusia

Fuente: elaboración propia

Las PPM se implementaron para determinar cómo es la dinámica del carbono orgánico (CO) en los tres escenarios de cada uno de los tres complejos de páramo evaluados, lo anterior con el objetivo de conocer cómo es el efecto de la intervención antrópica en cada una de las zonas de investigación.

La obtención de muestras de los suelos para la cuantificación de carbono orgánico (CO) fue llevada a cabo por medio de la barrenada de muestreo en 8 puntos de cada una de las PPM. La muestra de los suelos para apreciar la densidad aparente fue tomada en aquellos mismos sitios en los que se realizó la extracción de las muestras de carbono orgánico (CO), utilizando para esto la apertura de una cajuela con dimensiones de 50 x 50 x 50 cm por sitio e implementando el método del anillo con volumen conocido, tomando así dos muestras, una de 0 a 15 cm y otra de 15 a 30 cm en profundidad.

Lo anterior, sustentado en lo descrito sobre levantamiento y caracterización técnica sobre suelos al respecto de las dimensiones de las cajuelas de muestra de campo por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2021), que hace relación a la excavación de forma cúbica que se realiza en el suelo para identificar las características morfológicas, y además que a partir de 50 cm se realiza un barrenaje hasta 1,20 m.

Obtenidas las muestras de los suelos en campo y rotuladas con la información respectiva, son conducidas al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en donde se realizó el análisis al carbono orgánico (CO), implementando el procedimiento de oxidación húmeda

de Walkley y Black (1934), que ha sido adoptado al requerir poca demanda de equipos, sumándose a esto la simplicidad y bajo costo (Izquierdo y Arévalo, 2021), relacionando que “influye en las características físicas, químicas y biológicas del suelo como agente que interviene en la infiltración, suministro y retención de humedad y relacionado con la presencia de diferentes grupos de microorganismos que ayudan a mineralizar la materia orgánica” (Pardo-Plaza et al., 2019).

Contenido de carbono orgánico. La captura o almacenamiento de C de acuerdo con Ramos et al. (2018) se refiere la actividad acumulativa en las diversas coberturas de vegetación en los suelos, según el uso, el cual permanece acumulado “in situ o transformado en productos que no liberan este C una vez más a la atmósfera a lo cual se le conoce como sumideros de carbono”.

Parcela permanente de muestreo intervenida. Burbano (2018) indica que

los contenidos del COS tienden a disminuir con la profundidad. A la vez, los cambios más fuertes en la reserva de carbono en el suelo obedecen a las modificaciones en la cobertura terrestre y tienen lugar en los primeros 20-30 cm.

Cálculo de carbono orgánico del suelo (COS). Según Toledo y Lazo (2021), de acuerdo con la densidad aparente (pb), materia orgánica y el contenido de carbono orgánico (CO), se realiza la determinación en toneladas del contenido de carbono acumulado en los suelos, el cual es definido a partir de la suma del carbono secuestrado de los horizontes de los complejos. En la investigación se empleó la ecuación 1:

$$COS = C \times \rho b \times T \times (1 - frag) \times 10 \quad (1)$$

donde:

COS = contenido de carbono orgánico del suelo (ton $ha^{-1}C$)

C = concentración de carbono orgánico del suelo obtenido en laboratorio

ρb = densidad aparente del suelo (g/cm), masa de suelo por volumen

T = espesor de la capa del suelo expresado en términos de metros

FG = contenido de fragmentos

Obs = el multiplicador final 10 se usó para convertir las unidades en ton $ha^{-1}C$. (Fernández et al, 2019)

En cuanto a la medición del contenido de fragmentos, se indica que el tiempo que toma la estimación de la fragmentación de un suelo es extenso al considerarse muy compleja, por lo tanto, en una gran cantidad de inventarios de suelos esto no se lleva a cabo, o en determinados casos la fragmentación se estima visualmente en el perfil (Secretaría AMS y GTIS de la FAO, 2016). Es recomendable determinar la pedregosidad de manera exacta cuando los fragmentos de roca predominan en el volumen total de la muestra en lugar de utilizar valores constantes (suelos con mayores profundidades) y de esta manera reducir los errores de medición (Lorenz y Lal, 2016).

De acuerdo con la FAO, para determinar el contenido de fragmentos en el suelo se deben identificar y clasificar las partículas según el tamaño y origen, atribuyendo a esto la degradación de la estructura del suelo y la incapacidad para capturar carbono. Debido a la génesis de los suelos estudiados en esta investigación, no presentan fragmentos dentro del perfil y en algunos casos existe poco

desarrollo pedogenético al ser suelos jóvenes (FAO, 2017).

Carbono orgánico equivalente del suelo (COe). “Esta cuantificación se relaciona con la capacidad que tiene el suelo para secuestrar o liberar CO_2 . Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO_2 ” (Oliveira et al., 2022), lo cual se deriva de la “relación 44/12 que proviene de la relación estequiométrica de pesos moleculares con la finalidad de conocer cuánto CO_2 puede originarse por la descomposición del carbono orgánico (CO)” (Pinos-Morocho et al., 2021) para conocer el contenido de CO_2 almacenado o emitido de carbono de una captura determinada, lo cual debe multiplicarse por 3,67.

Análisis estadístico. se realizaron pruebas de cumplimiento de supuestos estadísticos denominado de normalidad (prueba Shapiro Wilk), homocedasticidad (prueba de Bartlett) y el análisis de la varianza (ANOVA), posteriormente se realizó una prueba con la que se compararon los promedios de Tukey, utilizando un nivel de significancia de 0,05. Lo anterior se llevó a cabo en el programa esta-

dístico R versión 4.4.1 y la interfase Rstudio. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3x2, el primer factor corresponde al complejo de páramos

y el segundo a las profundidades del suelo, las gráficas que se presentan están de forma independiente para cada uno de los factores.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró establecer en cuanto a la cobertura de la vegetación de las zonas de estudio, al respecto del complejo de Páramos de Guantiva-La Rusia, tal como lo referencia la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (2025a) que está ubicado en el departamento de Boyacá, en la cordillera Oriental entre 3100 y 4335 (m s. n. m.) por lo que cuenta con una variedad de hábitats de diversas especies, regula el clima, el aire y genera bienes paisajísticos, que presentan beneficios importantes, debido a que se tienen bosques, en donde hay captura del carbono y producción de oxígeno.

En cuanto al páramo de El Cocuy, se encuentra en la cordillera Oriental, con cerca de 306 000 hectáreas, en cuya cobertura vegetal se tiene la presencia de frailejones, cardones y bosques altoandinos que son esenciales para la captura de carbono y la regulación de agua. La otra zona de estudio es el páramo de Iguaque-Merchán, que se encuentra en el departamento de Boyacá, con ecosistemas que prestan una serie de servicios a los habitantes, como provisión hídrica y captura de carbono, con una cobertura vegetal de tipo herbáceo o pajonal (Parques Nacionales de Colombia, 2025).

En estas zonas de estudio del complejo de páramos de Boyacá, se realizaron los análisis con los que se determinaron las cantidades de carbono en los diversos almacenes, mediante la evaluación realizada, cuyos resultados se muestran en la figura 6, en la cual se utilizaron letras minúsculas para identificar las columnas con resultados de las profundidades de 0 a 15 cm y las mayúsculas para las profundidades de 15 a 30 cm y, al evaluar cada factor de forma independiente, las letras se reportan en minúscula debido a que se está presentando estadística para cada uno de los factores estudiados. Esta letras mayúsculas y minúsculas se utilizaron también en las demás figuras presentadas en los resultados del análisis.

En cada interpretación de las variables se reportó que el valor de P era menor al nivel de significancia de 0,05 (el valor de $P < 0,05$) lo que indica que hubo diferencias estadísticas significativas y en el caso del valor de $P > 0,05$ se indica que no hubo diferencias significativas, por lo que no se ve la necesidad de reportar los valores de P; sin embargo, a continuación se describen estos valores, que son los siguientes: CO valor de $P = 2,2e-16$, COS p valor = $1,382e-11$ y COSe valor de $P = 2,2e-16$

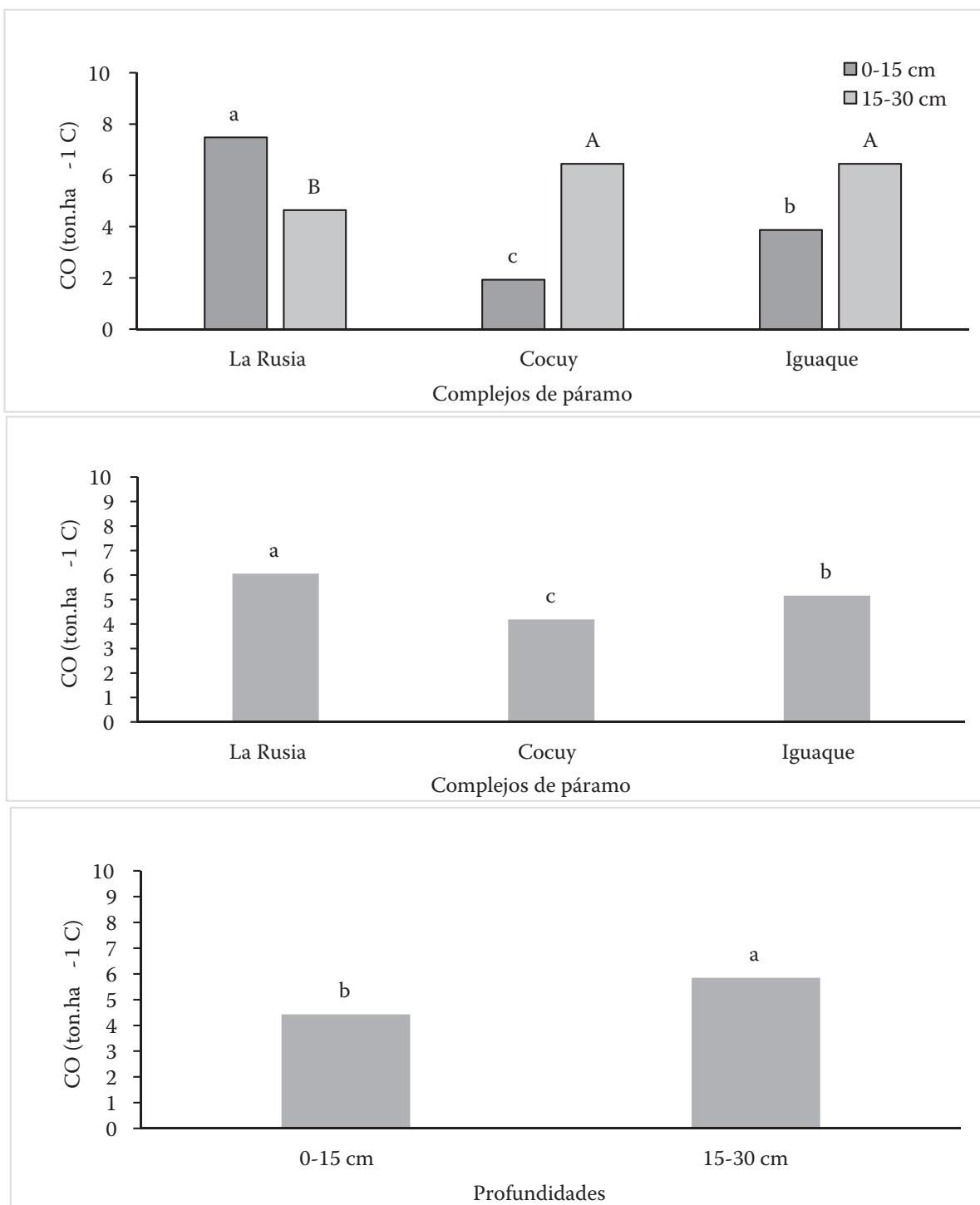


Figura 6. Contenido de carbono orgánico ($\text{ton ha}^{-1}\text{C}$) en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) en el suelo de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

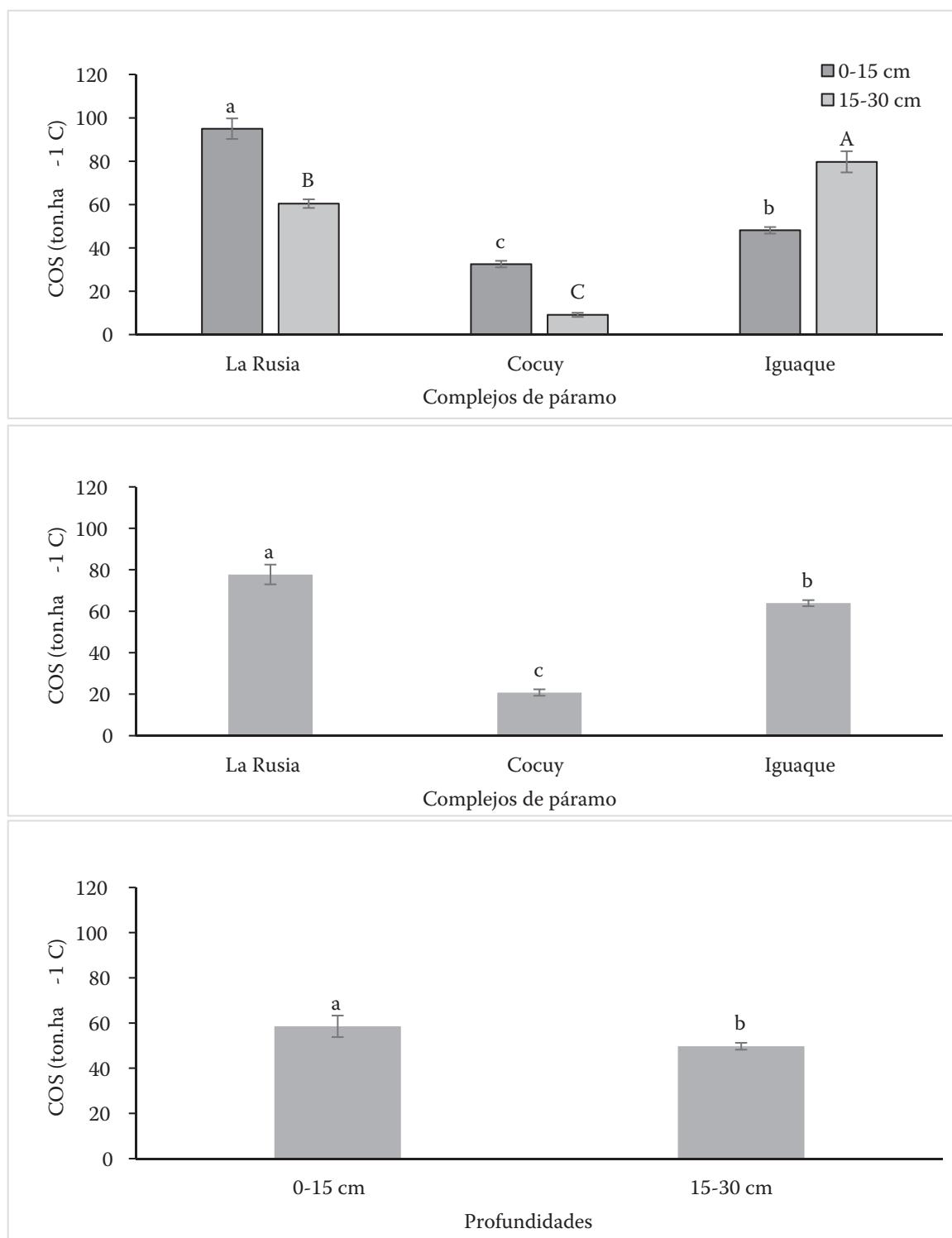


Figura 7. COS (ton ha⁻¹C) en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

Con respecto de la figura 6 se muestra que hubo diferencias estadísticas significativas en cada uno de los complejos de páramo y a diferentes profundidades (valor de $P= 2,2e-16$), donde el complejo La Rusia presentó un mayor promedio de carbono orgánico a una profundidad de 0 a 15 cm, con un 7,48 (ton ha⁻¹C), seguido del páramo de El Cocuy a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm con un 6,45 (ton ha⁻¹C), pero en el cual también se evidencia que presenta un menor valor de contenido de carbono orgánico (CO) a una profundidad de 0 a 15 cm, con 1,93 (ton ha⁻¹C).

En la figura 7 se muestra que hubo diferencias estadísticas significativas en cada uno de los complejos de páramo y a diferentes profundidades (valor de $P= 1,382e-11$). Para el COS en parcela intervenida se definieron estadísticas características entre los complejos de páramo donde La Rusia obtuvo el mayor promedio a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm, con un valor de 6,45 (ton ha⁻¹C), seguidos del páramo de Iguaque a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, con un valor de 79,7 (ton ha⁻¹C), mientras que en el páramo de El Cocuy se reportaron los valores más bajos de COS, a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm con un valor de 32,5 (ton ha⁻¹C), y de 15 a 30 cm con un valor de 9,07 (ton ha⁻¹C) (Figura 7).

El “COS es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69,8 % del C orgánico de la biosfera” (Fonseca-Vargas et al., 2019). La labranza del suelo hace parte del manejo agronómico, y esto lleva a que el carbono, “mediante el laboreo tradicional está sufriendo pérdidas de entre 1/3 y la mitad del carbono total del suelo. Esta pérdida ocurre por la fragmentación que origina la labranza” (Ortiz, 2022), “por tanto, si se

tiene una cubierta vegetal con un contenido de especies variado se logrará una mayor captura de carbono” (Winter et al., 2018). Se establecieron cuatro rangos como niveles de almacenamiento de carbono orgánico (CO) en el suelo y fueron los siguientes: “Muy Alto (>150 Mg ha⁻¹), Alto (100-150 Mg ha⁻¹), Medio (50-100 Mg ha⁻¹) y Bajo (<50 Mg ha⁻¹)” (Vargas-Larreta et al., 2023).

En la figura 7 se puede apreciar el bajo acumulado de COS ton. ha⁻¹C en la PPM intervenida del complejo de páramos de El Cocuy. Con valores de 32,50 y 9,07 ton.ha⁻¹C a niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm, equitativamente, situándose en el nivel de almacenamiento bajo y mostrando una diferencia significativa con relación a los valores arrojados para complejos de Iguaque-Merchán (48,14 y 79,44 ton.ha⁻¹C) y Guantiva-La Rusia (95,03 y 60,41 ton.ha⁻¹C), los cuales se encuentran en un nivel de almacenamiento de carbono medio.

Lo anterior se puede atribuir a las diferentes prácticas agrícolas y ganaderas que se realizan en esta zona. En la transición del uso de los suelos, de un sistema nativo a cultivos, se disminuye el carbono orgánico (CO) y los nutrientes, con el consecuente deterioro del suelo (Ramírez et al., 2023). “Debido a que el carbono orgánico (CO) del suelo se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, y en el contenido incide el manejo del suelo, se han desarrollado diversas prácticas que permitan favorecer el almacenamiento” (Zamora-Morales, 2020), “porque algunas formas del carbono orgánico (CO) del suelo son más frágiles o sensibles al manejo y la labranza” (Bongiorno et al., 2019).

Parcela permanente de muestreo en recuperación

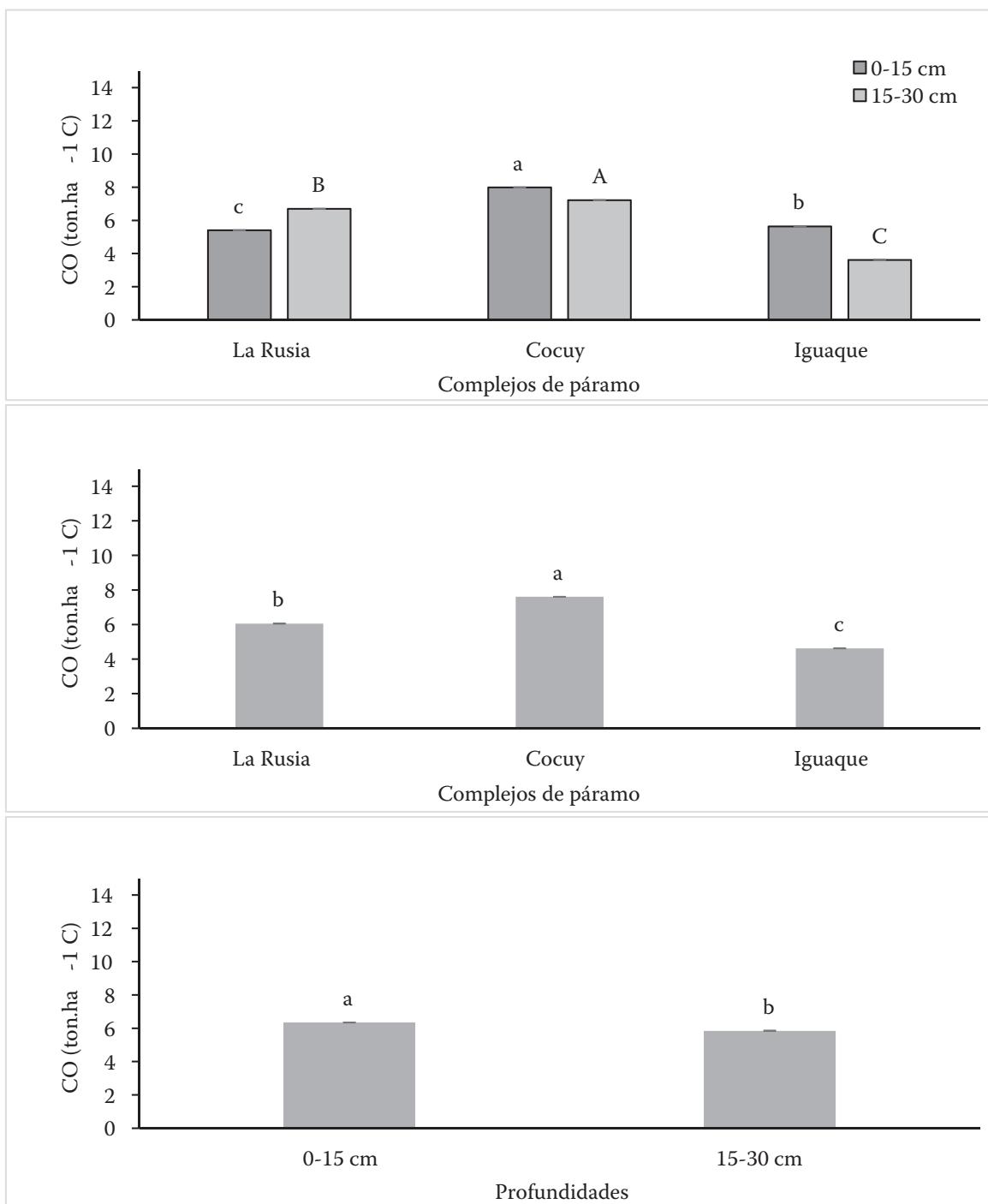


Figura 8. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres páramos

Fuente: elaboración propia

El acumulado de carbono orgánico (CO) presentó diferencias estadísticas significativas, donde el mayor promedio se encontró a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm, con un 7,99 (ton $ha^{-1}C$) en el complejo de páramo de El Cocuy, seguido de una profundidad de 15 a 30 cm, con 7,22 (ton $ha^{-1}C$), en este mismo complejo de páramo. Así mismo, se muestra que el menor promedio de carbono orgánico (CO) está en el complejo del páramo de Iguaque a nivel de profundidad de 15 a 30 cm, con 3,61 (ton $ha^{-1}C$) (Figura 8).

El contenido de carbono orgánico (CO) ($ton.ha^{-1}C$) en la PPM en recuperación en los complejos evaluados, a diferencia de la PPM intervenida, muestran unos valores importantes para El Cocuy, como se observa en la figura 8, siendo este el de mayor contenido de carbono orgánico (CO) en este escenario en cada una de las dos profundidades estudiadas, arrojando valores de 7,99 ton. $ha^{-1}C$ de 0 a 15 cm y 7,22 ton. $ha^{-1}C$ de 15 a 30 cm. Para los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán y Guantiva-La Rusia los valores de contenido de carbono orgánico (CO) en ton. $ha^{-1}C$ para la profundidad de 0 a 15 cm fueron de 5,64 y 5,41 ton. $ha^{-1}C$, mientras que para la profundidad de 15 a 30 cm se encontraron datos de 3,61 y 3,70 ton. $ha^{-1}C$, respectivamente. Siendo menores los contenidos de carbono orgánico (CO) para estos dos últimos complejos, se logró definir que no se encuentran diversas significativas en los tres complejos evaluados.

“El COS corresponde al ingreso de CO_2 de la atmósfera al suelo a través de plantas, residuos de plantas y otros sólidos orgánicos

que se almacenan o se retienen en el suelo como parte de la materia orgánica del suelo” (Mondragón et al., 2022), “convirtiendo al COS en un indicador clave de la calidad en términos agrícolas y ambientales” (Tfaily et al., 2017). “Por lo que, la captura de COS es una posible oportunidad adicional para contrarrestar, en parte, el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO_2 ” (Rumpel et al., 2020).

Hubo diferencias estadísticas significativas en el acumulativo de carbono orgánico (CO) de los suelos para cada uno de los niveles de profundidad de los complejos de páramo, donde el páramo de La Rusia obtuvo el promedio más alto, con un valor de 87,2 ton. ha^{-1} a un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, cuyos resultados como lo indican Andrade et al. (2018) demuestran la importancia de estos sistemas como mitigadores del cambio climático, y en esta misma profundidad en el páramo de Iguaque se obtuvo un menor valor, con 44,7 ton. ha^{-1} (Figura 9).

En la figura 9 se muestran los resultados definidos en los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y el complejo de El Cocuy para el contenido de COS en las PPM en recuperación que, de acuerdo con Eichhorn et al., (2018) “permite de alguna manera llevar a prevenir los efectos del cambio climático, por lo que se debe adaptar a los efectos que pueden ser definitivos”. En la profundidad de 0 a 15 cm, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a los contenidos de COS ton. $ha^{-1}C$, mostrando valores de 71,00, 68,73 y 78,10 (ton $ha^{-1}C$), respectivamente.

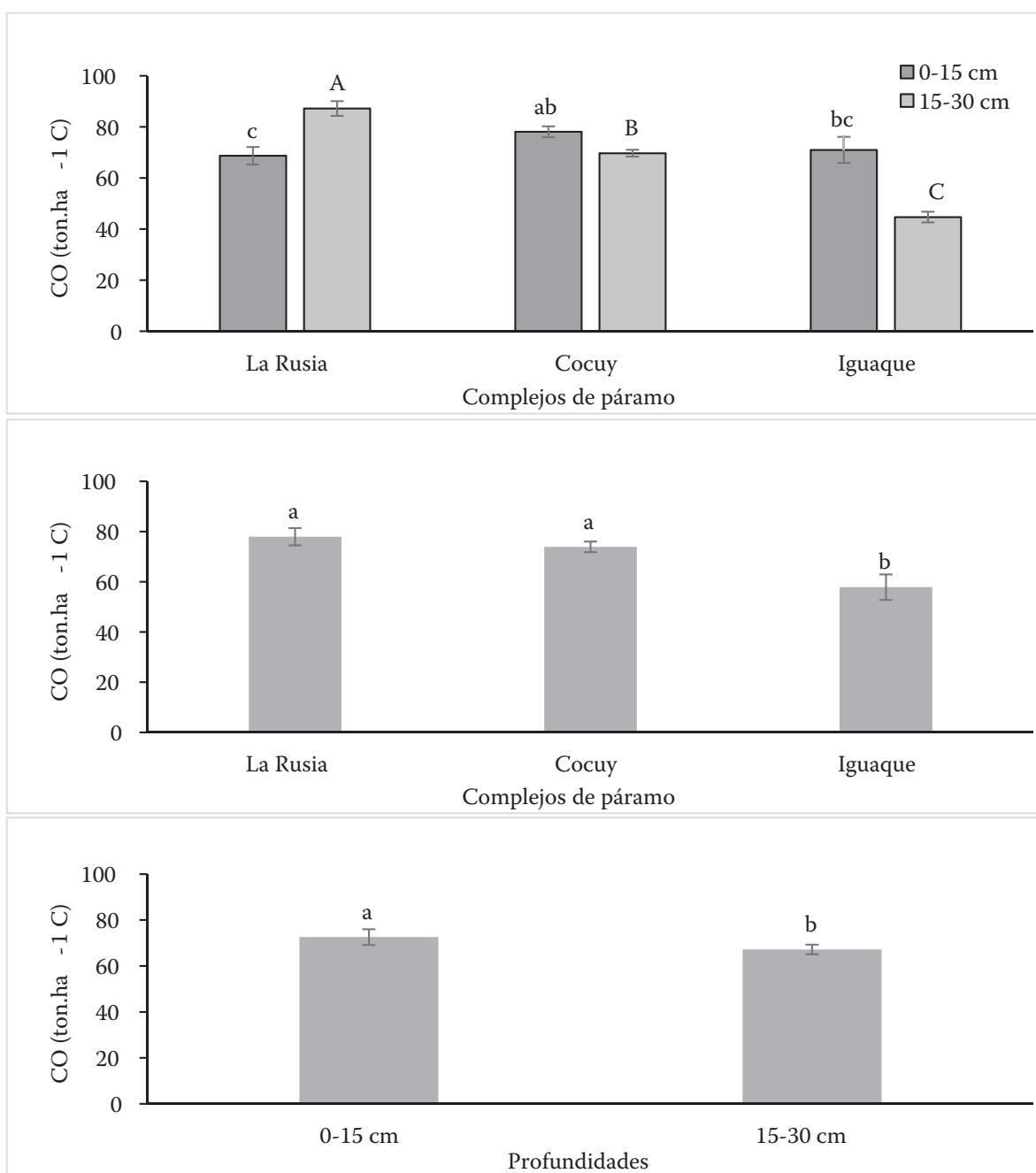


Figura 9. COS (ton $ha^{-1}C$) en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

A nivel de profundidad de 15 a 30 cm se muestra que existe una diversidad significativa en el valor más bajo (44,71 ton. $ha^{-1}C$),

correspondiente al complejo de páramos de Iguaque-Merchán y los valores obtenidos en los sistemas de Guantiva-La Rusia y

el complejo de El Cocuy, en donde los datos arrojados fueron 87,23 y 69,69 ton. $ha^{-1}C$ respectivamente. Todos los resultados de COS obtenidos en la PPM en recuperación para los tres complejos se encuentran ubicados en el nivel de almacenamiento de carbono medio, excepto el arrojado por el complejo de Iguaque-Merchán en la profundidad de 15 a 30 cm.

Respecto a las dos profundidades evaluadas, se muestra que en los sistemas de páramos de Iguaque-Merchán y el complejo de El Cocuy, el contenido de COS ton. $ha^{-1}C$ es mayor en la profundidad de 0 a 15 cm que el obtenido entre los 15 y 30 cm de profundidad. Lo anterior corrobora lo estudiado por Walteros-Torres et al. (2022) en el sistema de Sumapaz, en donde el contenido de COS determinó mayores valores en el horizonte superficial (0 a 25 cm), y en el caso de 20-45 cm de profundidad fue menor.

Parcela permanente de muestreo no intervenida

El páramo de La Rusia presentó mayores promedios de contenido de carbono para los niveles de profundidad (0 a 15 cm y 15 a

30 cm), con un 11,6 (ton $ha^{-1}C$) y con un 8,6 (ton $ha^{-1}C$), respectivamente, que frente a los páramos de El Cocuy y de Iguaque (P valor <0,07); además, se pudo observar que el menor contenido de carbono orgánico (CO) a un nivel de profundidad de 0 a 15 cm se determinó en el páramo de Iguaque y para el nivel de profundidad de 15 a 30 cm se dio en el páramo de El Cocuy (Figura 10).

En la figura 10 se observan los contenidos de carbono orgánico (CO) en la PPM no intervenida para los tres de páramos investigados en este estudio. Las estadísticas, en cuanto al complejo de Guantiva-La Rusia, muestran un resultado diferente a nivel de profundidad de 0 a 15 cm con un valor de 11,61 ton $ha^{-1}C$, con relación a los sistemas del páramo de Iguaque-Merchán y el complejo de El Cocuy, en los cuales se observan valores de 5,52 y 5,64 ton $ha^{-1}C$ para la misma profundidad, sin presentar diferencias significativas entre ellos. Como se muestra en la figura 10 del complejo de páramos de El Cocuy que se refiere al nivel de profundidad de 0 a 15 cm, ya que este complejo presenta suelos variables, dependiendo de la posición en el terreno, los cuales son superficiales con erosión ligera.

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

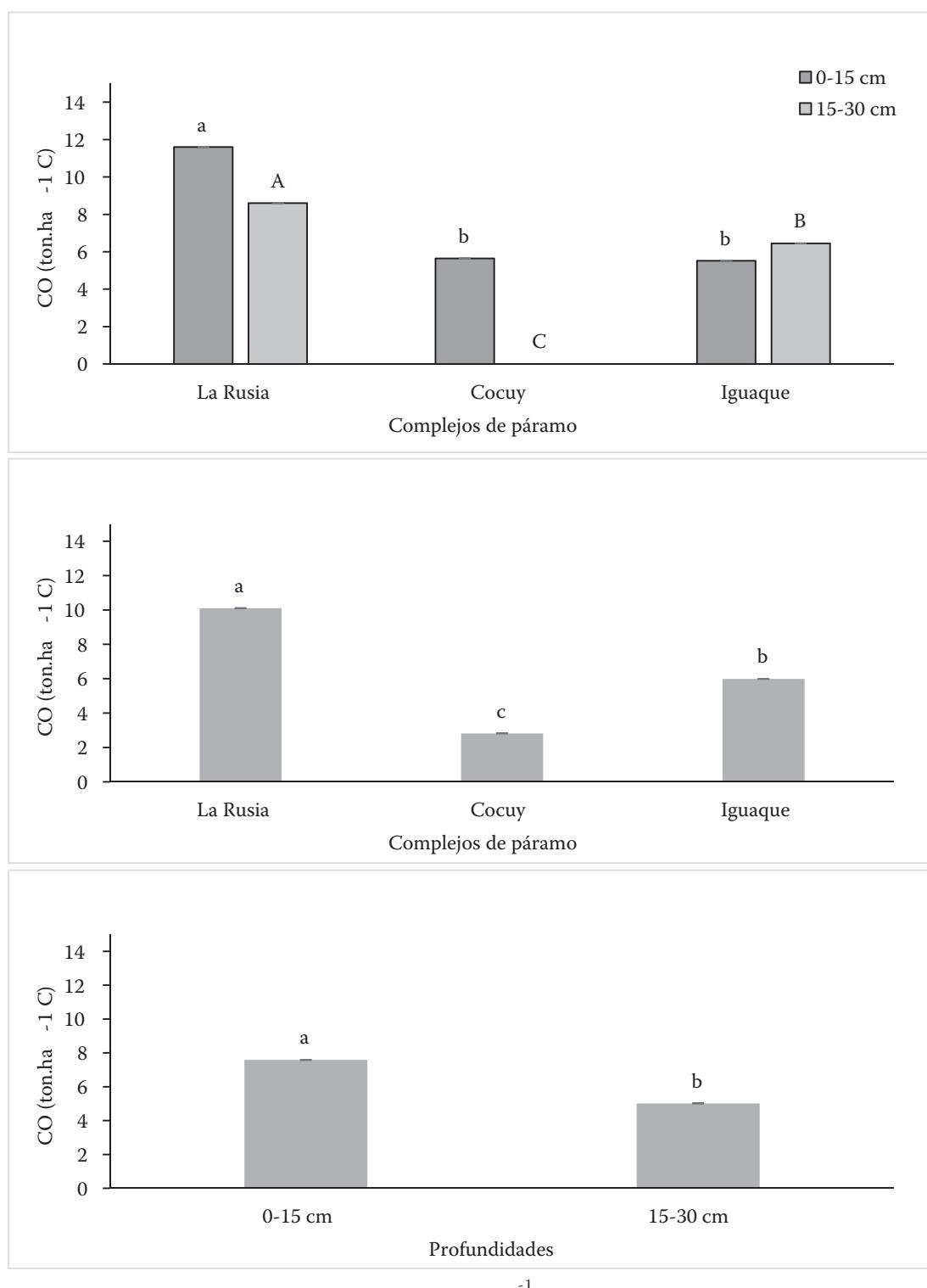


Figura 10. Contenido de carbono orgánico (ton ha⁻¹C) en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

En referencia al contenido de carbono orgánico (CO) (ton.ha⁻¹C), se puede observar que en este escenario de no intervención antrópica (áreas no disturbadas) con relación a la zona en recuperación, se encontraron valores similares, lo anterior se puede atribuir a que los suelos en estos tres complejos son suelos jóvenes, por lo cual el tiempo que han llevado capturando carbono es corto.

Se debe tener en cuenta que “las actividades de manejo tanto para la producción animal como para el aprovechamiento forestal afectan también la captura de carbono” (Pérez et al., 2021) que permite “disminuir la contaminación que se puede dar en la atmósfera y la hidrosfera”, así mismo la concentración de COS está dada por la interacción de la fauna, la profundidad de los suelos, el sistema vegetal, y factores ambientales (Madrigal et al., 2019). Entre las actividades de manejo de producción animal, se tienen la de cría y cuidado para obtener productos como carne y leche, destinados al consumo humano; y en cuanto a las actividades de aprovechamiento forestal se tienen la de extracción, utilización de recursos maderables y no maderables, que afectan la captura de carbono, porque los bosques son sumideros que lo almacenan y si hay erosión en los suelos, tala y deforestación de los árboles, el carbono se libera como dióxido de carbono, generando cambio climático adverso. Por lo que, como indica Solano (2019), “la vegetación de los bosques es relevante al momento de la captura de CO₂ y es fundamental conocer sobre el tema con el objetivo de diseñar y aplicar estrategias de conservación de los árboles de los bosques”.

La biogeoquímica fue abordada mediante el análisis de tres tipos de coberturas vegeta-

les diferentes: intervenida, no intervenida y en recuperación, evaluando procesos pedogenéticos para determinar las concentraciones de COS y así determinar la influencia del material parental y de la actividad antrópica (Castillo, 2019).

El acumulado de carbono orgánico (CO) de los suelos del área no intervenida obtuvo mayores promedios con datos estadísticos diferentes en el páramo de La Rusia para los dos niveles de profundidades definidas (0 a 15 cm y 15 a 30 cm), con 145 (ton ha⁻¹C) y con 110 (ton ha⁻¹C), respectivamente, con respecto a los páramos de El Cocuy e Iguaque como se observa en la figura 11.

Los contenidos de COS para los tres complejos de páramos en PPM no intervenida se muestran en la figura 11, donde se encuentran tres niveles de almacenamiento de carbono orgánico (CO) con los valores definidos en el área investigada. Se observa que los resultados hallados en lo referente al complejo de Guantiva-La Rusia para las dos profundidades son de nivel alto en almacenamiento de carbono orgánico (CO) con 144,93 ton.ha⁻¹C de 0 a 15 cm y 110,03 ton.ha⁻¹C de 15 a 30 cm. Lo anterior se correlaciona con lo expuesto por Cruz-Sánchez et al. (2021), en cuanto a que el contenido de COS baja porque se incrementa el nivel de profundidad de los suelos.

Se presenta un nivel bajo de almacenamiento en el complejo de Iguaque-Merchán con datos de 25,18 ton.ha⁻¹C para la profundidad 0 a 15 cm y de 40,36 ton.ha⁻¹C para la de 15 a 30 cm, mientras que el complejo de El Cocuy en la profundidad de 0 a 15 cm, se obtuvo un valor de 60,44 ton.ha⁻¹C con un nivel medio de almacenamiento de carbono.

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

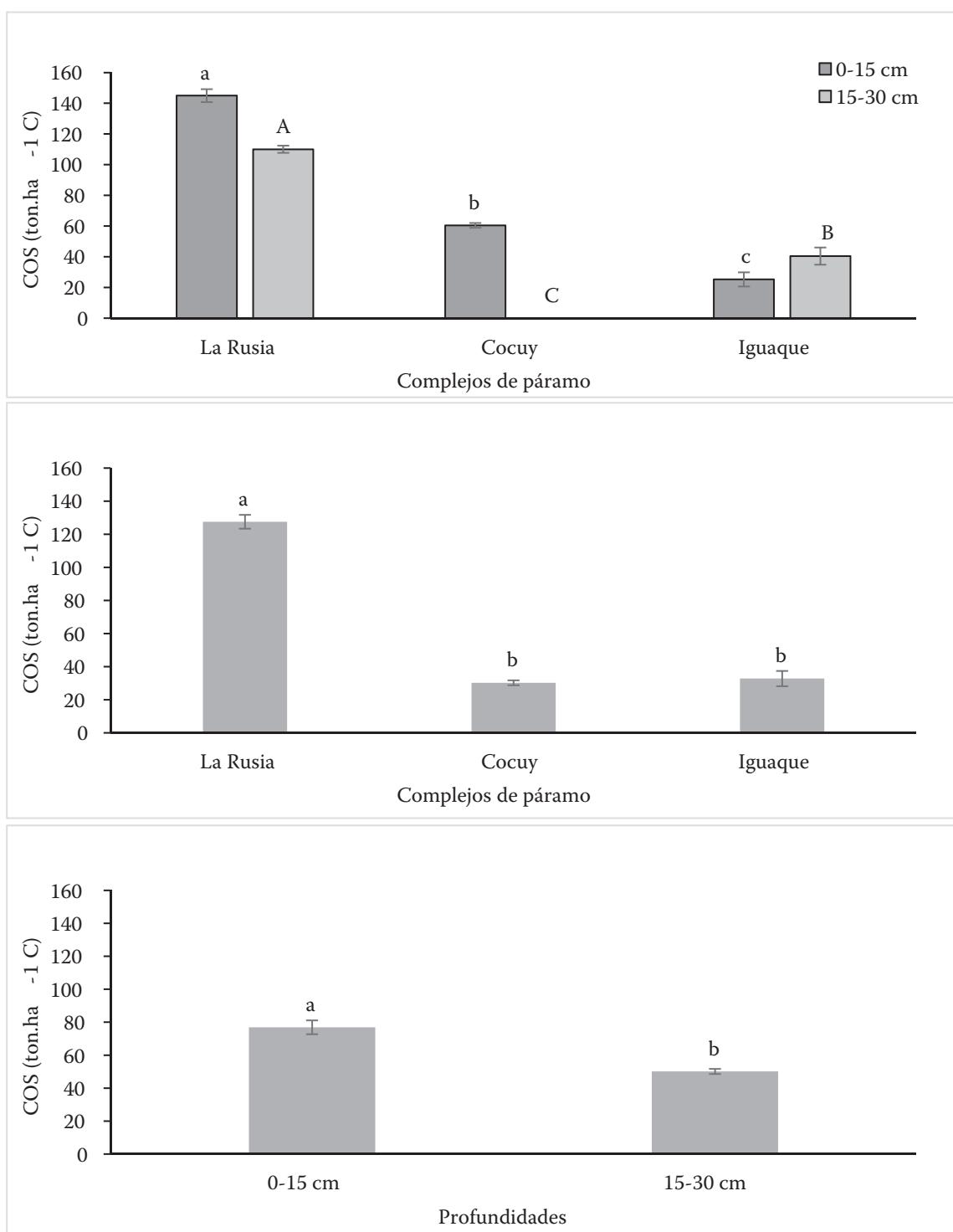


Figura 11. COS ton.ha-1C en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los páramos

Fuente: elaboración propia

“El suelo es un recurso natural imprescindible para disminuir los efectos del cambio climático, por el rol del ciclo de carbono en la tierra” (Burbano, 2018); el carbono orgánico (CO) se encuentra almacenado en los suelos de manglares” (Núñez-Ravelo et al., 2021), “humedales” (Ampuero y Aponte, 2020), “bosques” y “páramo herbáceo” (Gutiérrez et al., 2019) “aunque la mayor concentración de carbono orgánico (CO) en el suelo está en la región de los Andes” (Loayza et al., 2020).

Captura de carbono orgánico según coberturas vegetales

A la profundidad de 0 a 15 cm se hallaron diversas estadísticas importantes en los complejos de páramo y los diferentes tipos de cobertura vegetal, encontrando que la cobertura de pajones del páramo de Iguaque tuvo un mayor promedio de acumulado de carbono orgánico (CO) de 7,79 ton $ha^{-1}C$, comparada con la cobertura de matorrales en el páramo de La Rusia que presentó el menor promedio de carbono orgánico, de 4,18 ton $ha^{-1}C$ (Figura 12).

En las figuras 12 y 13 se observan los contenidos de carbono orgánico (CO) referidos

a las coberturas vegetales presentes en los suelos de los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y el complejo de El Cocuy en los niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm. Se puede ver que el mayor contenido de carbono orgánico (CO) para los tres complejos se presenta en los suelos en donde las coberturas vegetales son los pajonales y bosques achaparrados con valores entre 5,93 y 9,39 ton $ha^{-1}C$. A un nivel de profundidad de 15 a 30 cm, se observaron diversas estadísticas importantes entre la cobertura de matorrales en el páramo de El Cocuy, con respecto a prados para ganadería que tuvieron el menor promedio de carbono orgánico para este mismo páramo con un valor de 4,04 ton $ha^{-1}C$ (Figura 13).

En las zonas donde predominan los pastos para ganado y prado intervenido con valores de 3,70 y 4,05 ton $ha^{-1}C$, respectivamente, se encontraron los menores contenidos de carbono orgánico (CO), lo que concuerda con lo mencionado por Bolívar et al. (2021) “disminuye la captura de CO₂ y por ende se da un incremento de dióxido de carbono hacia el medio ambiente. Es decir que el suelo compensa de manera significativa las emisiones de CO₂” (Universidad Nacional de Colombia, 2022).

**CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ**

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

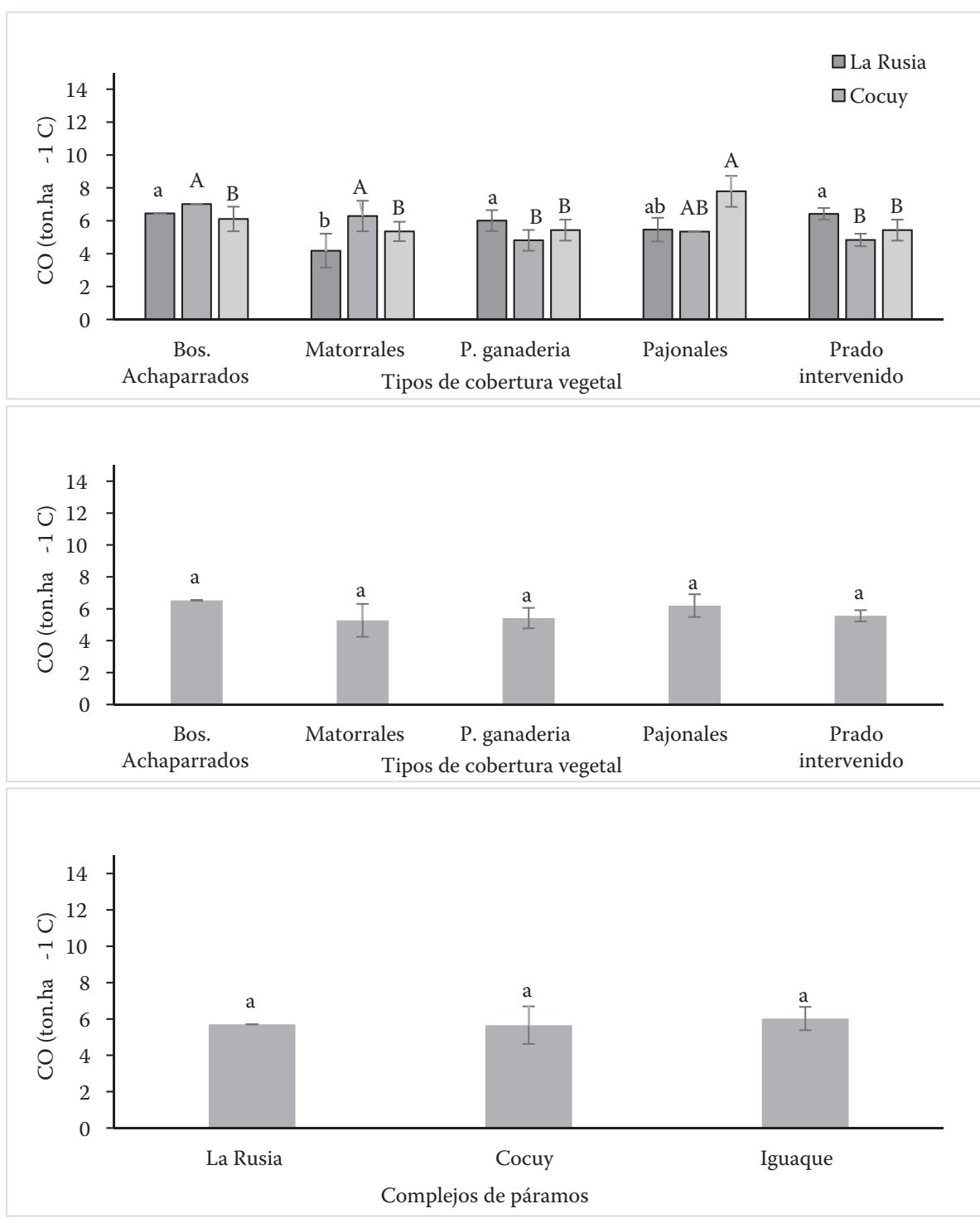


Figura 12. Contenido de carbono orgánico ($\text{ton.ha}^{-1}\text{C}$) en el suelo (0 a 15 cm), respecto a las coberturas vegetales presentes en los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva-La Rusia y El Cocuy

Fuente: elaboración propia

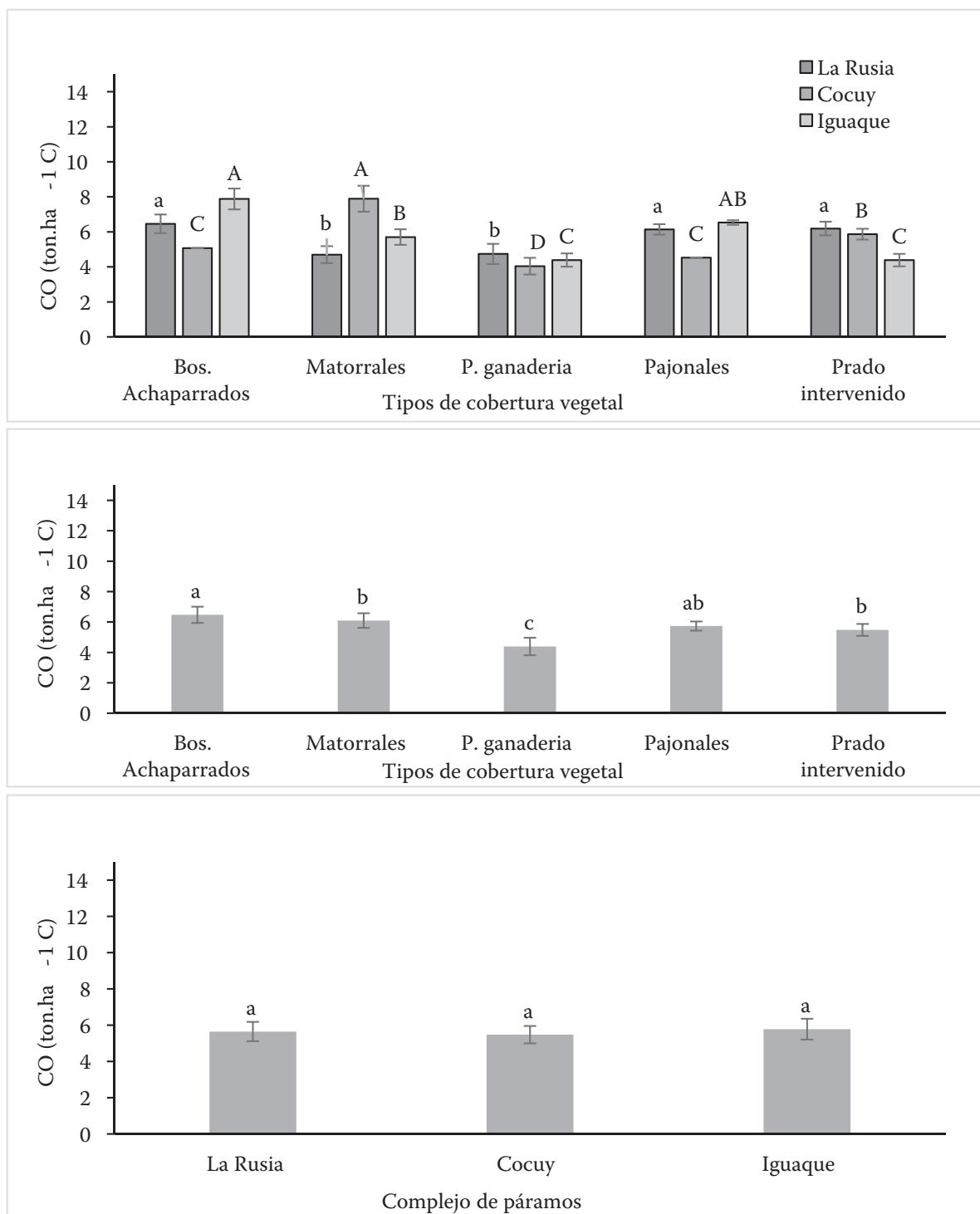


Figura 13. Contenido de carbono orgánico (ton $ha^{-1}C$) en el suelo (15 a 30 cm), respecto a las coberturas vegetales presentes en los sistemas de páramo de Iguaque-Merchán, Guantiva La Rusia y El Cocuy.

Fuente: elaboración propia

Carbono orgánico equivalente (CO_e)

La captura de carbono “en el suelo es el proceso mediante el cual el carbono se transfiere de la atmósfera a los suelos. El almacenamiento de carbono en el suelo es la retención del carbono secuestrado en el suelo” (Pérez y Rodríguez, 2019). La capacidad de captura de carbono tiene cuatro niveles, los cuales se clasifican de la siguiente manera: Bajo < 182,5 ton.ha⁻¹C, Medio (182,5-365 ton.ha⁻¹C), Alto (365-547,5 ton.ha⁻¹C) y Muy Alto > 547,5 ton.ha⁻¹C.

El carbono orgánico equivalente de los suelos obtuvo diversas estadísticas importantes entre los sistemas de páramos a los dos niveles de profundidad, observando que el páramo de La Rusia tiene un mayor contenido promedio a una profundidad de 0 a 15 cm, comparado con el páramo de El Cocuy, mientras que el páramo de Iguaque obtuvo el mayor promedio a una profundidad de 15 a 30 cm (Figura 14).

En la figura 14 se muestra que la capacidad de captura de carbono en cuanto a PPM intervenida fue más alta en los sistemas de

Guantiva-La Rusia en la profundidad de 0-15 cm con un valor de 348,76 ton.ha⁻¹C (nivel medio), mientras que para la profundidad de 15 a 30 cm el valor más alto de los tres complejos lo presentó Iguaque-Merchán, con 292,66 ton.ha⁻¹C (nivel medio), lo cual reafirma lo que dicen Bolívar et al. (2021) en Colombia: “los mayores contenidos de carbono se asocian a los suelos relacionados con las cadenas de montañas de las cordilleras”. De acuerdo con lo anterior, Acosta et al., (2021) indican que los suelos se modifican en sumideros del carbono, ya que mediante la actividad de la fotosíntesis logra la transformación de CO₂ en biomasa viva. El complejo de El Cocuy presentó para las dos profundidades (0-15 y 15-30 cm) los valores en el nivel bajo, con 119,27 y 33,30 ton.ha⁻¹C, respectivamente.

Hubo diferencias estadísticas para carbono orgánico (CO) equivalente de los suelos al nivel de profundidad de 15 a 30 cm, en los tres complejos de páramo, en donde el más alto es del páramo de La Rusia con 872 ton.ha⁻¹C; mientras que para la profundidad de 0 a 15 cm hubo estadísticas similares en los tres complejos de páramo (Figura 15).

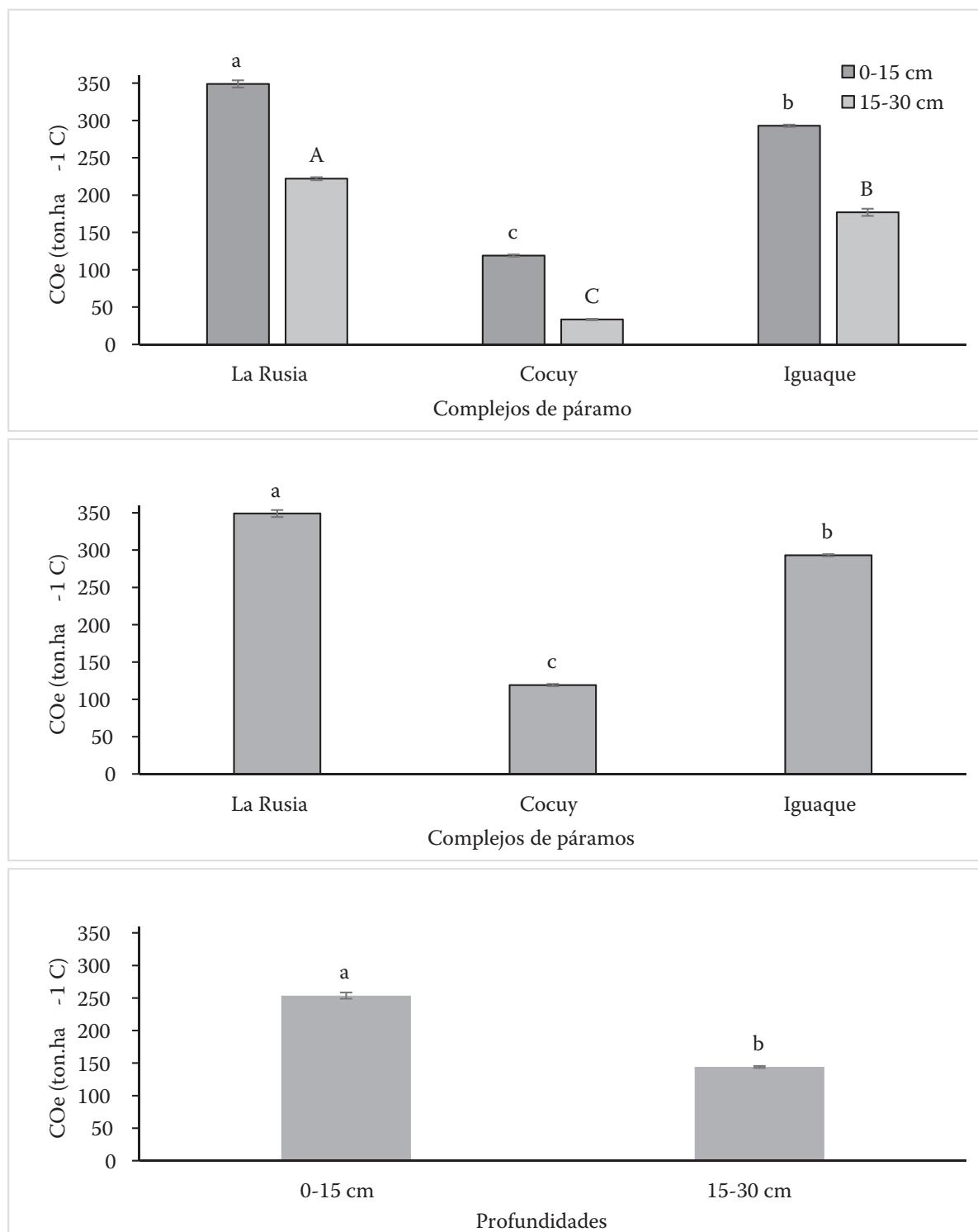


Figura 14. Carbono orgánico equivalente en PPM intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

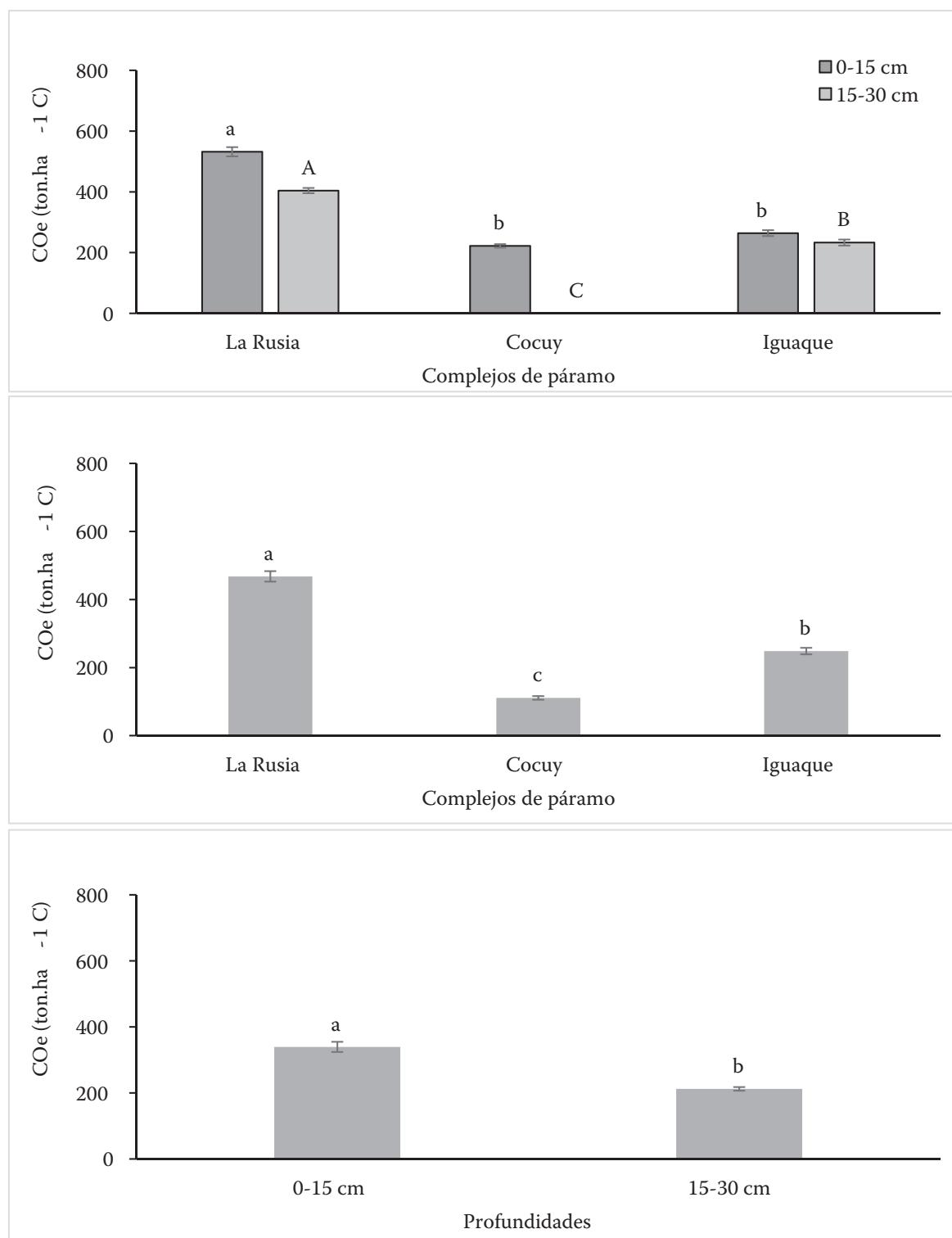


Figura 15. Carbono orgánico equivalente en PPM en recuperación a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

Como muestra la figura 15 en los tres complejos evaluados ubicados en Boyacá, la mayor capacidad de captura en PPM se presentó en la profundidad de 15 a 30 cm. En los complejos de Guantiva-La Rusia y El Cocuy se presentó el nivel muy alto de captura de carbono con los valores respectivos de 872,26 y 696,93 ton.ha⁻¹C, y el más bajo fue el del complejo de Iguaque-Merchán, con 447 ton.ha⁻¹C, que tiene varias áreas que han sido intervenidas de manera antrópica, lo cual afecta el almacenamiento del carbono orgánico (CO), tal como lo mencionan Romero et al. (2023), quienes indican que “el cambio de uso del suelo ha contribuido en al menos 35% de las emisiones antropogénicas de CO₂, lo cual se vincula a la pérdida de biomasa y de carbono por encima y por debajo del suelo”. En cuanto a la profundidad de 0 a 15 cm se muestran valores similares para los tres complejos, de la siguiente manera: Iguaque-Merchán (260,58 ton.ha⁻¹C), Guantiva-La Rusia (252,24) y El Cocuy (286,61 ton.ha⁻¹C), pertenecientes a nivel medio de capacidad de captura, en la cual, como dicen, Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) “la asimilación de carbono lleva a la contribución básica en la mitigación del fenómeno conocido como cambio climático”.

También se observó que el complejo de páramo La Rusia tuvo los valores promedios más altos con diferencias estadísticas significativas con relación a los demás páramos del estudio, para las dos profundidades (0 a

15 cm y 15 a 30 cm), las cuales fueron (532 y 404 ton.ha⁻¹C, respectivamente), seguidos del páramo de Iguaque y, finalmente, el páramo de El Cocuy que reportó los valores promedio más bajos (Figura 16).

La figura 16 deja observar que en las PPM no intervenidas (áreas conservadas), en cuanto a los que tienen la capacidad mayor de captura de carbono orgánico (CO) la tiene el complejo de Guantiva-La Rusia, con valores de 531,89 y 403,79 ton.ha⁻¹C para los niveles de profundidad entre 0 a 15 y 15 a 30 cm, perteneciendo así a nivel alto de capacidad de captura. El complejo de El Cocuy presentó un valor con nivel medio en la profundidad 0 a 15 cm, con 221,82 ton.ha⁻¹C, mientras que para 15 a 30 cm no se obtuvo análisis al hacerse imposible el muestreo para esta profundidad por la presencia del material parental como se señaló anteriormente. El nivel de capacidad de captura muy bajo tuvo lugar en el complejo de Iguaque-Merchán para las dos profundidades, como se indica en la figura 15, donde los valores obtenidos fueron de 92,40 ton.ha⁻¹C (0-15 cm) y 148,12 (15-30 cm). Por lo tanto, y como indican Cely et al. (2019) “la cobertura vegetal del páramo se convierte en un escenario de mitigación del efecto del cambio climático, básicamente, por la captura y almacenamiento de carbono edáfico”, lo cual es prioritario para mejorar la calidad de vida de la población.

CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS BAJO TRES COBERTURAS
VEGETALES EN COMPLEJOS DE PÁRAMOS DE BOYACÁ

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A.

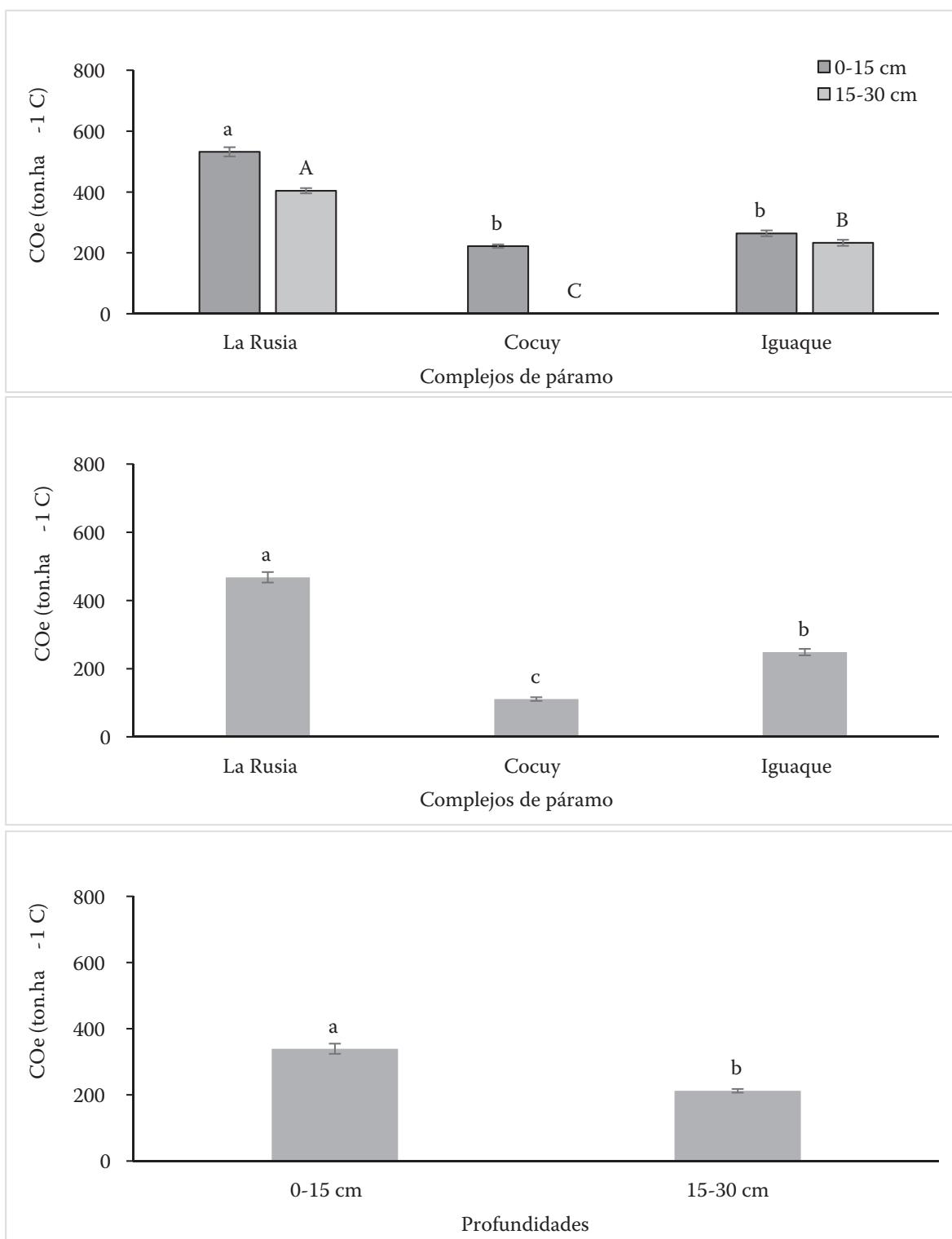


Figura 16. Carbono orgánico equivalente en PPM no intervenida a dos niveles de profundidad (0 a 15 y 15 a 30 cm) de los suelos de los tres complejos de páramo

Fuente: elaboración propia

Por eso, la importancia de avanzar en investigaciones sobre el tema de captura de carbono, porque a pesar de que se han realizado varias y, tal como lo señalan Andrade et al., (2022), los estudios relacionados con el COS en sistemas naturales de páramo son insuficientes y aunque se centran en los cambios en el contenido de carbono debido a la utilización del suelo, solo se destacan en las disimilitudes en el contenido de COS a 4 m de profundidad entre bosques de la distintas formas (Lis-Gutiérrez et al., 2019); esto hace que la información sea limitada para hacer

comparaciones en ecosistemas de similares condiciones. Otro aspecto que limita las investigaciones es el tamaño de la muestra que es de gran influencia, puesto que, por costos, es difícil cubrir una zona más amplia en donde se pueda obtener mayor cantidad de información sobre cada uno de los factores que intervienen en la captura de carbono en el suelo, que resulta ser un tema vital para seguir investigando, con el fin de lograr implementar acciones que busquen la protección de la biodiversidad y del medio ambiente.

4 CONCLUSIONES

Los suelos de páramo son un componente clave en el desarrollo del ciclo del carbono, igualmente se convierten en una fuente o reservorio de carbono hacia el entorno, pero depende de cómo son usados por las personas que se establecen en ellos. Las actividades agrícolas convencionales promueven la liberación de CO₂ hacia la atmósfera provocando así el calentamiento global, mientras que el uso conservacionista y la protección de los ecosistemas nativos favorecen el incremento del carbono en diversas materias orgánicas en los suelos; lo anterior, porque las prácticas agrícolas como el arado, el sobrepastoreo o la quema, incrementan la liberación de carbono y las prácticas conservacionistas como la reforestación o el manejo pasivo de la vegetación y permiten la retención de carbono que se acumula en la materia orgánica bajo condiciones de bajas temperaturas y poca perturbación, como ocurre en los páramos.

Un alto contenido de carbono permite favorecer a largo plazo en la atenuación o disminución de los factores que impulsan el cambio climático. Por lo anterior es importante llevar a cabo investigaciones sobre la captura y emisión de carbono en ecosistemas, tanto nativos como intervenidos de manera antrópica, en donde se presenten procesos de alteración de la utilización de los suelos, mostrando diferencias en la acumulación del carbono orgánico (CO) y así se puedan establecer diferentes opciones de mitigación de GEI, como la promoción de incentivos para buenas prácticas agrícolas, políticas públicas de restauración o el establecimiento de sistemas de monitoreo del carbono en suelos de alta montaña, lo cual busca poder mejorar la capacidad de los suelos para la captura del carbono orgánico.

Los resultados de las mediciones en la investigación determinan las acumulaciones de carbono en los suelos de los diferentes es-

cenarios evaluados en estos tres complejos de páramos del departamento de Boyacá, en los cuales se observa que las áreas estudiadas de forma antrópica y los lugares de recuperación refieren un alto contenido de captura de carbono, mostrándose como sumide-

ros potenciales, por lo cual es manifiesta la importancia para estas zonas de establecer programas enfocados a la mitigación y la liberación de CO₂ hacia la biodiversidad de alta montaña, remplazando las actividades agrícolas por prácticas conservacionistas.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: Investigador del proyecto, desarrollo metodológico, estudio de datos, descriptor de conceptos, escritor, edición e investigación original.

Segundo autor: Supervisor del proyecto, descriptor de conceptos, análisis de información y revisión.

Tercer autor: Director de grupo de investigación, logística y revisión.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional de Boyacá “Corpoboyacá”, por la generación de los recursos para el proyecto de investigación “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña, en los complejos de páramo de Guantiva-La Rusia, Iguaque-Merchán y El Cocuy” en el Convenio Interadministrativo N.º CNV 2014-008, celebrado entre Corpoboyacá y la Universi-

dad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC sede Tunja. Al laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, por los métodos analíticos realizados en dicho laboratorio. Al Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible – GIPSO de la UPTC sede Tunja, por el apoyo logístico en la realización del presente artículo.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Aburto, J. A. (2022). *Determinación de carbono orgánico total en suelos forestales y agrícolas de la CDMX*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/41018>

Acosta, M. M., Carrillo, F., Buendía, E., Benavides, J., Flores, E. y González, L. (2021). Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1377-1387. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>

Ampuero, W. y Aponte, H. (2020). Estimación del carbono almacenado en un juncal de Schoenoplectus americanus en el humedal costero Los Pantanos de Villa (Lima - Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 267-282. <https://doi.org/10.22497/1505>

Andrade C. H., Patiño, F. S., Suárez, S. L. N y Segura, M. M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. Colombia. *Revista de Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(2), 121-134. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2312/2838>

Andrade, H. J., Segura, M. A., y Canal-Daza, D. S. (2022). Conservation of Soil Organ-

ic Carbon in the National Park *Santuario de Fauna y Flora Iguaque*, Boyacá-Colombia. *Forests*, 13(8), 1275. <https://doi.org/10.3390/f13081275>

Bolívar, A., Camacho, C., Ordóñez, N., Gutiérrez, J., Álvarez, G., Guevara, M., Oliveira, C., Olmedo, G., Bunning, S. y Vargas, R. (2021). Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. Colombia. *Ecosistemas* 30(1):2019. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>

Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mader, P., Brussaard, L. & De Goeede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>

Burbano Orjuela, H. (2018). The soil organic carbon and its role on climate change. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82–96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>

Carvajal-Agudelo, B. N. y Andrade, H. J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia.

Orinoquia, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>

Castillo Lagos, P. (2019). *Biogeoquímica del sistema roca-suelo-planta en cuatro viñas de Chile Central (33°-36°S): influencias litogénicas, pedogenéticas y antrópicas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174184>

Cely, R. G., Fernández, P. C y 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., Universidad Nacional de Colombia.

Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá (2025a). Páramo de Guantiva-La Rusia. Colombia. <https://www.corpoboyaca.gov.co/sirap/paramo-guantiva-la-rusia/>

Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá (2025b). Páramo Iguaque – Merchán. Colombia. <https://www.corpoboyaca.gov.co/sirap/paramo-iguaque-merchan/>

Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D. y Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Respiración del suelo en un bosque templado de México y su relación con el carbono orgánico. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://myb.ajs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2153>

Cuervo Barahona, E. (2019). Potencial de liberación y fracciones de carbono orgánico en el suelo del Páramo la Cortadera.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3474>

Eichhorn, C. P., Guzmán, G. A. y Hurtado, J. V. (2018). *Diseño metodológico para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica a partir de imágenes satelitales. Caso de estudio: municipio de Pesca, Boyacá, Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/f2e4b0d5-1898-4837-b267-7d2205bdcfde>

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>

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>

Fernández, C. J., Cely, G. E. y Ramírez, 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://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/66152>

Flóres y Calderón. (2021). *La relación de carbono orgánico a nitrógeno total en sue-*

los agrícolas. México. Laboratorio A-L de México S.A.

Fonseca-Vargas, R., Furcal-Beriguete, P., Campos-Rodríguez, R. y Esquivel-Segura, E. (2019). Retención de carbono en un suelo dedicado al cultivo de piña (*Ananas comosus* L.) bajo un manejo convencional y de mínima labranza. *Tecnología en Marcha*, 32(4), 116-132. DOI:10.18845/tm.v32i4.4797

Gómez-Balanta, F.Z. y Ramírez-Nader, L. M. (2022). Contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en un agroecosistema altoandino del Valle del Cauca, Colombia. *Revista UDCA. Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2057>

Gutiérrez, J., Ordóñez, N., Bolívar, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C., Olmedo, G., Rodríguez, L., Sevilla, V. y Vargas, R. (2019). Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(1), 1855. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>

Izquierdo, J. y Arévalo, J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 26. https://www.researchgate.net/publication/358655904_Determinacion_del_carbono_organico_por_el_metodo_quimico_y_por_calcinacion

Lis-Gutiérrez, M., Rubiano, Y. y Loaiza, J. C. (2019). Suelos y uso del suelo en el estudio del carbono orgánico del suelo en la catena del altiplano colombiano.

Colombia. *AUC Geograph* 54 (1), 15-23. https://www.researchgate.net/publication/333093757_Soils_and_land_use_in_the_study_of_soil_organic_carbon_in_Colombian_highlands_catena

Loayza, N. V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C. y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 29(2), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>

Lorenz, K., & Lal, R. (2016). *Soil organic carbon – An appropriate indicator to monitor trends of land and soil degradation within the SDG framework?* Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2016-11-30_soil_organic_carbon_as_indicator_final.pdf

Luna, E. O., Cantú, I., Hernández, F. J. y Bejar, S. J. (2023). Efectos del manejo forestal en la emisión de CO₂ de un suelo umbisol en bosques de Durango, México. <https://doi.org/10.18387/polbotanica.56.6>

Madrigal, S., Cristóbal, D., Hernández, E. y Romo, J. E. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(51), 201-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>

Malek, Ž., Douw, B., Van Vliet, J., Van Der Zanden, E. H. & Verburg, P. H. (2019). Local land-use decision-making in a global context. *Environmental Research Letters*, 14(8), 083006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab309e>

Mondragón, V. A., Moreno, F. y Jaramillo, D. F. (2022). Impacto del uso de suelo sobre el secuestro del carbono orgánico en un área natural de Medellín, Colombia. *Acta Agronómica*, 71(1), 39-46. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n1.101342>.

Núñez-Ravelo, F., Ugas-Pérez, M., Calderón-Castellanos, R. y Rivas-Meriño, F. (2021). Cuantificación del carbono orgánico y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, laguna de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 66(1), 371-398. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/13667>

Oliveira, J. G., Da Silva, R. V. y De Oliveira, A. L. (2022). Equivalent carbon dioxide balance in coffee crops. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e25311729966, 2022. <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/29966>.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *Carbono orgánico del suelo, el potencial oculto*.

Ortiz, P. A. (2022). *Cubiertas vegetales de especies nativas en el olivar*. Universidad de Jaén. <https://hdl.handle.net/10953.1/21430>

Pardo-Plaza, Y. J., Paolini, J. E. y Canteiro-Guevara M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista U.D.C.A. Actualidad &*

Divulgación Científica, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2025). *Parque Nacional de Cocuy*. Colombia. <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-andina/parque-nacional-natural-el-cocuy-3/>

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2025). *Parque Nacional de Iguaque*. Colombia. <https://www.parquesnacionales.gov.co/sala-prensa/noticias/el-santuario-de-fauna-y-flora-iguaque-abre-nuevamente-sus-puertas-al-ecoturismo/>

Pérez, H. I. y Rodríguez, D. I. (2019). Secuestro de carbono por el suelo en agroecosistemas tropicales muy secos de la provincia El Oro, Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(2), 125-131. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>

Pérez, I. H., Rodríguez, D. I. y García, B. R. (2021). Secuestro del carbono, por el suelo y sus fracciones en agroecosistemas tropicales de la región costa ecuatoriana. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 141-149. ISSN 2218-3620.

Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O. y Durán-López M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 157-179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>

Pinilla, M. A. y Pareja, J. P. (2023). *Prospektiva sectorial de los servicios ambientales*

para el secuestro de carbono en Colombia 2035. Universidad Externado de Colombia. <https://doi.org/10.57998/bdigital/handle.001.459>

Ramírez, R., Leiva, E. I. y Restrepo, R. F. (2023). Materia orgánica particulada y mineralogía de un Andisol bajo labranza y barbecho. *Acta Agronómica*, 70(4), <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.80861>

Ramos, E. G., Ley, E., Arce, C., Escobar, J., Aryal, D., Pinto, R., Guevara, F. y Guevara, M. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000500671

Romero, J., Aguilar-Ávila, J., Santoyo, V. H. y Diakite, L. (2023). Transiciones del cambio de uso de suelo en el estado de Puebla (1980-2016). *Investigaciones Geográficas*, 109. <https://doi.org/10.14350/rig.60621>

Ruiz, B. A., Hernández, E., Salcedo, E., Rodríguez, R., Gallegos, A., Valdés, E. y Sánchez, R. (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectonagrandis* L.f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13874>

Rumpel, C., Amiraslani, F., Chenu, C., García Cárdenas, M., Kaonga, M., Koutika, L. S. y Wollenberg, E. (2020). La iniciativa 4p1000: Oportunidades, limitaciones y desafíos para implementar el secuestro de carbono orgánico del suelo como es-

trategia de desarrollo sostenible. *Ambio*, 49(1), 350-360. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>

Secretaría de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) & Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos (GTIS). (2016). *GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/0e9e-6885-076e-4ff1-92fb-787449f11094/download>

Solano, D. J. (2019). *Variación en la captura de carbono en Ceiba pentandra y Albizia saman según el grado de intervención, municipio Santiago de Cali (Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/0cc2c365-b2ef-4abf-8712-c3a1c5f95c1d>

Somoza, A., & Vazquez, P. S. (2022). Spatio-temporal variation of the organic carbon stock and its relationship with changes in land use. Tandil department, Austral Pampean Region, Argentina. *Revista Geográfica De América Central.*, 1(70), 477-541. <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.18>

Tfaily, M. M., Chu, R. K., Toyoda, J., Tolić, N., Robinson, E. W., Paša-Tolić, L., & Hess, N. J. (2017). Sequential extraction protocol for organic matter from soils and sediments using high resolution mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 972, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.03.031>

Toledo, A. T. y Lazo, R. S. (2021). Captura de carbono en la especie *Tillandsia erder-*

mannii Y Tillandsia purpurea en las lomas arrojadero situada entre los distritos de Inclán y Locumba, Tacna. *Ingeniería Investiga*, 3(2). <https://doi.org/10.47796/ing.v3i2.537>

Universidad Nacional de Colombia. (2022).

Proyecto 1001 caracterización del suelo y formulación de alternativas para la restauración de coberturas y uso sostenible. <https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/1.%20Informe%20Final%20Actividad%20008%20-%20Pr%C3%A1cticas%20-%20Vigen-cia%202021.pdf>

Vargas, C. A., González, J. M. y Rueda, M. A. (2022). Evaluación ambiental en el escenario actual y con bonos de carbono: páramo La Cortadera, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 27(1), 125-145. <https://doi.org/10.19053/01233769.11953>

Vargas-Larreta, B., Amezcua, M., López-Martínez, J. O., Cueto-Wong, A., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A. y Aguirre-Calderón, C. G. (2023). Estimación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Bot. Sci.*, 101(1). <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>

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>

Walteros-Torres, I., Palacios-Pacheco, S., Cely, G. E, Serrano, P. A. y 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). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/ru-dca.v25.n2.2022.1846>

Winter S, Bauer T, Strauss P, et al. Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: A meta-analysis. *J Appl Ecol.* 2018; 55: 2484–2495. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13124>

Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo, A. y Navarro, A. (2020). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 9(8). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>

■ **Conflictos de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 06-02-2025
Fecha de aceptado: 03-06-2025
DOI: 10.22490/21456453.9131

DINÁMICA TEMPORAL DE LOS HÁBITOS TRÓFICOS E INCIDENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN BAGRES (ARIIDAE) EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA, PACÍFICO COLOMBIANO

TEMPORAL DYNAMICS OF TROPHIC HABITS AND MICROPLASTIC INCIDENCE IN CATFISH (ARIIDAE) IN THE BAY OF BUENAVENTURA, COLOMBIAN PACIFIC

Vivas-Sánchez, José ¹

Gamboa-García, Diego ²

Duque, Guillermo ³

Citación: Vivas-Sánchez, J., Gamboa-García, D., Duque, G. (2026). Dinámica temporal de los hábitos tróficos e incidencia de microplásticos en bagres (Ariidae) en la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 221 - 242. <https://doi.org/10.22490/21456453.9131>

¹ Maestría en ingeniería ambiental, grupo de Investigación en Ecología y Contaminación acuática, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Colombia. jvivass@unal.edu.co

² Doctorado en Ciencias Agrarias, grupo de Investigación en Ecología y Contaminación acuática, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Colombia. degamboag@unal.edu.co

³ Profesor titular, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Colombia. duquen@unal.edu.co

RESUMEN

Contextualización: La bahía de Buenaventura evidencia contaminación por microplásticos, por lo que este contaminante está disponible para interactuar con peces como los bagres, de los que dependen las comunidades locales como fuente de ingreso y subsistencia.

Vacío de conocimiento: En la bahía de Buenaventura no se ha profundizado sobre los cambios en la alimentación e incidencia de microplásticos generados por las variaciones temporales.

Propósito: El objetivo de este estudio fue determinar las variaciones temporales en la ecología trófica e incidencia de microplásticos en cuatro especies de bagres.

Metodología: Se realizaron cuatro muestreos en diferentes épocas y áreas del estuario. Se tomaron mediciones de los parámetros fisicoquímicos del agua y se recolectaron muestras de peces mediante tres artes de pesca artesanal: línea de anzuelo, red de arrastre y trasmallo. Se analizó el contenido estomacal y se detectó la presencia de microplásticos.

Resultados y conclusiones: Se encontró que los crustáceos fueron una presa de

consumo constante para todas las especies, mientras que los detritos solo para *C. multiradiatus* y *N. troschelli*. Adicionalmente para las cachimalias *C. multiradiatus* y *C. manglarensis* se observó una correlación positiva entre la ingesta de crustáceos y la salinidad, asociado a condiciones más marinas, las cuales favorecen la abundancia y diversidad de crustáceos. Mientras que para *B. panamensis* se halló una correlación negativa entre el consumo de crustáceos con la salinidad y la transparencia, sugiriendo que se alimenta principalmente en la zona interna del estuario para reducir la competencia por recursos. Se presentó ingesta de microplásticos en las cuatro especies: *B. panamensis* (13 %), *N. troschelii* (11 %), *C. multiradiatus* (10 %) y *C. manglarensis* (9 %), los ejemplares juveniles presentaron las mayores ingestas durante la temporada seca ($0,2 \pm 0,1$ partículas por individuo), mientras que, en los adultos, fue mayor durante la temporada de lluvias ($0,4 \pm 0,1$ partículas por individuo). Estos resultados plantean una creciente preocupación por la sostenibilidad pesquera de la región Pacífica.

Palabras clave: contaminante emergente, ecología trófica, estuario, microplásticos, pesca artesanal.

ABSTRACT

Contextualization: The bay of Buenaventura shows evidence of microplastic pollution, which makes this contaminant available to interact with fish such as catfish, on which local communities depend as a source of income and livelihood.

Knowledge gap: In the bay of Buenaventura, little has been explored regarding the changes in feeding habits and the incidence of microplastics caused by temporal variations.

Purpose: The objective of this study was to determine the temporal variations in trophic ecology and microplastic incidence in four species of catfish.

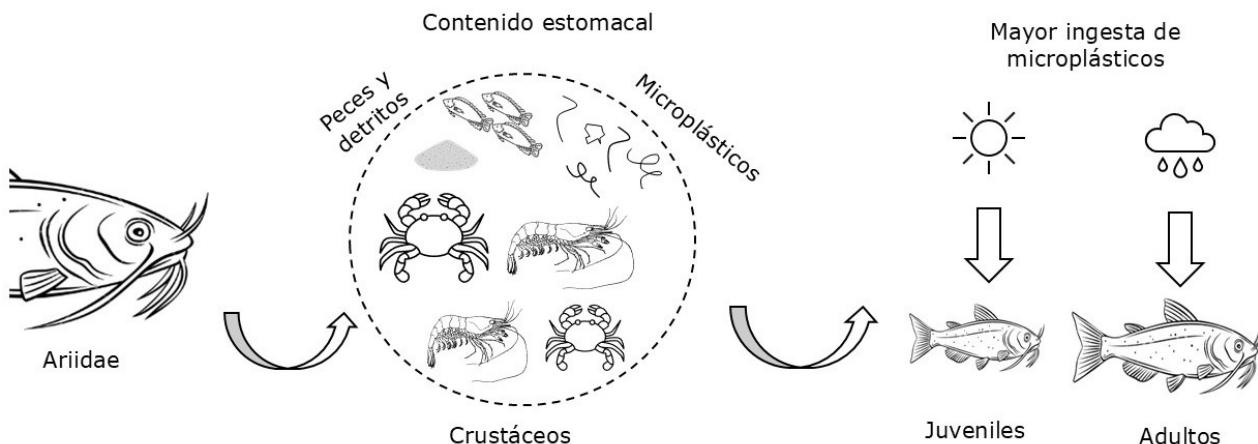
Methodology: Four samplings were carried out at different times and in different areas of the estuary. Measurements of the water's physicochemical parameters were taken, and fish samples were collected using three types of artisanal fishing gear: handline, trawl net and gillnet. Stomach content was analysed and the presence of microplastics was detected.

Results and conclusions: It was found that crustaceans were constant prey for all species, while detritus was only consumed

by *C. multiradiatus* and *N. troschelli*. Additionally, for the species *C. multiradiatus* and *C. manglarensis*, a positive correlation was observed between the ingestion of crustaceans and salinity, which is associated with more marine conditions that favor the abundance and diversity of crustaceans. In contrast, for *B. panamensis*, a negative correlation was found between crustacean consumption and salinity and transparency, suggesting that it mainly feeds in the inner estuary zone to reduce competition for resources. Microplastic ingestion was observed in all four species: *B. panamensis* (13%), *N. troschelli* (11%), *C. multiradiatus* (10%), and *C. manglarensis* (9%). Juveniles showed the highest ingestion during the dry season (0.2 ± 0.1 particles per individual), while adults showed higher ingestion during the rainy season (0.4 ± 0.1 particles per individual). These results raise growing concerns about the sustainability of fishing in the Pacific region

Keywords: Artisanal fishing, emerging contaminant, estuary, microplastics, trophic ecology.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: elaboración propia.

1 INTRODUCCIÓN

Los estuarios son zonas de convergencia entre los sistemas marinos y de agua dulce (Ferreira et al., 2019). Estos ecosistemas se caracterizan por una alta productividad biológica, ya que son zonas de asentamiento, alimentación, refugio y cría de diversas especies durante variadas etapas de sus ciclos de vida (Barletta et al., 2019; Lima et al., 2015). Sin embargo, impactos antrópicos como la escorrentía urbana, las actividades pesqueras o la disposición directa de residuos sólidos en las zonas costeras han afectado estos ecosistemas, permitiendo el ingreso de diversos contaminantes, entre los cuales se destacan los microplásticos (Barletta et al., 2019).

Los microplásticos son partículas plásticas con un tamaño inferior a 5 mm, estos se producen de forma intencional (primaria), o por medio de la fragmentación del macroplástico (secundarios) (Zhou et al., 2023).

Los microplásticos tienden a presentar concentraciones más altas en ambientes semicerrados como los estuarios. Adicionalmente, la presencia generalizada de microplásticos en cantidades comparables a las de las presas naturales en los estuarios a menudo da como resultado una mayor posibilidad de interacciones con organismos, principalmente a través de la ingestión (Barletta et al., 2019).

La ingestión incidental de microplásticos puede generar diversas afectaciones a los peces, como anomalías morfológicas, estrés oxidativo y fisiológico, reducción de las actividades enzimáticas, reducción en la tasa de crecimiento, complicaciones reproductivas, obstrucciones internas y daños en el tracto digestivo (Baalkhuyur et al., 2018; Sutton et al., 2016). Además, se ha registrado que la presencia de microplásticos en el tracto gastrointestinal puede generar efectos negati-

vos asociados con los aditivos incorporados durante su fabricación o los contaminantes ambientales absorbidos por los plásticos en el transcurso del tiempo (Rochman et al., 2013). Los microplásticos, al no ser biodegradables, pueden transferirse a través de las redes tróficas (Reisser et al., 2014), por lo que los depredadores superiores pueden tener un mayor riesgo de incidencia, tanto por la ingestión directa como por la transferencia trófica de una presa previamente contaminada (Ferreira et al., 2019).

La familia Ariidae, o llamados comúnmente bagres marinos, son peces que viven en aguas marinas, salobres y dulces de las regiones tropicales y templadas. Las especies del Pacífico centro-oriental varían en longitud desde 28 cm hasta más de 90 cm en su talla máxima. La mayoría de ellas están confinadas a áreas marino-costeras, pero unas pocas se encuentran en aguas dulces de ríos y lagos. Son abundantes en áreas de manglares y grandes estuarios de río de aguas turbias (Fischer et al., 1995a). Su dieta varía desde omnívora hasta muy especializada; ejemplares de gran tamaño pueden llegar a consumir exclusivamente grandes crustáceos y teleósteos (Muro, 2011). Los bagres son apreciados por sus ventajas relacionadas

con su gran valor comercial, talla, abundancia, crecimiento rápido y la calidad de su carne (Agencia UNAL, 2021; Tenorio, 2011).

La bahía de Buenaventura presenta diversas fuentes de contaminación como los vertimientos de aguas residuales doméstica e industriales, la resuspensión de sedimentos durante el dragado (Duque et al., 2025; Reyes-Rojas et al., 2023), la inadecuada disposición de residuos sólidos y las actividades pesqueras, las cuales en conjunto con las diversas interacciones de las aguas estuarinas, la descarga de los ríos, los vientos y las precipitaciones frecuentes contribuyen a la dispersión y acumulación de los microplásticos en determinados compartimientos ambientales (Giraldo, 2017; Pichler et al., 2015;; Sánchez-Giraldo et al., 2025; Vásquez-Molano et al., 2021; Vidal et al., 2021), los cuales pueden llegar directamente a incidir sobre los peces comerciales, de los que dependen las comunidades locales como fuente de ingresos y subsistencia. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo determinar las variaciones temporales en la ecología trófica e incidencia de microplásticos en cuatro especies de bagres de la familia Ariidae en la bahía de Buenaventura.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La bahía de Buenaventura está localizada sobre el litoral Pacífico colombiano, entre las latitudes 3° 44' N y 3° 56' y longitudes 77° 01' W y 77° 20 W (Figura 1). La bahía tiene una extensión de 30 km, con una forma angosta

y alargada, cuyo ancho varía entre 3,4 km en la zona externa y 5,5 km en la zona interna (Otero Díaz, 2005). El clima del Pacífico colombiano está altamente influenciado por la zona de convergencia intertropical y la proximidad a la cordillera de los Andes, resultando ser una de las regiones más húme-

das del mundo, con una precipitación media anual aproximada de 6238 mm. Por un lado, la bahía presenta dos picos de precipitación, uno menor en abril-mayo y el principal en septiembre-noviembre, por otro lado, presenta dos períodos de menores precipitaciones o épocas “secas”, en junio-agosto y el principal en diciembre-marzo (Lobo-Guerrero, 1993). Por otra parte, la temperatura promedio anual oscila entre 25 y 27 °C y la humedad relativa entre 80 % y 90 % (Trojer, 2017).

En esta investigación, la bahía de Buenaventura se dividió en dos áreas: la bahía

externa (EE) que es influenciada permanentemente por la acción del mar, debido a su conexión directa con el mismo, y la bahía interna (EI) que presenta la afluencia del río Dagua ($66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y Anchicaya ($98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), los cuales aportan entre el 8 % y el 16 % del caudal mareal (Duque et al., 2025; Giraldo, 2017). En este estudio, las estaciones de muestreos se distribuyeron de la siguiente forma: dos estaciones en el área interna (A1 y A2), así como dos en el área externa (A3 y A4), cada una con tres réplicas por muestreo (Figura 1).

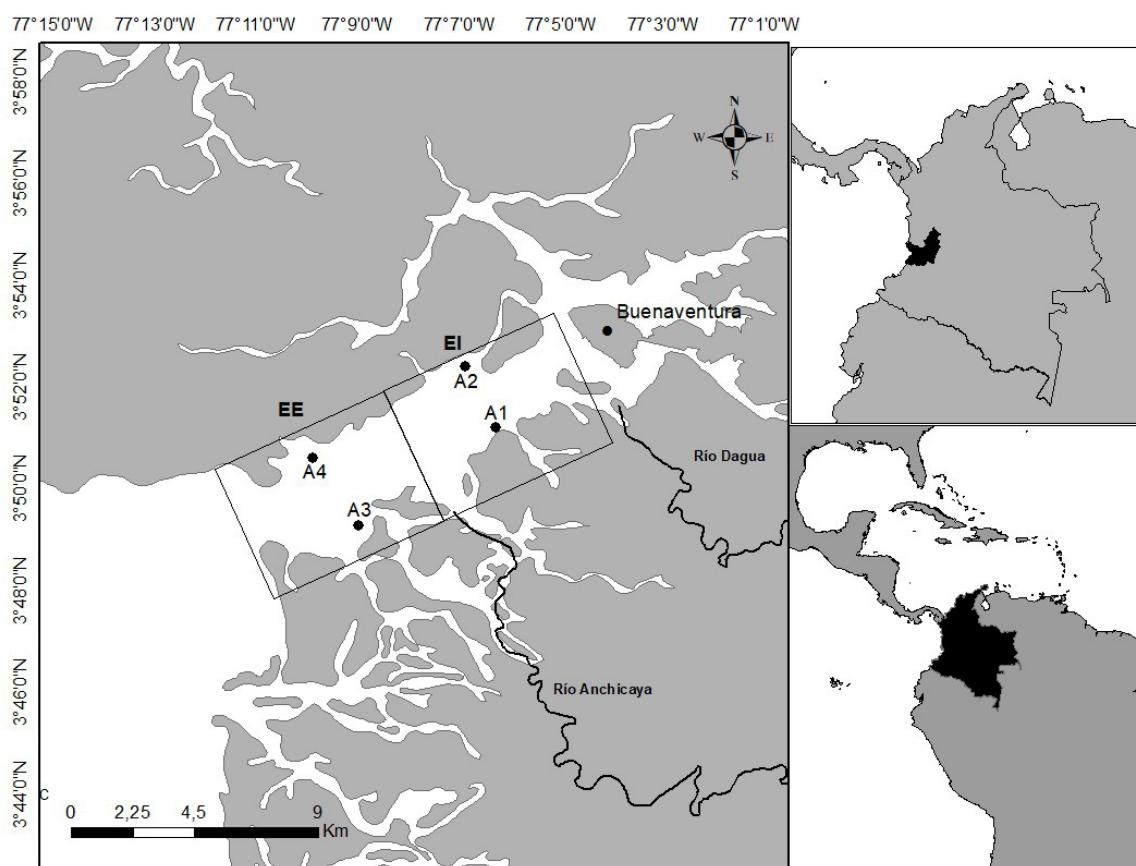


Figura 1. Bahía de Buenaventura: zona de estudio y estaciones de muestreo

Fuente: elaboración propia.

Fase de campo

Se realizó un total de cuatro muestreos entre el 2020 y el 2021, dos en el periodo lluvioso (octubre) y dos en el periodo seco (marzo-abril), en cuatro estaciones de la bahía de Buenaventura (Figura 1). En cada estación se midieron por triplicado los parámetros ambientales del agua: oxígeno disuelto (mg/L), salinidad (ups) y temperatura (°C) con una sonda multiparamétrica (Thermo Scientific Orion Five Stars) y, de igual forma, la transparencia (cm), con un disco Secchi.

Adicionalmente, se capturaron muestras de peces en cada estación mediante tres artes de pesca artesanal: línea de anzuelo o palangre de fondo, red de arrastres o changa y trasmallo. Para la línea de anzuelo se utilizó un anzuelo N.º 10 (36 mm), con un tiempo efectivo de pesca de 30 a 45 minutos, con un total de 600 anzuelos. La red de arrastres con un tamaño de ojo de red de 2,54 cm, con un tiempo efectivo de pesca de 10 minutos. El trasmallo tenía un ojo de red de 5 cm, con un tiempo efectivo de pesca de 30 a 60 minutos. Los peces capturados fueron separados según la estación y arte de pesca al cual pertenecían, posteriormente fueron almacenados en neveras con hielo para ser transportados al laboratorio.

Fase de laboratorio

Los peces recolectados fueron identificados taxonómicamente, utilizando las claves de identificación de la FAO (Fischer et al., 1995b), las bases de datos de Fishbase (Froese & Pauly, 2022) y del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (Robertson et al., 2024), así como revisión bibliográfica. Posteriormente, cada individuo fue medido

para obtener la longitud estándar y total, de igual forma, se pesaron. Después se diseccionaron los peces y se les extrajo el estómago, que fue conservado en formol al 4 %. Seguidamente, el contenido estomacal fue observado en un estereoscopio, los ítems alimentarios fueron clasificados en las siguientes categorías: crustáceos, peces, moluscos, detritos, anélidos, microplásticos y material digerido. Estos ítems se secaron en el horno a 70 °C durante 24 horas y posteriormente se contabilizaron y pesaron en una balanza analítica (precisión 0,0001 g) (Majdi et al., 2018).

Adicionalmente, para mejorar la precisión en el conteo de los microplásticos, se realizó una prueba de resistencia térmica. Esta consistió en aplicar calor directamente sobre las partículas mediante una aguja caliente o un cautín de punta fina, exponiéndolas a una temperatura de aproximadamente 130°C durante 3 a 5 segundos. Las partículas que se fundieron, deformaron o rizaban al contacto con la fuente de calor fueron clasificadas como microplásticos. Se ha reportado que esta prueba permite una correcta detección de microplásticos en más del 82 % de los casos (Babaei et al., 2024; Prata et al., 2024). De igual manera, se tomaron medidas de control de calidad para evitar la contaminación cruzada de microplásticos: se conservaron limpios los espacios de trabajo, todos los equipos de muestreo y laboratorio se lavaron con agua destilada previo a su uso, las muestras permanecieron selladas durante todo el procesamiento, se utilizó bata de laboratorio y guantes de nitrilo y, finalmente, se instalaron tres blancos (cajas Petri abiertas) para evidenciar las partículas de contaminación cruzada (Garcés-Ordóñez et al., 2022).

Tratamiento de datos

Los hábitos tróficos fueron determinados mediante los siguientes índices tróficos (Co-

gua et al., 2013; Duque y Acero, 2003; García-Cardona et al., 2021; Tafurt et al., 2021; Vivas-Sánchez et al., 2023):

- Composición numérica (CN):

$$CN = 100 * \frac{\text{Número de presas del ítem } i}{\text{Número total de presas}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

- Composición gravimétrica (CG):

$$CG = 100 * \frac{\text{Peso de las presas del ítem } i}{\text{Peso de todas las presas}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

- Frecuencia de ocurrencia de presas (FO). Clasifica las presas en: constantes (presentes en más del 50 % de las muestras), accesorias (entre 50 % y 25 %) y accidental (inferior al 25 %).

$$FO = 100 * \frac{\text{Ocurrencias de presas del ítem } i}{\text{Número total de estómagos con alimento}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

- Índice de importancia relativa (IIR). Clasifica la importancia de las presas en: altas (100 % - 40 %), secundarias (40 % - 10 %) y bajas (0 % - 10 %).

$$IIR = FO * CG \quad (4) \quad (\text{Ecuación 4})$$

- Coeficiente de vacuidad

$$CV = 100 * \frac{\text{Número de estómagos vacíos}}{\text{Número total de estómagos analizados}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Las diferencias temporales entre los hábitos tróficos se realizaron inicialmente con un análisis de escalamiento multidimensional no paramétrico (nMDS) transformando los datos (raíz cuadrada) y utilizando matrices de similaridad de Bray-Curtis para establecer asociaciones entre la dieta de las especies. De igual forma, para detectar diferencias entre las presas, se hizo un análisis de varianza

multivariante permutacional (permANOVAs), utilizando 9999 permutaciones, con $p < 0,05$ como diferencia significativa. Con el fin de relacionar los hábitos tróficos con la dinámica ambiental, se realizaron correlaciones de Spearman entre cada ítem alimentario con los parámetros fisicoquímicos del agua para cada especie. Los microplásticos encontrados fueron contabilizados y descri-

tos (tipo y color), se determinó la ingesta para cada especie (Ecuación 6); de igual forma, se analizó su presencia para cada especie entre

épocas y estado ontogénico, para esto se utilizó la talla da madurez teórica.

$$\text{Ingesta de microplásticos} = \frac{\text{Número de items plásticos}}{\text{Número total de peces}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Se capturaron un total de 244 individuos pertenecientes a cuatro especies: *Cathorops multiradiatus* (n=89), *Cathorops mangarensis* (n=60), *Bagre panamensis* (n=48) y *Notarius troschelii* (n=47). Por un lado, se encontró que para el barbinche (*B. panamensis*) y el ñato (*N. troschelii*) los crustáceos fueron un ítem alimentario de consumo constante y alta importancia (Tabla 1), adicionalmente, los peces fueron de consumo e importancia secundaria. Además, en el

caso del ñato, este consumió detritos de forma constante (FO = 52,27 %). Por otro lado, para las cachimalas *C. multiradiatus* y *C. mangarensis* los crustáceos fueron de consumo constante e importancia secundaria, además, los peces y moluscos fueron consumidos de forma accesoria. Adicionalmente, para *C. multiradiatus* se presentó consumo constante de detritos (FO = 64,94 %), los cuales representaron un ítem alimenticio de importancia secundaria (IIR = 11,41 %) al igual que los peces (IIR = 14,25 %).

Tabla 1.

Índices tróficos por especie

Categorías	<i>C. multiradiatus</i> (n=89)			<i>C. mangarensis</i> (n=60)			<i>B. panamensis</i> (n=48)			<i>N. troschelii</i> (n=47)		
	FO	IIR	CV	FO	IIR	CV	FO	IIR	CV	FO	IIR	CV
Crustáceos	55,8	21,9	13,5	69,6	38	23,3	75,6	45,7	14,6	90,9	60,8	6,4
Peces	46,8	14,3		47,8	7,8		46,3	11,2		47,7	11,2	
Moluscos	29,9	2,7		39,1	6,7		7,3	0,1		2,3	0	
Detritos	64,9	11,4		41,3	4,5		31,7	3,7		52,3	4,7	
Anélidos	7,8	0,2	13,5	2,2	0	23,3	2,4	0	14,6	9,1	0	6,4
Microplásticos	10,4	0,1		8,7	0,1		14,6	0,4		11,4	0	

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la asociación de la dieta de las especies entre épocas, se observó que los crustáceos, peces y detritos fueron las presas con mayor contribución a la dieta de las cuatro especies de bagres (Figura 2). Adicionalmente, con un 80 % de similitud *B. panamensis* y *N. troschelli* compartieron nicho alimentario en ambas temporadas (lluvia y seca), caracterizados por un elevado consumo de crustáceos, de igual forma, *N. troschelli* con una similitud de 90 % conservó su nicho alimentario en ambas épocas, compuesto por el consumo de crustáceos, peces y detritos.

Por otro lado, con un 80 % de similitud *C. multiradiatus* en ambas épocas y *C. manglarensis* en temporada seca compartieron nicho alimentario, conformado por el consumo de crustáceos, detritos y en menor medida peces (Figura 2), de forma similar, *C. multiradiatus* en ambas épocas conservó su nicho alimentario con un 90 % de similitud, caracterizado por un elevado consumo de detritos, peces y crustáceos. En contraste, *C. manglarensis* en temporada lluviosa presentó un nicho diferenciado de las demás especies al estar compuesto por un elevado consumo de moluscos.

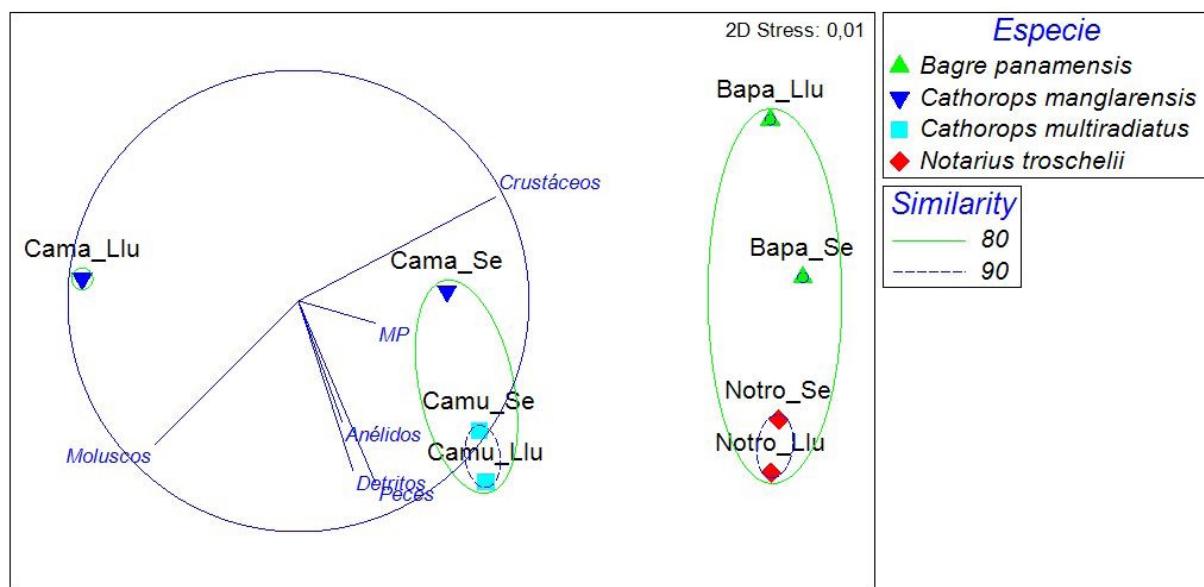


Figura 2. Análisis nMDS de la dieta de *B. panamensis* (Bapa), *C. manglarensis* (Cama), *C. multiradiatus* (Camu) y *N. troschelii* (Notro) en ambas épocas. En la figura, las especies se nombran con las dos primeras letras del género y la especie, así como la época (Llu= Lluvia; Se= Seca)

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las diferencias temporales en las presas se encontró que *C. multiradiatus*

presentó diferencias significativas (p (PERM) $< 0,05$) en el consumo de crustáceos, siendo

mayor en temporada seca ($5,39 \pm 1,51$ mg) (Tabla 2). En el caso de *C. manglarensis*, presentó significativamente mayor consumo de

crustáceos ($4,93 \pm 0,99$ mg) y peces ($3,05 \pm 2,07$ mg) en temporada seca.

Tabla 2.

Consumo promedio de ítems alimentarios por época para cada especie

n	Crustáceos (mg)	Peces (mg)	Moluscos (mg)	Detritos (mg)	Anélidos (mg)	MP (mg)	
<i>C. multiradiatus</i>							
Lluvia	42	$4,82 \pm 1,49$ b	$5,40 \pm 2,31$	$1,62 \pm 1,06$	$6,39 \pm 3,75$	$0,05 \pm 0,05$	$0,01 \pm 0,01$
Seca	35	$5,39 \pm 1,51$ a	$3,44 \pm 2,32$	$0,90 \pm 0,38$	$3,89 \pm 2,71$	$0,27 \pm 0,23$	$0,01 \pm 0,01$
<i>C. manglarensis</i>							
Lluvia	22	$1,52 \pm 0,74$ b	$0,41 \pm 0,32$ b	$0,50 \pm 0,31$	$0,28 \pm 0,15$		
Seca	24	$4,93 \pm 0,99$ a	$3,05 \pm 2,07$ a	$0,66 \pm 0,34$	$0,46 \pm 0,23$		$0,05 \pm 0,04$
<i>B. panamensis</i>							
Lluvia	7	$14,61 \pm 8,03$	$2,67 \pm 2,29$				
Seca	34	$15,71 \pm 5,37$	$2,11 \pm 0,89$	$0,01 \pm 0,01$	$2,18 \pm 1,57$	$0,03 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,15$
<i>N. trochelii</i>							
Lluvia	29	$10,73 \pm 2,84$	$10,27 \pm 4,55$	$0,15 \pm 0,15$	$2,06 \pm 1,27$		$0,04 \pm 0,03$
Seca	15	$12,62 \pm 4,58$	$7,63 \pm 4,38$		$3,40 \pm 3,10$		

Nota: Los valores se presentan como promedio \pm error estándar. Las diferencias significativas se denominaron con letras ordenadas alfabéticamente, siendo el mayor valor a.

Fuente: elaboración propia.

Relación entre los hábitos tróficos y la dinámica ambiental

Se encontró que *C. multiradiatus* presentó una correlación significativa ($p < 0,05$) positiva entre el consumo de crustáceos con el oxígeno disuelto, la salinidad y transparen-

cia (Tabla 3); adicionalmente, el consumo de moluscos se correlacionó positivamente con la salinidad y el consumo de detritos con la temperatura, mientras que el consumo de peces se correlacionó negativamente con la salinidad.

En el caso de *C. manglarensis*, el consumo de crustáceos se correlacionó positivamente

con la salinidad y el consumo de moluscos con la temperatura. Mientras que el consumo de moluscos también se correlacionó negativamente con la transparencia. Por otro lado, en *B. panamensis*, el consumo de

crustáceos se correlacionó negativamente con la salinidad y la transparencia, mientras que el consumo de moluscos se correlacionó positivamente con la temperatura.

Tabla 3.

Correlaciones por rango de Spearman entre los ítems alimentarios y las variables ambientales del agua

	Ítems alimentarios	Oxígeno disuelto	Salinidad	Temperatura	Transparencia
<i>C. multiradiatus</i>	Crustáceos	0,29 *	0,26 *	-0,22	0,31 **
	Peces	-0,14	-0,28 *	0,12	-0,09
	Moluscos	0,13	0,29 **	-0,02	-0,01
	Detritos	-0,15	0,05	0,23 *	-0,07
	Anélidos	-0,10	-0,15	-0,07	0,02
	Microplásticos	-0,09	0,04	-0,02	-0,01
<i>C. manglarensis</i>	Crustáceos	-0,18	0,49 ***	0,04	-0,04
	Peces	-0,01	-0,14	0,08	-0,11
	Moluscos	-0,28	-0,02	0,36 *	-0,37 *
	Detritos	0	0,12	-0,13	0,13
	Anélidos	-0,01	0,05	-0,24	0,19
	Microplásticos	0,25	-0,08	-0,29	0,29
<i>B. panamensis</i>	Crustáceos	0,23	-0,42 **	0,21	-0,38 *
	Peces	-0,08	0,02	-0,14	0,20
	Moluscos	-0,28	0,18	0,35 *	-0,18
	Detritos	-0,24	0,06	0,05	-0,09
	Anélidos	0,07	-0,10	-0,06	0,06
	Microplásticos	-0,18	0,22	0,24	0,10

Nota: $P < 0,05^*$; $P < 0,01^{**}$; $P < 0,001^{***}$.

Fuente: elaboración propia.

Ingesta de microplásticos

En general, todas las especies presentaron ingesta de microplásticos, siendo *B. panamensis* la que mostró el mayor consumo (13 %), seguida de *N. troschelii* (11 %), *C. multiradiatus* (10 %) y *C. manglarensis* (9 %). Las

fibras fueron la forma de microplástico más común, representando el 91 % de los casos, mientras que los fragmentos constituyeron el 9 %. En cuanto a los colores, el transparente fue el más frecuente (61 %), seguido por el azul (13 %), blanco (13 %), rojo (9 %) y negro (4 %) (Figura 3).

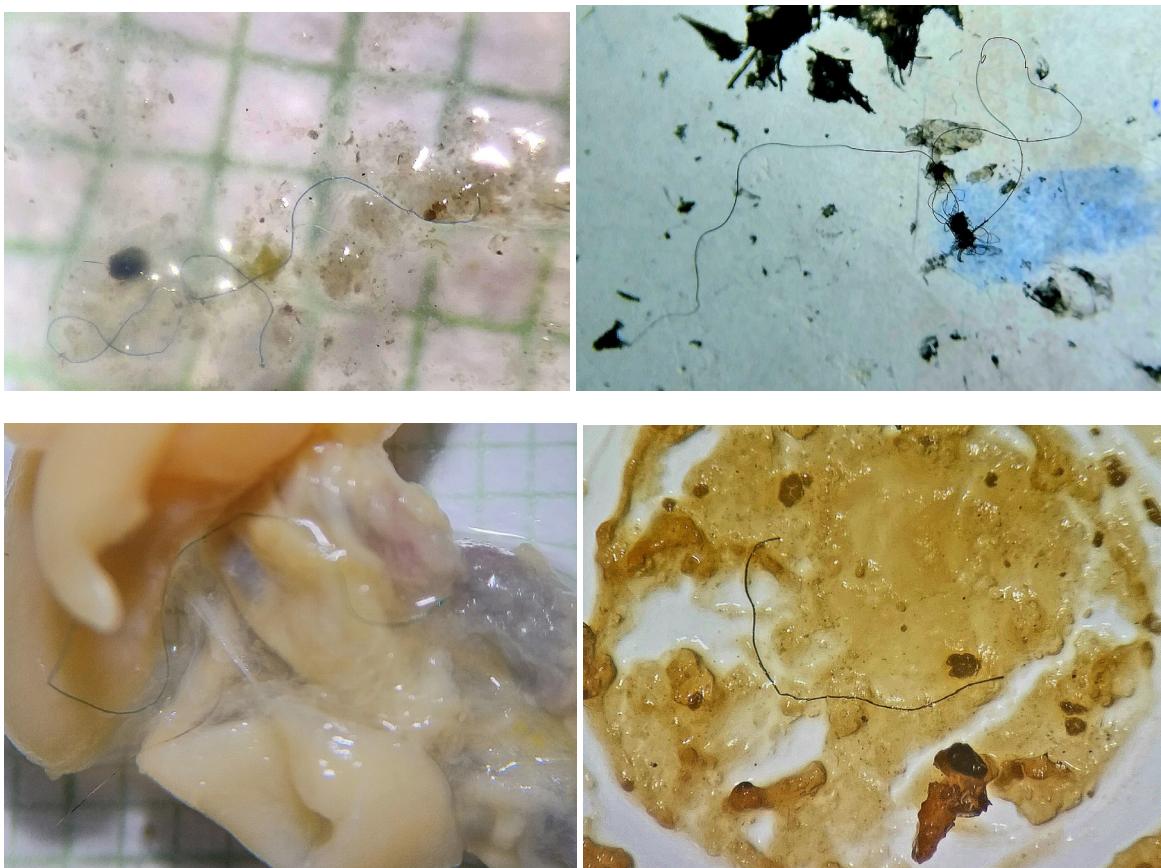


Figura 3. Fibras plásticas asociadas al contenido estomacal

Fuente: elaboración propia.

En relación con las variaciones temporales y ontogénicas, los individuos adultos presentaron una mayor ingesta de microplásticos ($0,24 \pm 0,13$ partículas por individuo), en comparación con los juveniles ($0,08 \pm 0,06$ partículas por individuo). Además, en los adultos, la ingesta fue mayor durante la tem-

porada de lluvia ($0,25 \pm 0,15$ partículas por individuo), mientras que en los individuos juveniles fue mayor durante la temporada seca ($0,11 \pm 0,08$ partículas por individuo). Para *B. panamensis* y *C. manglarensis*, solo se registró ingesta en individuos juveniles (Tabla 4).

En el caso de *B. panamensis*, los juveniles presentaron mayor ingesta en la temporada de lluvia ($0,43 \pm 0,43$ partículas por individuo), mientras que para los juveniles de *C. manglarensis* el consumo de microplásticos fue más alto en la temporada seca ($0,30 \pm 0,17$ partículas por individuo). En *C. multiradiatus* y *N. troschelii*, se observó ingesta tanto en juveniles como en adultos. Para *C. multiradiatus*, la ingesta en adultos fue simi-

lar en ambas temporadas ($0,25-0,28$ partículas por individuo), y en los juveniles solo se presentó en la temporada seca ($0,10 \pm 0,05$ partículas por individuo). Por su parte, en *N. troschelii*, los adultos mostraron ingesta únicamente en la temporada de lluvia ($0,63 \pm 0,41$ partículas por individuo), mientras que los juveniles presentaron una mayor ingesta en la temporada seca ($0,21 \pm 0,21$ partículas por individuo).

Tabla 4.

Ingesta de microplástico entre épocas y estado ontogénico

	<i>B. panamensis</i>	<i>C. manglarensis</i>	<i>C. multiradiatus</i>	<i>N. troschelii</i>
Lluvia				
Adulto			$0,28 \pm 0,12$	$0,63 \pm 0,41$
Juvenil	$0,43 \pm 0,43$	$0,05 \pm 0,05$		$0,10 \pm 0,10$
Seca				
Adulto			$0,25 \pm 0,25$	
Juvenil	$0,18 \pm 0,09$	$0,30 \pm 0,17$	$0,10 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,21$
General	$0,22 \pm 0,13$	$0,17 \pm 0,12$	$0,12 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,15$

Nota: Los datos están expresados en partículas por individuo \pm error estándar.

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Dinámica temporal de los hábitos tróficos

De forma general, en la temporada seca, los crustáceos fueron de consumo constante para todas las especies, así como un ítem alimenticio de alta importancia. Esta temporada se caracterizó por presentar con-

centraciones de salinidad, oxígeno disuelto y transparencia más elevadas. De igual forma, para *C. multiradiatus* y *C. manglarensis* se encontraron diferencias significativas en el consumo de crustáceos, siendo mayor en temporada seca, así como correlaciones positivas entre el consumo de crustáceos y la salinidad. Por lo tanto, el aumento en el

consumo de crustáceos puede estar relacionado con una mayor abundancia de esta presa en la temporada seca, ya que el aumento en la salinidad favorece la riqueza, presencia y abundancia de macroinvertebrados (Gamboa-García et al., 2018; Salcedo, 2022; Vivas-Sánchez et al., 2023). De igual forma, se ha detectado que en las épocas de menor precipitación los macroinvertebrados se movilizan desde las zonas de guardería hacia las zonas con condiciones más marinas (Gamboa-García et al., 2018) y, por ende, se traduce en una mayor disponibilidad de macroinvertebrados apetecibles por los peces.

En el caso del *B. panamensis* en este estudio se observó que consume principalmente crustáceos y peces, lo cual está acorde con los resultados de Muro-Torres et al. (2018) sobre la ecología trófica de *B. panamensis*, el cual reportó que es una especie generalista con preferencia por los peces demersales y crustáceos bentónicos, de igual forma, no se encontró diferencias en la dieta según la época. Por otro lado, en este estudio en la dieta de *B. panamensis* se encontró una correlación negativa entre el consumo de crustáceos con la salinidad y la transparencia, es decir, a menor salinidad y transparencia, mayor consumo de crustáceos. Esto sugiere que *B. panamensis* se alimentó principalmente de crustáceos en las zonas internas del estuario caracterizado por una mayor contribución de agua dulce por la descarga de los ríos. Esto puede deberse a una estrategia para reducir la competencia por los recursos alimentarios, además, pese a ser una especie adaptada para depredar, tanto en ambientes estuarinos como mari-

nos, los adultos prefieren hábitats más estuarinos (Muro-Torres et al., 2018).

Ingesta de microplásticos

En el Pacífico colombiano se ha evidenciado la presencia de microplásticos en diferentes compartimientos ambientales como el agua (Arboleda et al., 2024; Vidal et al., 2021) y el sedimento (Martínez Martínez et al., 2024; Vásquez-Molano et al., 2021), de igual forma, se ha detectado la presencia de microplásticos en peces de la familia Ariidae, Sciaenidae y Achiridae (Cañón et al., 2024; Herrera et al., 2025; Tafurt et al., 2021; Vivas-Sánchez et al., 2023).

En este estudio, para la mayoría de especies se encontró una mayor incidencia de microplásticos en ejemplares juveniles en temporada seca, esto puede ser causado, por un lado, debido a la ecoclina estuarina que retiene microplásticos en la estación seca, mientras que en la época lluviosa se convierte en un exportador de microplásticos a los diferentes medios marinos (Barletta et al., 2019) y, por otro lado, los bagres de pequeños tamaños suelen consumir copépodos o pequeños crustáceos asociados al sedimento de las zonas internas del estuario (Sandoval-Londoño et al., 2017), el cual presenta una mayor acumulación de microplásticos (Vásquez-Molano et al., 2021), por lo que estos peces pueden ser susceptibles de ingerir los microplásticos presentes en el sedimento en su búsqueda de alimento. En el caso de los adultos, las mayores ingestas se presentaron en la temporada de lluvias, esto puede deberse a un mayor ingreso de partículas plásticas por el aumento en la es-

correntía y el caudal de los ríos asociado a la temporada de lluvias (Vidal et al., 2021); adicionalmente, los individuos de tallas más grandes presentan dietas más generalistas (Sandoval-Londoño et al., 2017), por lo cual son más susceptibles a ingerir microplásticos, tanto directamente por sus presas como indirectamente por la disponibilidad ambiental (Ferreira et al., 2019).

La forma de microplástico más común fueron las fibras transparentes, las cuales provienen principalmente de la industria textil, el uso, mantenimiento, desgaste y pérdida de

artes de pesca y las descargas de aguas residuales (Dantas et al., 2020). Adicionalmente, el color más recurrente fue el transparente, aunque no se ha encontrado una relación directa entre el color de los microplásticos y su ingesta, la profundidad y turbidez pueden enmascarar los microplásticos, representando un problema para los peces demerso-pelágicos y demersales, como los de la familia Ariidae, ya que se puede generar ingestión incidental en su búsqueda de alimento, ya que su visión es secundaria a otros sentidos como el olfato (Neto et al., 2020).

4 CONCLUSIONES

En este estudio se determinó que los crustáceos fueron una presa de consumo constante y en la mayoría de los casos, de alta importancia para los bagres evaluados, siendo un recurso alimentario de gran importancia que vincula las redes bentónicas y demersales. En cuanto a las variaciones temporales, no se encontraron cambios en la presa, sin embargo, en la temporada seca se presentó un mayor consumo de crustáceos asociado a mayor abundancia y diversidad de macroinvertebrados. Adicionalmente, de forma menos frecuente se presentó aprovechamiento de otro tipo de presas abundantes en el estuario, según las variaciones estacionales y ambientales, como los peces o detritos.

Se detectó ingestión de microplásticos en 11 % de los ejemplares, en la temporada seca los peces juveniles ingirieron más microplásticos, mientras que en la época de lluvias fue mayor por parte de los adultos, esto asociado a cambios en la disponibilidad ambiental de microplásticos y diferencias en la estrategia de alimentación. Además, el tipo de microplástico más ingerido fueron las fibras transparentes, relacionadas con actividades antrópicas como las redes de pesca. Estos resultados plantean una creciente preocupación al ser estos bagres un recurso pesquero de gran importancia en la costa Pacífica colombiana; de igual forma, se puede ver afectada la sostenibilidad pesquera de la región.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Author 1: Búsqueda y conceptualización bibliográfica, tratamiento y análisis de

datos, metodología, discusión, redacción, revisión y edición final.

Autor 2: Búsqueda y conceptualización bibliográfica, análisis de datos, discusión, redacción, revisión y edición final.

Autor 3: Administrador del proyecto, discusión, revisión y edición de la versión final.

Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación del proyecto “Fortalecimiento a la investigación sobre ecosistemas costeros del Valle del Cauca” có-

digo Hermes 60100, y al grupo de investigación de Ecología y Contaminación Acuática (ECONACUA), de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia a través del proyecto “Fortalecimiento a la investiga-

ción sobre ecosistemas costeros del Valle del Cauca” código Hermes 60100.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Agencia UNAL. (2021). *Reproducción de bagres, una actividad viable y rentable.* <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/>

detalle/reproduccion-de-bagres-una-actividad-viable-y-rentable

Arboleda, I., Molina, A. & Duque, G. (2024). Influencia de las condiciones ambientales sobre la distribución y tipos de microplásticos en aguas superficiales en la bahía de Tumaco, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 53(1), 65-86. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.1.1268>

Baalkhuyur, F. M., Bin Dohaish, E. J. A., El-halwagy, M. E. A., Alikunhi, N. M., Al-Suwailem, A. M., Røstad, A., Coker, D. J., Berumen, M. L. & Duarte, C. M. (2018). Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 407-415. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.04.040>

Babaei, A. A., Reshadatian, N. & Feizi, R. (2024). A state of the art-mini review on the sources, contamination, analysis, and consequences of microplastics in water. *Results in Engineering*, 23, 102827. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102827>

Barletta, M., Lima, A. R. A. & Costa, M. F. (2019). Distribution, sources and consequences of nutrients, persistent organic pollutants, metals and microplastics in South American estuaries. *Science of the Total Environment*, 651(1), 1199-1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.276>

Cañón, J., Molina, A. & Duque, G. (2024). *Impact of contamination due to ingestion of microplastics on commercial fish in relation to their trophic habits*. Preprint. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4308254/v1>

Cogua, P., Jiménez-Reyes, M. F. y Duque, G. (2013). Relaciones tróficas de cinco especies de peces de interés comercial en la bahía de Cartagena, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 42(1), 185-192. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-97612013000100012

Dantas, N. C. F. M., Duarte, O. S., Ferreira, W. C., Ayala, A. P., Rezende, C. F. & Feitosa, C. V. (2020). Plastic intake does not depend on fish eating habits: Identification of microplastics in the stomach contents of fish on an urban beach in Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 153, 110959. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.110959>

Duque, G. y Acero, A. (2003). Food Habitats of *Anchovia clupeoides* (Pisces: Engraulidae) in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean. *Gulf of Mexico Science*, 21(1), 1-9. <https://doi.org/10.18785/goms.2101.01>

Duque, G., Gamboa-García, D. E., Molina, A. & Cogua, P. (2025). Effects of consecutive dredging on the fish community of a tropical estuary. *Continental Shelf Research*, 286, 105402. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2025.105402>

Ferreira, G. V. B., Barletta, M. & Lima, A. R. A. (2019). Use of estuarine resources by top predator fishes. How do ecological patterns affect rates of contamination by microplastics? *Science of The Total Environment*, 655, 292-304. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.229>

Fischer, W., Krupp, F., Schneider, W., Sommer, C., Carpenter, K. E. y Niem, V.H. (1995a). *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico Centro-Oriental. II. Vertebrados - Parte 1.*

Fischer, W., Krupp, F., Schneider, W., Sommer, C., Carpenter, K. E. y Niem, V. H. (1995b). *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico Centro- Oriental. III. Vertebrados - Parte 2.*

Froese, R. & Pauly, D. (2022). *FishBase*. <https://www.fishbase.se/search.php>

Gamboa-García, D. E., Duque, G. y Cogua, P. (2018). Dinámica de la estructura y composición de macroinvertebrados y su relación con las variables ambientales en la bahía de Buenaventura. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 47(1), 67-83. <https://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/821>

Garcés-Ordóñez, O., Saldarriaga-Vélez, J. F., Espinosa-Díaz, L. F., Patiño, A. D., Cusba, J., Canals, M., Mejía-Esquibia, K., Fragozo-Velásquez, L., Sáenz-Arias, S., Córdoba-Meza, T. & Thiel, M. (2022). Microplastic pollution in water, sediments and commercial fish species from Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon complex, Colombian Caribbean. *Science of The Total Environment*, 829, 154643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154643>

García-Cardona, E., Molina, A. E. y Duque, G. (2021). Hábitos tróficos del lenguado Citharichthys gibberti (Paralichthyidae) y su variabilidad espaciotemporal en la la

bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 133-150. <https://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/1078>

Giraldo, C. (2017). *Estudio de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura, Colombia*. Universidad del Valle.

Herrera, L. É., Gamboa-García, D. E., & Duque, G. (2025). Variación en la dieta de peces Sciaenidae en la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 73(1), e57962. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v73i1.57962>.

Lima, A. R. A., Barletta, M. & Costa, M. F. (2015). Seasonal distribution and interactions between plankton and microplastics in a tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 165, 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.018>

Lobo-Guerrero, A. (1993). Hidrología e Hidrogeología de la Región Pacífica Colombiana. Publicado en Leyva, P. (ed) Colombia- Pacífico, Tomo I, Fondo para la protección del Medio Ambiente “Jose Celestino Mutis”, 122–134.

Majdi, N., Hette-Tronquart, N., Auclair, E., Bec, A., Chouvelon, T., Cognie, B., Danger, M., Decottignies, P., Dessier, A., Desvillettes, C., Dubois, S., Dupuy, C., Fritsch, C., Gaucherel, C., Hedde, M., Jabot, F., Lefebvre, S., Marzloff, M. P., Pey, B., Peyrard, N. & Perga, M. E. (2018). There's no harm in having too much: A comprehensive toolbox of methods in trophic ecology. *Food Webs*, 17, e00100. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2018.e00100>

- Martínez, S., Molina, A. y Duque, G. (2024). Dinámica espaciotemporal de la contaminación por microplásticos en sedimentos marinos de la bahía de Tumaco, pacífico colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 311-332. <https://doi.org/10.22490/21456453.7196>
- Muro-Torres, V. M., Amezcua, F., Lara-Mendoza, R. E., Buszkiewicz, J. T. & Amezcua-Linares, F. (2018). Trophic ecology of the chihuil sea catfish (*Bagre panamensis*) in the south-east Gulf of California, México. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 98(4), 885-893. <https://doi.org/10.1017/S0025315417000170>
- Muro, V. (2011). Crecimiento y reproducción de los bagres marinos *Arius platypogon* (Günther, 1864) y *Bagre panamensis* (Gill, 1863) (PISCES: ARIIDAE) en el sur de Sinaloa, México. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000673530>
- Neto, J. G., Rodrigues, F., Ortega, I., Rodrigues, L., Lacerda, A., Coletto, J., Kessler, F., Cardoso, L., Madureira, L. & Proietti, M. (2020). Ingestion of plastic debris by commercially important marine fish in southeast-south Brazil. *Environmental Pollution*, 267, 115508. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115508>
- Otero Díaz, L. J. (2005). Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional para describir las Corrientes y la Propagación de la Onda de Marea en la Bahía de Buenaventura. *Boletín Científico CCCP*, 12, 9-21. <https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CCCP/article/view/371>
- Pichler, H. A., Spach, H. L., Gray, C. A., Broadhurst, M. K., Schwarz Jr, R. & de Oliveira Neto, J. F. (2015). Environmental influences on resident and transient fishes across shallow estuarine beaches and tidal flats in a Brazilian World Heritage area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.07.041>
- Prata, J. C., Padrão, J., Khan, M. T. & Walker, T. R. (2024). Do's and don'ts of microplastic research: a comprehensive guide. *Water Emerging Contaminants and Nanoplastics*, 3, 8. <https://doi.org/10.20517/wecn.2023.61>
- Reisser, J., Shaw, J., Hallegraeff, G., Proietti, M., Barnes, D. K. A., Thums, M., Wilcox, C., Hardesty, B. D. & Pattiarratchi, C. (2014). Millimeter-Sized Marine Plastics: A New Pelagic Habitat for Microorganisms and Invertebrates. *PLOS ONE*, 9(6), e100289. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0100289>
- Reyes-Rojas, J., Panesso-Guevara, M. & Duque, G. (2023). Influence of maintenance dredging on polychaete community composition in an estuary (Tropical Eastern Pacific). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 10621-10632. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04722-7>
- Robertson, D. R., Allen, G. R., Peña, E. C., & Estape, A. (2024). *Peces Costeros del Pacífico Oriental Tropical: sistema de Información en línea*. Versión 3.0 Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá. <https://biogeodb.stri.si.edu/sftep/es/pages>

- Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T. & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3, 3263. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- Salcedo, E. (2022). Influencia de la calidad ambiental en la dinámica del ensamblaje de peces de interés comercial en la Bahía de Tumaco, Pacífico colombiano [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82092>
- Sánchez-Giraldo, N., Molina, A. E. y Duque, G. (2025). Abundancia y composición de residuos marinos en playas de la bahía de Buenaventura, en el Pacífico colombiano. *Bol. Investig. Mar. Costeras*, 54(1), 111-30. <https://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/1328>
- Sandoval-Londoño, L., Leal-Flórez, J., Blanco-Libreros, J. F. y Taborda-Marín, A. (2017). Hábitos alimenticios y aspectos del uso del hábitat por el chivo cabezón *Ariopsis* sp. (aff. *assimilis*) (Siluriformes: Ariidae), en una laguna costera neotropical (Ecorregión Darién, Colombia). *Revista Actualidades Biológicas*, 37(102), 55-66. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.329008>
- Sutton, R., Mason, S. A., Stanek, S. K., Willis-Norton, E., Wren, I. F. & Box, C. (2016). Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 230-235. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2016.05.077>
- Tafurt, D., Molina, A. y Duque, G. (2021). Feeding habits of three species of sole fish (Pleuronectiformes: Achiridae) in Buenaventura Bay, Colombian Pacific. *Revista de Biología Tropical*, 69(3), 1055-1068. <https://doi.org/10.15517/RBT.V69I3.41922>
- Tenorio, G. (2011). Sistemática molecular de cinco especies de bagres de la familia Ariidae de México [Universidad Autónoma Metropolitana]. <https://doi.org/https://doi.org/10.24275/uami.8623hz06b>
- Trojer, H. (2017). Meteorología y climatología de la vertiente del Pacífico colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(S), 467-490. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/583>
- Vásquez-Molano, D., Molina, A. y Duque, G. (2021). Distribución espacial y aumento a través del tiempo de microplásticos en sedimentos de la Bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(1), 27-42. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.1.1021>
- Vidal, L., Molina, A. y Duque, G. (2021). Incremento de la contaminación por microplásticos en aguas superficiales de la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 113-132. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.1032>
- Vivas-Sánchez, J., Gamboa-García, D. & Duque, G. (2023). Ecología trófica y consumo incidental de microplásticos en peces (Sciaenidae) y su relación con la dinámica ambiental en la bahía de Tumaco, Pacífico colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y*

Naturales, 47(184), 571-599. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1893>

Zhou, Y., Ashokkumar, V., Amobonye, A., Bhattacharjee, G., Sirohi, R., Singh, V., Flora, G., Kumar, V., Pillai, S., Zhang, Z. & Awasthi, M. K. (2023). Current re-

search trends on cosmetic microplastic pollution and its impacts on the ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 320, 121106. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121106>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 08-02-2025
Fecha de aceptado: 31-05-2025
DOI: 10.22490/21456453.9133

ANÁLISIS GEOESPECIAL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA

GEOSPATIAL ANALYSIS OF PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF GROUNDWATER IN THE MINING CORRIDOR OF CESAR, COLOMBIA

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa ¹

Cristian Antonio Daza Álvarez ²

Daniela López Rugeles ³

Viviana Melo López ⁴

Vanessa García Leoz ⁵

Citación: Bustamante Rua, M. O., Daza Álvarez, C. A., López Rugeles, D., Melo López, V., García Leoz, V. (2026). Análisis geoespecial de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en el corredor minero del Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 243 – 265. <https://doi.org/10.22490/21456453.9133>

¹ Ph. D. en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Concepción – Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia. mobustam@unal.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-991X>

² M. C. Ingeniería con énfasis en recursos minerales – Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia. cdazaalvarez92@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1676-4681>

³ M. C. Desarrollo Sostenible – Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. danielalopez216902@correo.itm.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-5889>

⁴ Esp. Recursos Minerales – Fundación Universitaria del Área Andina – Sede Valledupar, Colombia. vmelo@unal.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8825-5245>

⁵ M. C. Eng. Ingeniería Ambiental – Instituto Tecnológico Metropolitano – Sede Medellín, Colombia. vanessagarcia@itm.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9232-5408>

RESUMEN

Contextualización: El descenso de los niveles de los cuerpos de agua superficiales y la creciente demanda del consumo en las regiones del norte del Caribe colombiano han generado un aumento significativo en la búsqueda de fuentes de agua subterránea para su abastecimiento y uso, pero la falta de mecanismos de control y vigilancia de la calidad de estas fuentes de agua, ha generado efectos negativos sobre la salud y el bienestar de las comunidades que se benefician del preciado líquido.

Vacío de conocimiento: La falta de recursos, planes y metodologías de control y vigilancia de la calidad de las fuentes de agua subterránea en el departamento del Cesar, por parte de las autoridades ambientales, ha generado un desconocimiento del estado actual en muchas de sus regiones, por lo cual, la implementación de nuevas herramientas matemáticas y estadísticas aplicadas al geoprocесamiento de datos existente y de campo podría ayudar a generar nueva información de interés para el control y seguimiento de este recurso.

Propósito: El objetivo de esta investigación es generar una estrategia a partir del geoprocесamiento y análisis espacial de datos, utilizando la técnica de krigging simple, utilizando datos de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) presentes en muestras de agua subterránea, en municipios del corredor minero del departamento del Cesar, con el fin de generar modelos de predicción a través de mapas de calor, que permitan observar las

zonas con mejor potencial de uso de estas fuentes de agua en la región.

Metodología: Se tomaron tres muestras *in situ* de manera aleatoria en pozos de agua subterránea en los municipios de Becerril, La Jagua de Ibirico y El Paso, en el departamento del Cesar, para su procesamiento en laboratorio y conocer sus parámetros fisicoquímicos asociados al pH, conductividad y temperatura; posterior a esto, los resultados fueron comparados con los modelos de predicción elaborados a partir de una base de datos de 200 puntos de muestreo en la zona de estudio, con el fin de comparar los resultados de laboratorio frente a los modelo de predicción propuestos.

Resultados y conclusiones: Los resultados del análisis geoespacial de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en municipios del corredor minero del Cesar revelaron que los municipios de Agustín Codazzi y Becerril cuentan con la mayor cantidad de pozos activos en sus diferentes usos (agrícola, industrial, doméstico y de abastecimiento público), además de tener las mejores condiciones fisicoquímicas en cuanto a los valores del pH (entre 6 y 9), conductividad eléctrica (de 0 a 1000) y temperatura (de 29° a 30,6°), mientras que los municipios de La Jagua de Ibirico y Chiriguán cuenan con las peores condiciones de acuerdo con las características fisicoquímicas de las muestras de agua analizadas con valores de pH (entre 4,95 y 9,66), conductividad (de 50 a 2159) y temperatura (de 31° a 33°), haciendo que las alternativas de tratamiento sean

mucho más costosas para sus potenciales usos y que, al mismo tiempo, estas fuentes de agua subterránea sean poco apetecidas por las personas para sus diversos usos en estas zonas, por lo cual el seguimiento activo de las características de estas fuentes de

agua es fundamental para conocer sus potencialidades de uso y preferencia por parte de las personas de la región en estudio.

Palabras clave: SIG, agua subterránea, fisiocoquímica, geoprocесamiento, sostenibilidad.

ABSTRACT

Contextualization: The decrease in the levels of surface water bodies and the growing demand for consumption in the northern regions of the Colombian Caribbean has generated a significant increase in the search for groundwater sources for its supply and use, but the lack of control and monitoring mechanisms for the quality of these water sources has generated negative effects on the health and wellbeing of the communities that benefit from the precious liquid.

Knowledge gap: The lack of resources, plans and methodologies for the control and monitoring of the quality of groundwater sources in the department of Cesar by the environmental authorities has generated a lack of knowledge of the current status in many of its regions, so the implementation of new mathematical and statistical tools applied to the geoprocessing of existing and field data could help to generate new information of interest for the control and monitoring of this resource.

Purpose: The objective of this research is to generate a strategy based on geoprocessing and spatial analysis of data using the simple kriging technique, using data of physicochemical parameters (pH, electrical conductivity and temperature) present

in groundwater samples in municipalities of the mining corridor of the department of Cesar, in order to generate predictive models through heat maps, which allow observing the areas with the best potential for the use of these water sources in the region.

Methodology: Three random in situ samples were taken randomly from groundwater wells in the municipalities of Becerril, La Jagua de Ibirico and El Paso in the department of Cesar for laboratory processing and to determine their physicochemical parameters associated with pH, conductivity and temperature, after which the results were compared with the prediction models developed from a database of 200 sampling points in the study area, in order to compare the laboratory results with the proposed prediction model.

Results and conclusions: The results of the geospatial analysis of the physicochemical parameters of groundwater in municipalities of the mining corridor of Cesar, revealed that the municipalities of Agustín Codazzi and Becerril have the largest number of active wells in their different uses (agricultural, industrial, domestic and public supply), in addition to having the best physicochemical conditions in terms of pH values (between 6 to 9) electrical conducti-

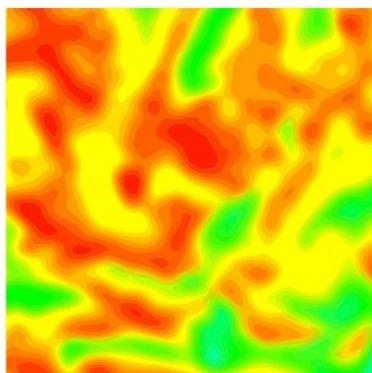
vity (0 to 1000) and temperature (between 29° to 30.6°), while the municipalities of La Jagua de Ibirico and Chiriguana have the worst conditions according to the physico-chemical characteristics of the water samples analyzed with pH values (between 4.95 at 9.66) electrical conductivity (50 to 2159) and temperature (31° to 33°), making the treatment alternatives much more expensive for their potential uses, and at the same time the-

se groundwater sources are little desired by people for their various uses in these areas, so the active monitoring of the characteristics of these water sources is essential to know their potential use and preference by the people of the region under study.

Keywords: GIS, Groundwater, Physico-chemistry, Geoprocessing, Sustainability.

RESUMEN GRÁFICO

ANÁLISIS GEOESPACIAL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA.



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

En el norte de Colombia, las prolongadas temporadas de verano y la disminución de las precipitaciones han limitado la disponi-

nibilidad de agua superficial de ríos, arroyos y lagos, lo que representa un desafío crítico para el desarrollo de las comunidades ur-

banas y rurales. Esta situación ha afectado negativamente algunas actividades productivas, como la agricultura, la ganadería y la piscicultura, las cuales son parte fundamental de las costumbres ancestrales y fuentes de ingresos para estas comunidades en esta región (Corpocesar, 2018).

En municipios del departamento del Cesar, como Agustín Codazzi, Becerril, El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná, se encuentran importantes fuentes hídricas que abastecen a estas poblaciones, como son los ríos Magiriaimo, Tucuy, Maracas, Fernambuco, Calenturitas y Ariguaní, los cuales, a pesar de presentar volúmenes importantes de agua, no tienen oferta hídrica suficiente durante todo el año para abastecer a toda la población de la región, lo que ha llevado a un incremento en la extracción y aprovechamiento de fuentes de agua como las subterránea por parte de los habitantes de estas zonas (Corpocesar, 2014; Gómez & Capachero, 2008; Ideam, 2013).

El uso creciente de fuentes de agua subterránea en estas regiones, sin un conocimiento claro de sus características fisicoquímicas y sin un control adecuado por parte de las autoridades, ha generado riesgos potenciales para la salud pública de las comunidades. Diversos estudios realizados por Corpocesar, 2014; Corpocesar & Fucol-

de, 2019; Gómez & Capachero, 2008, y Paz et al., 2012) han asociado que el consumo de aguas subterráneas sin tratamiento favorece el aumento de enfermedades gastrointestinales, como diarreas o colitis generadas por virus y bacterias en el agua, especialmente en zonas rurales con baja cobertura de sistemas de tratamiento de estas fuentes. Por ello, la evaluación periódica de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos es esencial para el establecimiento de rutas de uso y tratamiento adecuados para estas fuentes de agua subterránea.

Este estudio plantea una estrategia metodológica para abordar la problemática del seguimiento del estado y calidad del agua subterránea en la región, mediante el uso de herramientas matemáticas y estadísticas apoyadas en los sistemas de información geográfica (GIS) y uso de algoritmos de geoproccesamiento, como el Krigging, los cuales permitan de manera aproximada y con un alto grado de precisión, la identificación y seguimiento de potenciales puntos de extracción de agua subterránea, verificados a través de la comparación con datos de campo medidos in situ, con el fin de generar nuevas rutas hacia la sostenibilidad y un abastecimiento seguro en las regiones más necesitadas del departamento del Cesar (Gómez & Capachero, 2008; Ideam, 2015).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

ZONA DE ESTUDIO

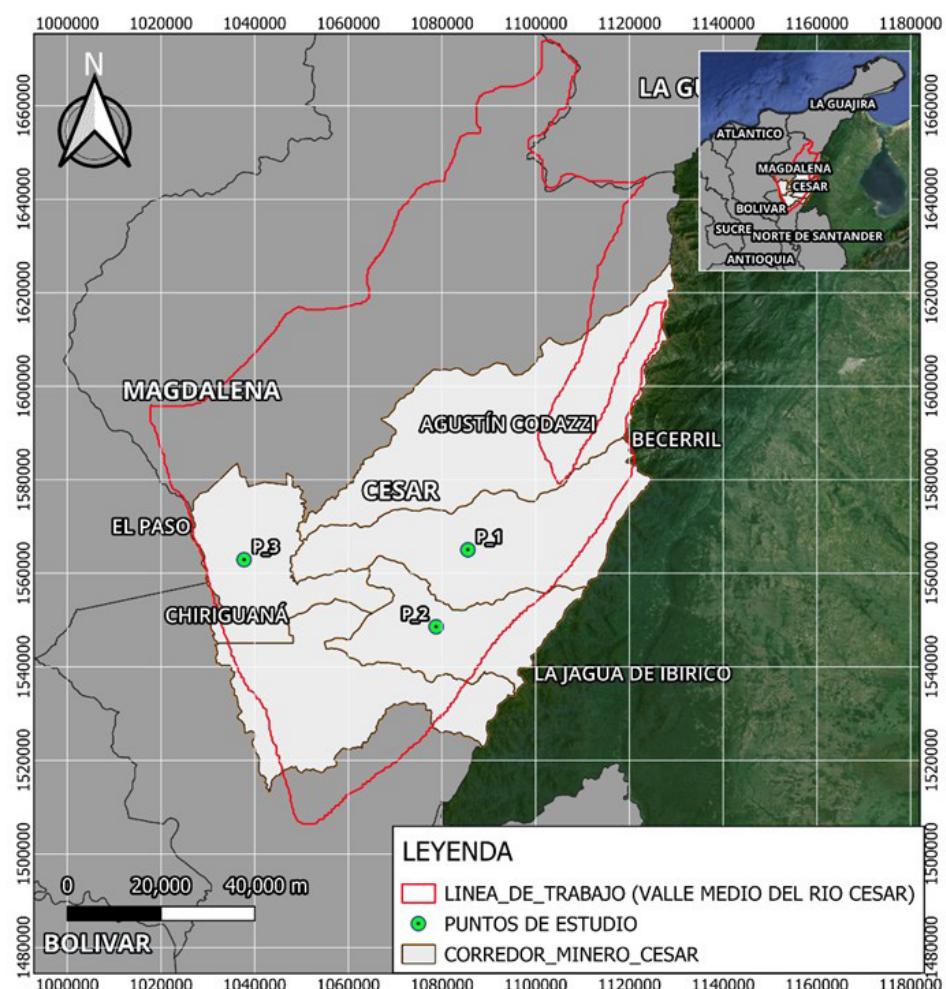
La zona de estudio se localiza en el departamento del Cesar, al norte del territorio

colombiano, específicamente en la cuenca del río Cesar como se observa en el (Mapa 1),

la cual cuenta con una extensión de 18 485 km². Esta cuenca tiene áreas de drenaje en dirección norte-sur, definidas por las microcuenca de los ríos Badillo, Seco, Guatapurí, Tocaimo, Magiriaimo, Mocho, Fernanbuco, Ariguaní, Tucuy, Casacara, Calenturitas y Maracas, pertenecientes a la gran cuenca del río Cesar (Corpocesar, 2014).

De acuerdo con el Ideam (2013, 2015, en el departamento del Cesar se reconocen tres

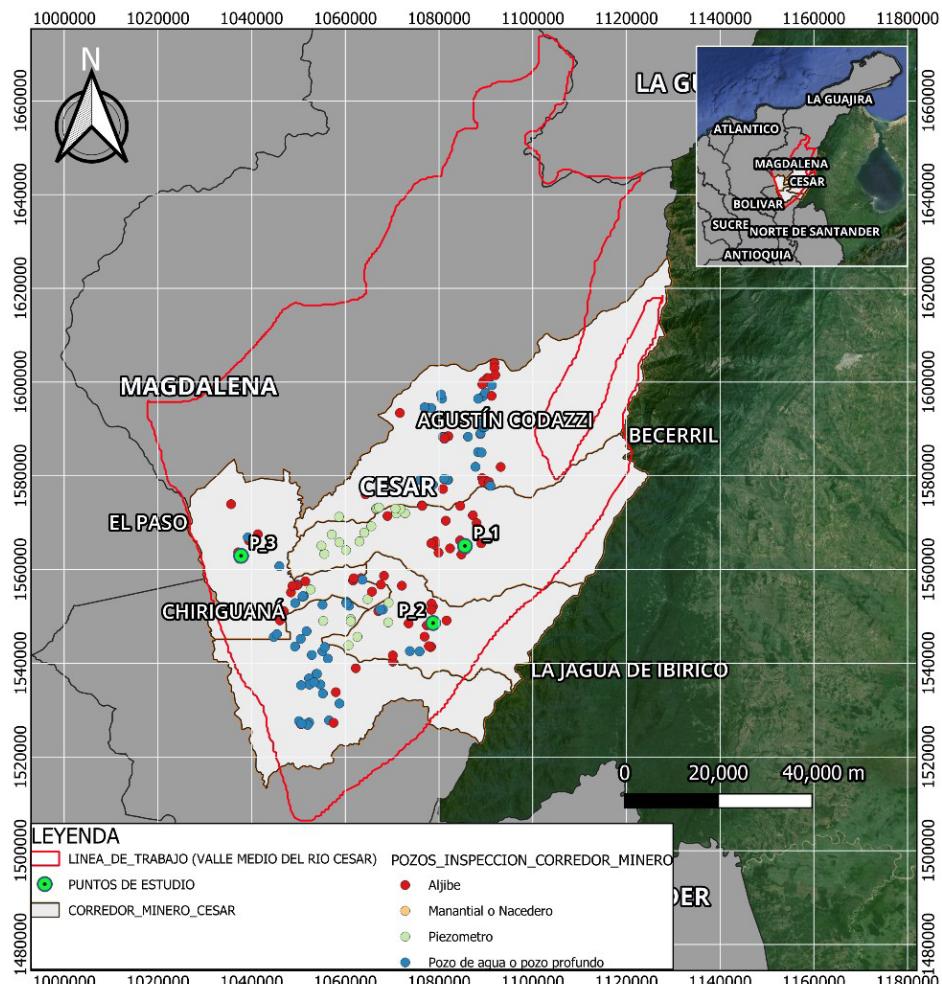
sistemas acuíferos principales: El sistema acuífero del Cesar, el sistema acuífero Simití y el sistema acuífero Banco-Mompox. Estos sistemas conforman la región hidrogeológica Cesar-Ranchería (PC4), con una cobertura superficial de 8593 km². Dicha área se encuentra comprendida por los municipios de Valledupar, La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguaná, Curumaní y Bosconia.



DISEÑO DE MUESTREO

Los puntos de muestreo fueron obtenidos a partir de inventarios hidrogeológicos realizados entre los meses de octubre y noviembre del 2020 en la zona del corredor minero del departamento del Cesar (Mapa 2), el cual incluye información de aproximadamente 200 pozos de agua subterránea dentro de la zona en estudio. Los puntos fueron

procesados y georreferenciados dentro del sistema de coordenadas Magna-SIRGAS/Datum: Colombia Bogotá Zone, además de contener información asociada con datos de parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura y conductividad eléctrica. (Corpo-cesar & Fucolde, 2019).



Fuente: autores.

MUESTREO DE VALIDACIÓN EN CAMPO

Con el objetivo de contrastar los resultados históricos y evaluar la precisión de los modelos de predicción generados, se realizaron recorridos de campo en julio de 2024. En esta etapa se tomaron tres puntos (P1: Becerril, P2: La Jagua de Ibirico y P3: El Paso) de manera aleatoria siguiendo experiencias y recomendaciones de datos e investigaciones de campo realizadas por Belmonete et al., 2021; Gomez Delgado & Barredo Cano, 2005), con el fin de obtener información asociada a los parámetros fisicoquímicos presentes en el agua subterránea en estos municipios. Estas mediciones se realizaron con equipos de medición multiparamétricos de la marca HACH – Ref: HQ40d para determinar directamente en el agua los valores de pH, temperatura y conductividad eléctrica, además de tomar muestras de estos puntos para ser procesadas en laboratorios acreditados y validar los resultados obtenidos, teniendo en cuenta las guías y recomendaciones emitidas por el Ideam (2018, 2019).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(S_i, S_j)] + m = \gamma[d(S_0, S_i)],$$

donde n es el número de observaciones, m es el multiplicador Lagrange usado para la minimización de las restricciones, λ es el peso dado a cada una de las observaciones y la suma de todos los λ es igual a uno. Los subíndices i y j denotan los puntos muestreados, el subíndice 0 es el punto en estimación, s simboliza la medición efectuada (variable

ANÁLISIS DE GEOPROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

El análisis fue desarrollado utilizando ArcGIS 10.8 con la extensión Geostatistical Analyst. Se construyeron variogramas experimentales para cada parámetro, ajustando modelos teóricos para representar la estructura espacial de la semivarianza. Posteriormente, se generaron mapas continuos de pH, temperatura y conductividad eléctrica en el área de estudio.

La interpolación de los valores de los parámetros fisicoquímicos mencionados se definió de acuerdo con Villatoro et al. (2008), quienes sugieren el método de Kriging simple para la distribución espacial de las variables analizadas, mediante el uso de variogramas o semivariogramas. Este método asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme la distancia aumenta respecto al punto de interés. El cálculo se establece a partir de la Ecuación 1:

$$i = 1, \dots, n ; \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \text{ (Ecuación 1)}$$

medida) y d (S_i, S_0) es la distancia entre S_i y S_0 a partir del semivariograma, mediante la cual la semivarianza Ecuación 2 calculada es una medida para determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza, tal como se muestra a continuación:

$$\gamma[d(S_i, S_0)] = \text{Var}[Z(S_i) - Z(S_0)] \text{ (Ecuación 2)}$$

(Belmonte et al., 2021; Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005) (Ideam, 2019)

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

GEOPROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

En cuanto al pH, se observan en el mapa 3 valores entre los 4 y 8 en la mayoría de los municipios del corredor minero, con algunos focos de acidez presentes en el municipio de La Jagua de Ibirico en la zona centro y sur, mientras que en la frontera entre los municipios de Becerril y Agustín Codazzi se presentaron valores medios entre los 6 y los 8, siendo aguas con tendencias a la acidez y la alcalinidad.

En el mapa 4 se encuentran los datos de las temperaturas promedio medidas en los pozos, en donde se puede inferir que, dentro de los cinco municipios pertenecientes al corredor minero, durante las fechas de muestreo entre los meses de octubre y noviembre del 2020, se presentaron temperaturas promedio entre los 26 y los 32 °C, con algunos focos marcados con temperaturas superiores a los 32 °C entre los límites de los municipios de La Jagua de Ibirico y El Paso. Mientras que, entre los municipios de Agustín Codazzi y Becerril se presentan temperaturas entre los 25 y los 28 °C, con tendencia a disminuir a medida que se acercan a las zonas de la Serranía del Perijá.

Finalmente, el mapa 5 presenta los valores asociados a la conductividad eléctrica del agua subterránea, con patrones importantes

de baja conductividad entre las fronteras de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico y El Paso, con valores promedio entre los 1 y los 1000 (uS/cm), valores que permiten inferir que son zonas de reserva de agua con baja o media presencia de minerales solubles y con características de poca o baja salinidad, que resulta un factor de vital importancia para el uso del agua y su potencial para ser empleada con fines de potabilización, de acuerdo con (Inocencio-Flores et al., 2013). Por su parte, en el municipio de Chiriguaná se aprecian concentraciones por encima de los 1000 (uS/cm), lo cual indica una alta presencia de minerales disueltos en estos puntos de muestreo, asociados a los altos índices de salinidad que se presentan en estas aguas.

ANÁLISIS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

A partir de los datos de campo obtenidos de las características fisicoquímicas efectuados en los tres puntos de control (P1, P2 y P3) en campo, se elabora la tabla 1, donde se observan los datos promedio de las variables de pH, temperatura y conductividad, con el fin de tener una línea base con datos probados en campo, para luego generar una comparativa con los datos obtenidos en

campo como se observa en la tabla 2, durante el mes de julio del 2024 y los datos proyectados a partir de los mapas de predicción,

elaborados con el total de los datos, como se describe a continuación:

Tabla 1.

Datos parámetros fisicoquímicos de fuentes de agua subterránea Convenio ANH-Corpocesar 2020

Datos monitoreo en municipios del corredor minero (2020)			
Municipio	Temperatura promedio (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μs/cm)
Agustín Codazzi	30,18	7,54	507,05
Becerril	30,41	7,78	550,88
Chiriguaná	31,10	7,18	641,17
El Paso	31,66	6,90	328,50
La Jagua de Ibirico	30,86	6,60	449,17
Límite normativo para agua de consumo humano y potable (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 475 de 1998)	NA	6,5-9	50-1000

Fuente: Corpocesar & Fucolde, 2019.

Tabla 2.:

Datos parámetros fisicoquímicos de fuentes de agua subterránea de campo, monitoreo junio de 2024 (Convenio ITM, UPC, UNAL, 2024)

Municipio	Datos monitoreo en campo y laboratorio (2024)					
	Campo	Laboratorio	Campo	Laboratorio	Campo	Laboratorio
Becerril	29,6	<26°	7,07	7,09	340	362
El Paso	36,4	<26°	8	7,87	435	449
La Jagua de Ibirico	31,3	<26°	5,38	5,11	66,4	<84
Límite normativo para agua de consumo humano y potable (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 475 de 1998)	N/A		6,5-9		50-1000	

Fuente: autores.

Se identifica una correspondencia en la temperatura, a excepción de los datos obtenidos en el municipio de El Paso, en el cual se tienen valores de 31,66 °C, mientras en campo se observan valores de 36,4 °C. Esto puede corresponder a la hora de toma de muestras, dado que los valores obtenidos de la predicción espacial consideran el promedio de los datos logrados para cada municipio, mientras que el dato *in situ* es puntual y fue tomado al medido día, donde el Sol se encuentra en el céñit. Esto es importante, si se considera la relación e influencia que existe entre las variables consideradas.

Por otro lado, los valores de pH muestran mayor variación en los municipios de El Paso y La Jagua de Ibirico, con aumento de 0,97 en el primer caso, y disminución de 0,82 en el segundo. Si bien los cambios de pH se relacionan con aspectos naturales como antrópicos, esta variación no parece ser usual al tratarse de una comparación entre valores promedio en el municipio con datos *in situ*. En estos casos, suelen considerarse las dinámicas hidroclimáticas de la zona o las coberturas y usos del suelo o la extracción del recurso, ya que una variación de pH menor a la unidad no representa un cambio significativo que permita el reconocimiento de alteraciones en el agua.

En el caso de la conductividad eléctrica, se encontraron diferencias generalizadas entre los municipios que comprenden el comparativo realizado en las tablas 1 y 2. El más significativo de ellos fue el encontrado en La Jagua de Ibirico, ya que el promedio de la conductividad proyectada con los datos del 2020 fue de 449,17 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que

en el 2024 se obtuvo un valor de 66,4 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Igualmente, en el municipio de Becerril se tuvo una disminución de 210,88 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en el mismo periodo.

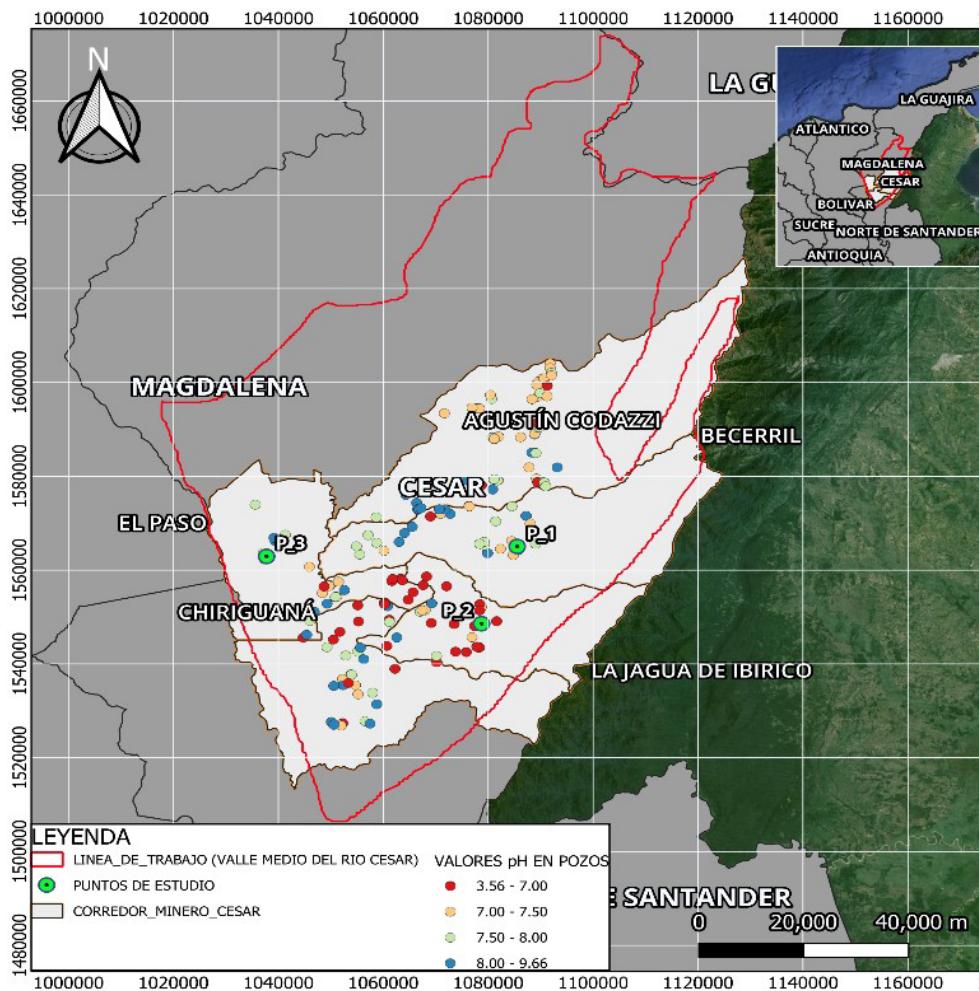
MODELOS GEOESTADÍSTICOS PREDICTIVOS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS POZOS ESCOGIDOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Posterior a la zonificación espacial de los puntos de muestreo dentro del área de estudio del corredor minero del Cesar, se realizó un análisis geoestadístico predictivo, con el fin de conocer las tendencias de las características fisicoquímicas de las fuentes de agua en las zonas a intervenir, esto se hizo mediante la interpolación de tipo kriging simple (Martínez-Vargas & Ramírez-García, 2005; Montero et al., 2015; Rangel Sotter et al., 2002; Villarreal-Macés et al., 2018), con el fin de predecir a partir de las tendencias estadísticas, teniendo en cuenta la ubicación geoespacial de cada punto de muestreo de agua subterránea, las magnitudes de las variables fisicoquímicas asociadas al pH, conductividad y temperatura.

En cuanto a las características asociadas a los modelos de geoprocесamiento presentes en el mapa 6, se infieren algunas correlaciones aproximadas de los valores del pH en comparación con los valores reales tomados en campo en la zona de estudio (Tabla 2), en las cuales se pueden observar tendencias marcadas en las muestras de agua con valores poco ácidos a neutros entre los valores

de 6 a 9, con predominancia entre los municipios de Agustín Codazzi y Becerril, mientras que para los municipios del centro del corredor como es el caso de Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibirico, se observan valores proyectados de pH entre los 3 y 8, con tendencias ácidas a neutras. Esto permite te-

ner un diagnóstico previo de las zonas con presencia de aguas ácidas, neutras y alcalinas, con el fin de optimizar y potencializar futuras zonas de intervención para estudios, análisis y prospección de fuentes de agua subterránea en la zona.

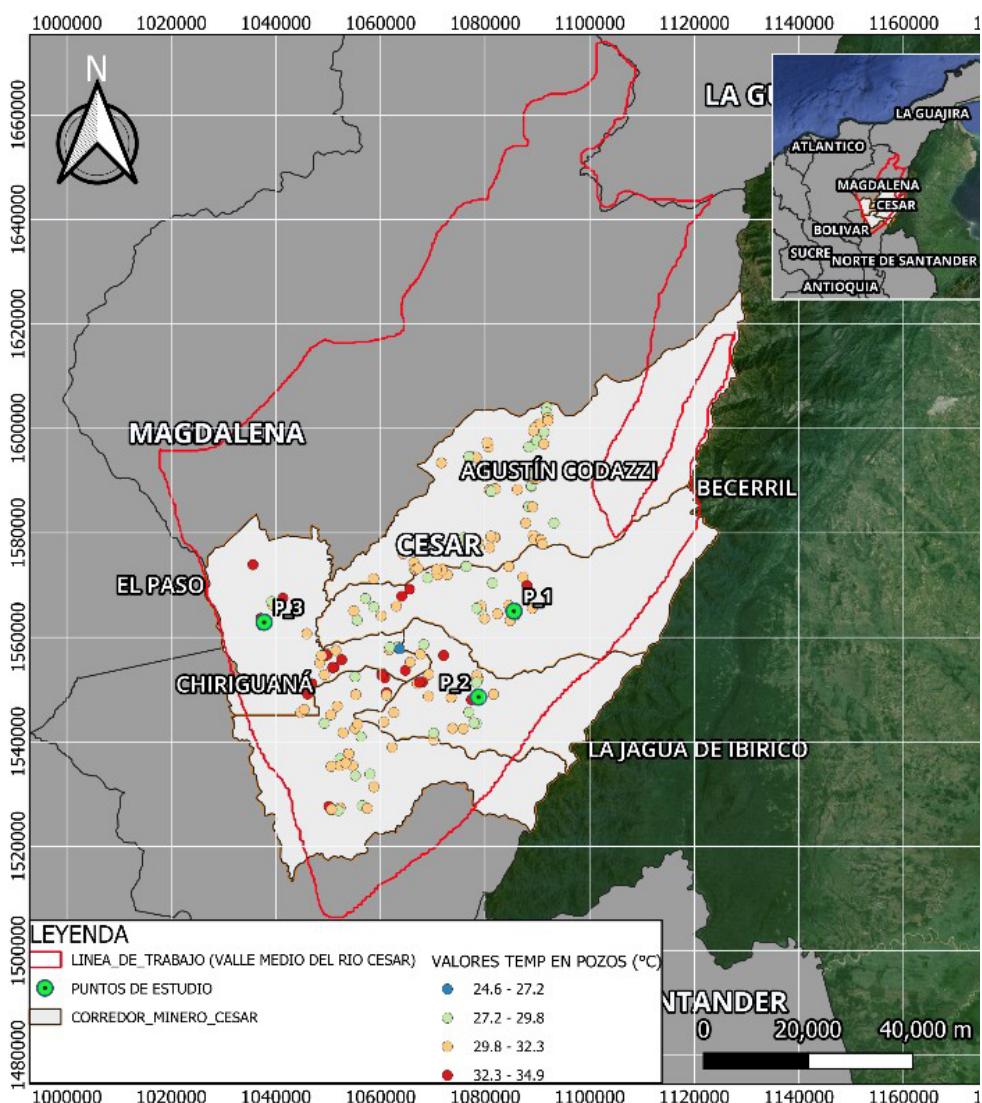


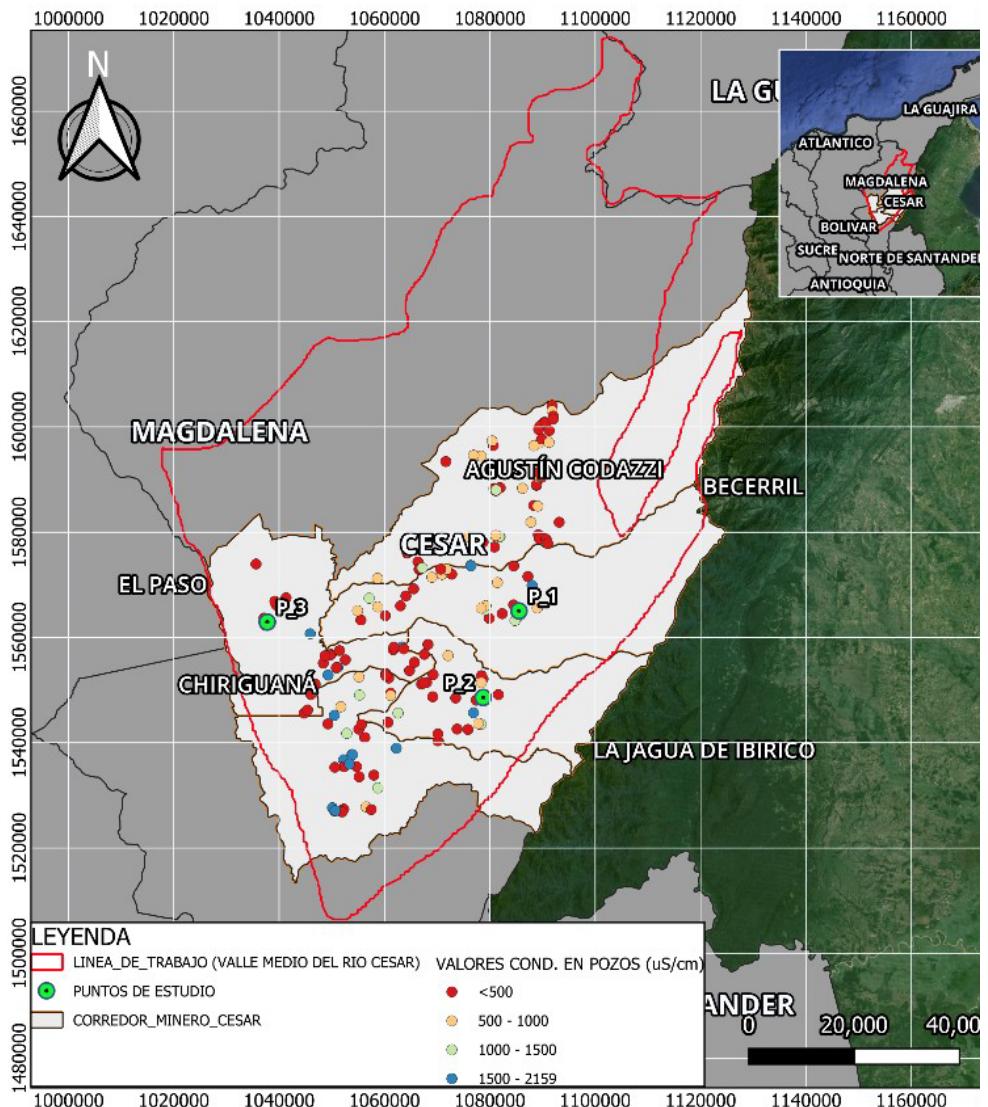
Mapa 3. Datos georreferenciados de pH en la zona de estudio

Fuente: autores.

ANÁLISIS GEOESPACEIAL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA

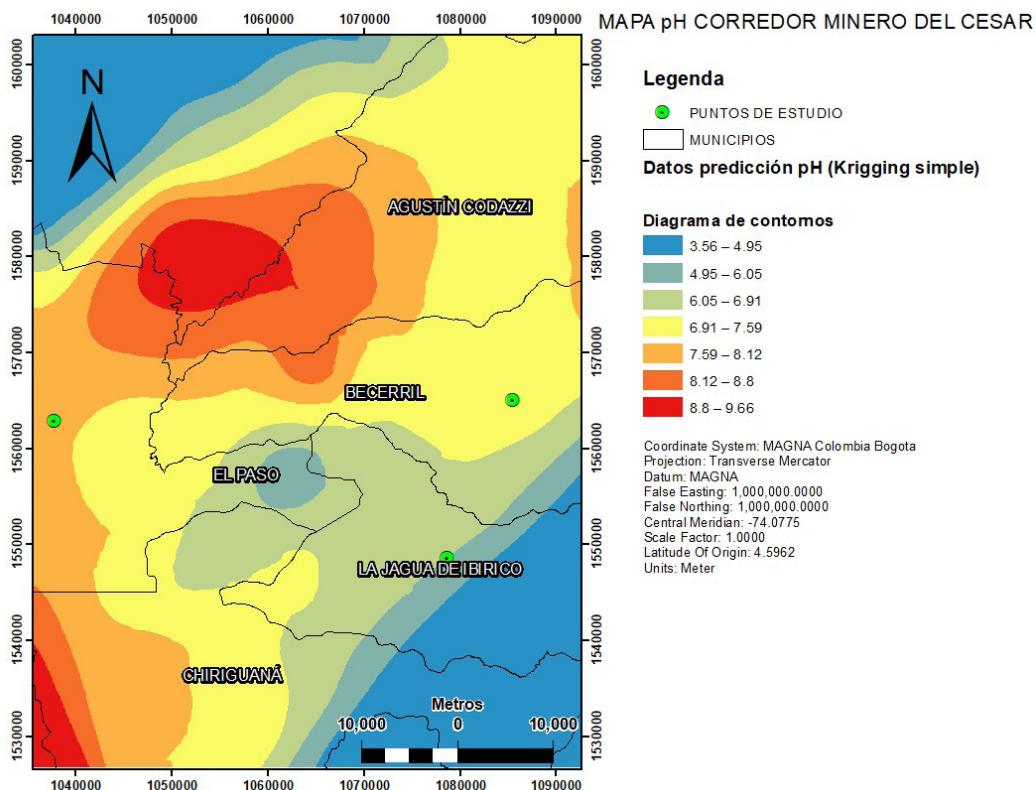
Bustamante, R., Daza, Á., López, R., Melo, L., García, L.





Mapa 5. Datos georreferenciados de la conductividad eléctrica (uS/cm) en la zona de estudio

Fuente: autores.

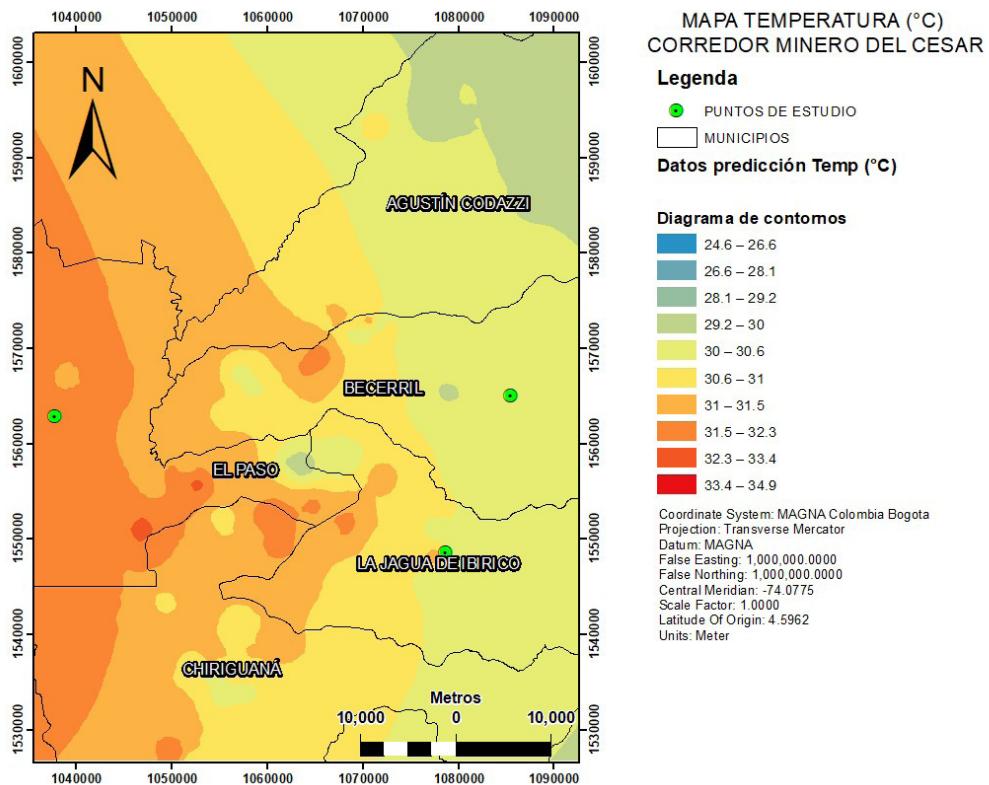


Mapa 6. Mapa parámetro pH en corredor minero del Cesar

Fuente: autores.

Estos valores de pH, de acuerdo con Appelo & Postma, 2004, podrían estar asociados a reacciones químicas que se presentan al interior de la unidad acuífera, producto de la interacción del agua con el suelo y las rocas. Por ejemplo, la dilución del dióxido de carbono (CO₂), manganeso, hierro y algunos componentes de las arcillas. Estos compuestos, una vez disueltos en el agua, hacen que el pH baje y el agua se acidifique. Igualmente, el aporte de contaminación puntual o difusa, proveniente de las actividades antrópicas que se desarrollan en el territorio, tales como la minería, el mal manejo de las aguas residuales y de las zonas de residuos sólidos, cultivos o ganadería, pueden ocasionar infiltraciones de aguas con bajo pH que alcanzan el acuífero.

Para las condiciones de temperatura promedio del agua, durante el periodo de muestreo en la zona de estudio, se observa en el mapa 7, una tendencia a la disminución de los valores de la temperatura desde el suroeste hacia el noreste de la zona en estudio, con valores proyectados entre los 34,9° y los 26.6°C, teniendo en cuenta que el aumento significativo de los valores de la temperatura, en los municipios del Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibirico, podrían asociarse a factores de pérdida de cobertura vegetal y actividades de ganadería y minería intensiva, que favorecerían a los procesos de desertificación en la zona en estudio (Corpocesar, 2014, 2018; Ideam, 2013; Pérez Hernández & Pérez Sato, 2023).



Mapa 7. Mapa parámetro temperatura (°C) en corredor minero del Cesar

Fuente: autores.

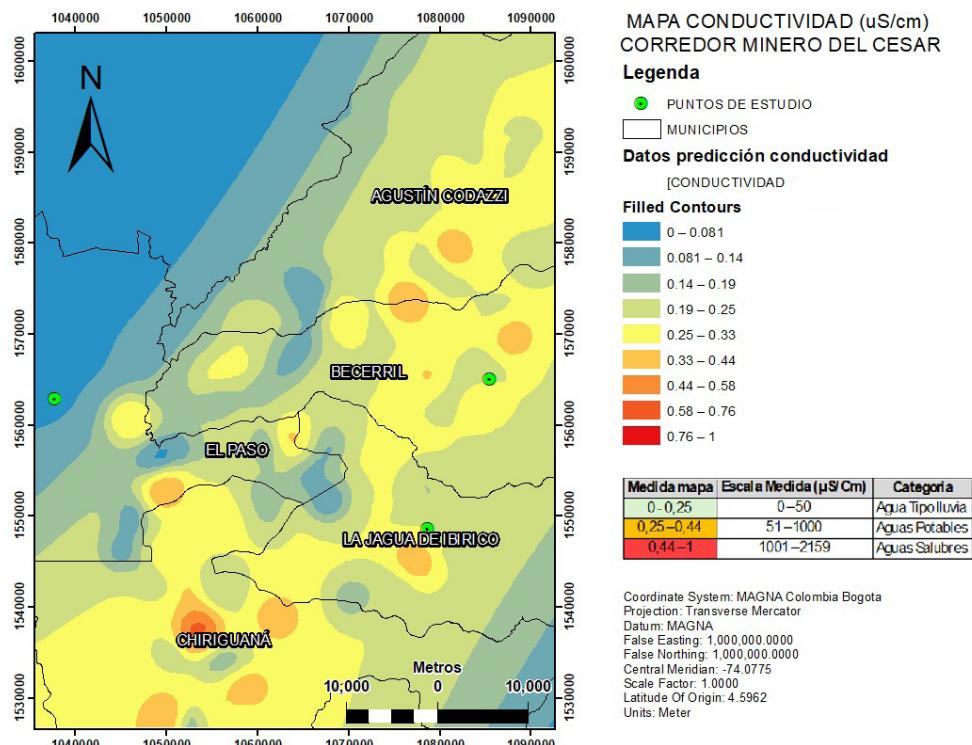
Sin embargo, se observa que, en la frontera central de los municipios del Becerril, El Paso y La Jagua de Ibirico, se encuentran zonas puntuales donde los acuíferos subterráneos presentan temperaturas bajas del orden de 26,6°, en comparación con los valores promedio de los datos obtenidos en campo. Una posible explicación de lo anterior estaría asociada con la presencia de cultivos de palmas africanas, que generan condiciones microclimáticas a través de la sombra (Pérez Hernández & Pérez Sato, 2023), mantienen los terrenos con ciertas condiciones específicas para algunos nutrientes (flora y fungas) y las fuentes de agua fresca.

Teniendo en cuenta las consideraciones de Stumm & Morgan, 1996, la temperatura puede influir en el comportamiento del pH y la conductividad eléctrica, dado que, cuando hay un incremento en la temperatura, el pH disminuye, y viceversa. Esto debido a que cuando la temperatura aumenta, la molécula del agua tiende a separarse en sus elementos constituyentes: hidrógeno y oxígeno. Asimismo, cuanto mayor es la temperatura del agua, mayor será su capacidad para conducir la carga eléctrica.

Con respecto a las proyecciones de conductividad eléctrica, en el mapa 8 se observan varios aspectos de interés. El primero de ellos es que en los modelos de predicción

se presenta una fuerte tendencia de los valores reales de conductividad en el municipio de Chiriguaná, los cuales se encuentran asociados a una mayor cantidad de minerales disueltos en la zona de estudio, cuyas características le generan una mayor salinidad a estas muestras de agua, descartando el consumo por parte de las comunidades, sin un previo procesamiento (Paz et al., 2012), mientras que para la región central del corredor minero, comprendido por los mu-

nicipios de El Paso y La Jagua de Ibirico, se presentan zonas con muy bajos valores de conductividad eléctrica, las cuales podrían catalogarse como zonas viables para el estudio, análisis y prospección de nuevas fuentes de agua con potencial uso y/o aprovechamiento, por sus bajos contenidos de minerales disueltos asociados a una baja salinidad y, al mismo tiempo, por sus niveles neutros de pH, que facilitarían los procesos de potabilización y otros potenciales usos.



Mapa 8. Mapa parámetro conductividad (uS/cm) en corredor minero del Cesar

Fuente: autores.

De acuerdo con Hounslow, 2018, los altos valores de conductividad eléctrica podrían estar relacionados a varios factores, entre ellos, una elevada concentración de sales o sólidos disueltos en el agua, provenientes de disolución de materiales presentes en el sue-

lo o meteorización de rocas, la infiltración de agua residual y lixiviados o altas tasas de evapotranspiración y extracción del recurso, lo que hace que se concentren las sales disueltas en el medio acuífero por disminución del nivel freático.

ANÁLISIS DEL USO Y RECOMENDACIONES PARA EL MANEJO DE LAS FUENTES HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS

Mediante los trabajos de campo efectuados por la zona de estudio se logró reconocer algunas características importantes en lo

relacionado con el uso y manejo del recurso hídrico subterráneo, entre ellas, el tipo de captación y el uso del agua en los municipios del corredor minero, lo cuales se presentan en las figuras 1 y 2. Según esta información, el tipo de captación que predomina son los aljibes y los pozos profundos, principalmente en los municipios de Agustín Codazzi y La Jagua de Ibirico.

CARACTERISTICAS DE LOS PUNTOS DE CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA MUESTREADOS

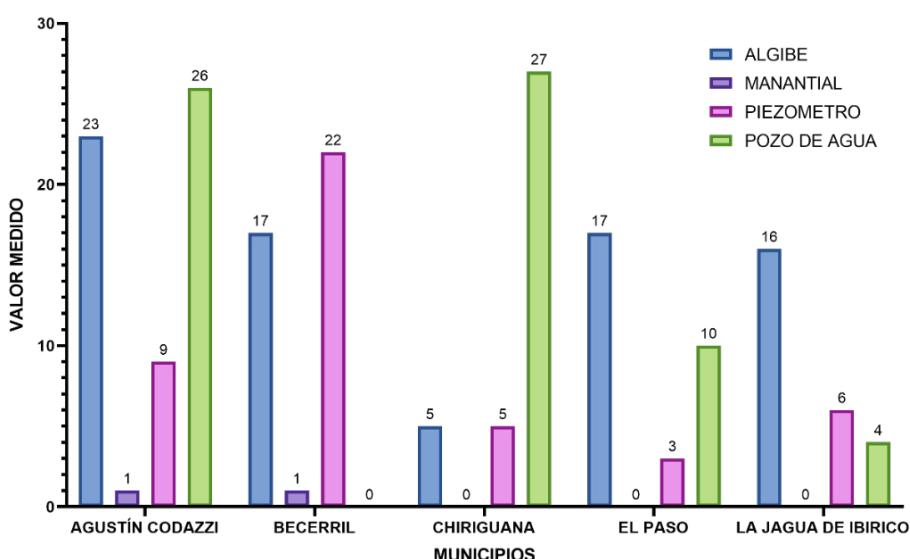


Figura 1. Tipos de captación de fuentes de agua subterránea en municipios del corredor minero del Cesar

Fuente: autores.

Respecto al uso del agua, se encontró que el uso principal es el de consumo humano, principalmente en los municipios de Agustín Codazzi, Becerril y Chiriguaná, lo cual se debe a la escasez del recurso hídrico superficial en el territorio y a la población asentada en esos municipios. Es importante considerar que los resultados logrados en el moni-

toreo de variables fisicoquímicas revelan algunas características de interés sanitario, ya que, en algunos sectores de estos municipios de Becerril, Chiriguaná y La Jagua de Ibirico, se encontraron valores de pH y conductividad eléctrica por fuera del valor que establece la norma colombiana (Resolución 2115 de 2007) para el agua de consumo humano.

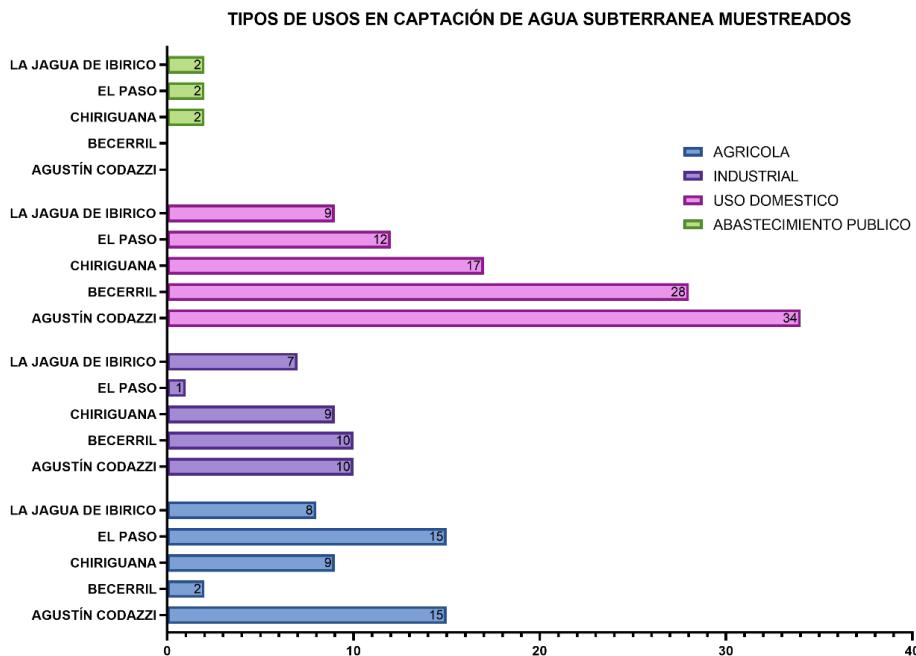


Figura 2. Usos del agua subterránea en puntos de muestreo de municipios del corredor minero

Fuente: autores.

En todos los casos, es recomendable efectuar jornadas de monitoreo periódicas que permitan conocer la evolución espaciotemporal de las variables fisicoquímicas que se relacionan con la calidad del agua y formular

planes de manejo ambiental y del acuífero que apunten a la protección y sostenibilidad del recurso hídrico en la región del corredor minero del Cesar.

4 CONCLUSIONES

La aplicación de herramientas de análisis geoespacial y el uso de algoritmos aplicados al geoprocесamiento, como el kriging simple, permitieron generar modelos predictivos de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en el corredor minero del departamento del Cesar, con resultados útiles para la zonificación y priorización de aguas según su calidad.

Los municipios de Agustín Codazzi y Becerril presentan las condiciones fisicoquímicas de acuerdo con los resultados históricos y medidos en campo con mayor favorabilidad, con valores de pH cercanos a la neutralidad, baja conductividad eléctrica y temperatura dentro de los rangos óptimos deseables, lo que los posiciona como zonas con alto potencial para el uso y la sostenibilidad del recurso.

En contraste, se observó que los municipios de La Jagua de Ibirico y Chiriguaná registraron niveles críticos de acidez y conductividad, lo que puede llegar a implicar que para su uso y tratamiento sean necesarios mayores requerimientos, con el fin de lograr su potencial potabilización.

Se observaron zonas donde los niveles de pH son bajos y los niveles de conductividad son altos, como es el caso de los municipios de La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y El Paso. Estas fuentes de agua, de acuerdo con la información de campo, suelen ser empleadas para el consumo humano y otros usos, como los industriales, pecuarios y agrícolas, sin tener en consideración los límites permisibles según la normatividad nacional para su uso.

Las diferencias detectadas entre los datos históricos del 2020 y las muestras de validación con resultados medidos en campo y laboratorio en 2024, evidencian la necesidad de implementar programas de monitoreo periódicos, que permitan detectar cambios en la calidad del agua, teniendo en cuenta las distintas épocas del año en la región, con el fin de tomar decisiones informadas con respecto a la gestión de los acuíferos en la zona.

Esta investigación demuestra que el uso de métodos de interpolación espacial puede ser una herramienta eficaz para apoyar la toma de decisiones frente a las limitaciones de los muestreos intensivos, siempre y cuando se valide con información de datos de campo y la rigurosidad de los resultados obtenidos.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, revisión, borrador original.

Autor 2: investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura, revisión y edición. **Autor 3:** logística, revisión y edición.

Autor 4: análisis de datos, revisión y edición.

Autor 5: metodología, investigación, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación (MinCiencias) y al Icetex por el apoyo económico recibido en la convocatoria N.º 890 - Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior, y a las

universidades (Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Instituto Tecnológico Metropolitano y Universidad Popular del Cesar), por los recursos académicos, técnicos y logísticos para el desarrollo del proyecto.

FINANCIAMIENTO

Este artículo es producto de los recursos destinados para el desarrollo de actividades investigativas dentro de la convocatoria N.º 890 - Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior, del proyecto “Estrategias para el

estudio y monitoreo de aguas subterráneas, mediante el uso de herramientas técnicas y tecnológicas integradas a sistemas IoT en zonas de influencia del corredor minero del departamento del Cesar”

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (2004). Geochemistry, groundwater and pollution, second edition. *Geochemistry, Groundwater and Pollution, Second Edition*, 1-649. <https://doi.org/10.1201/9781439833544/GEO-CHEMISTRY-GROUNDWATER-POLLUTION-APPELO-DIEKE-POSTMA>
- Belmonte, S., López, E. de las M., & García, M. de los Á. (2021). Identificación de áreas prioritarias para la gestión del agua en el Chaco salteño, Argentina. *Agua y territorio = Water and Landscape*, 17, 7-32., <https://doi.org/10.17561/at.17.4868>
- Corpocezar. (2014). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico del río Cesar*.
- Corpocezar. (2018). *Formulación del plan de manejo ambiental del sistema acuífero Cesar*.
- Corpocezar & Fucolde. (2019). *Actualización y caracterización de inventario de puntos de agua en áreas priorizadas en zonas potenciales para el desarrollo de proyectos de exploración y producción de Hidrocarburos en la Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del César - Corpocezar, en la cuenca Cesar – Ranchería*.
- Gómez, A. y Capachero, C. (2008). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación en el departamento del cesar, aplicando la metodología Drastic*. Valledupar, Colombia.
- Gómez Delgado, M. & Barredo Cano, J. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (RA-MA, Ed.; 2a ed.).
- Hounslow, A. W. (2018). Water quality data: Analysis and interpretation. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, 1-398. <https://doi.org/10.1201/9780203734117/WATER-QUALITY-DATA-ARTHUR-HOUNSLOW/ACCESSIBILITY-INFORMATION>
- Ideam. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas*. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/ME-MORIAS-MAPA-ZONIFICACION-HIDROGRAFICA.pdf>
- Ideam. (2015). Estudio Nacional del Agua - 2014. . https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf
- Ideam. (2018). *Guía para la Toma de Muestras de Agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Colombia. https://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/2.-PROTOCOLO-MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf
- Ideam. (2019). *Guía para la Acreditación de Laboratorios de Monitoreo de Calidad del Agua..* <https://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/acreditacion-laboratorios>
- Inocencio-Flores, D., Velázquez-Machuca, M. A., Pimentel-Equihua, J. L., Montañez-Soto, J. L. y Venegas-González, J. (2013). Hidroquímica de las aguas subterráneas de la cuenca del río Dueiro y normatividad para uso doméstico

tico. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 111-126. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500008&lng=es&nrm=iso&tlang=es

Martínez-Vargas, A. & Ramírez-García, J. (2005). Present development of geostatistics in the world. *Minería y Geología*, 21(4), 1-22. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223516052001.pdf>

Montero, J. M., Fernández-Avilés, G. & Mártil, P. (2015). Functional Kriging Prediction of Pollution Series: The Geostatistical Alternative for Spatially-Fixed Data. *Estudios de Economía Aplicada*, 201533(1), 145-174. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5117531&info=resume&idioma=ENG>

Paz, L., Diego, S., Liliana Vence Márquez, C., Rivera González, M., Osorio Bayter, Y. y Beatriz Castillo Sarabia, A. (2012). Caracterización microbiológica y fisiocoquímica de aguas subterráneas de los municipios de La Paz y San Diego, Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), 27-35. <https://doi.org/10.22490/21456453.953>

Pérez Hernández, H. & Pérez Sato, M. (2023). Does the oil palm (*Elaeis guineensis*) gen-

erate a negative impact on the soil? A review. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 50301-50301. <https://doi.org/10.15517/AM.V34I1.50301>

Rangel Sotter, A. P., Alber Hamersson Sánchez Ipia, Willington Libardo Siabato Vaca y John William Cely Pulido. (2002). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ingeniería*, 7(2), 31-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/23448393.2815>

Stumm, Werner. & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* (3a. ed.). Wiley. <https://search.worldcat.org/title/31754493>

Villarreal-Macés, S. G. y Díaz-Viera, M. A., (2018). Estimación geoestadística de la distribución espacial de la precipitación media mensual y anual en Nuevo León, México (1930-2014). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 106-130. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2018-05-05>

Villatoro, M., Henríquez, C. y 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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43632109>

Conflictos de intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 16-05-2025
Fecha de aceptado: 02-09-2025
DOI: 10.22490/21456453.9883

IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: ESTUDIO DE CASO EN LA CUENCA DEL RÍO BACHÉ, HUILA (2004-2024)

IMPACT OF LAND USE CHANGE ON SURFACE RUNOFF AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY: A CASE STUDY IN THE BACHÉ RIVER BASIN, HUILA (2004-2024)

Heider Fernando Losada Losada ¹
Juan Guillermo Popayán-Hernández ²

Citación: Losada Losada, H. F., Popayán-Hernández, J. G. (2026). Impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial y la conductividad hidráulica: estudio de caso en la cuenca del río Baché, Huila (2004-2024). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 267 – 294. <https://doi.org/10.22490/21456453.9883>

¹ Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia. u20241223892@usco.edu.co

² Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz, La Paz, Cesar, Colombia. jgpopayanh@unal.edu.co

RESUMEN

Contextualización: El estudio analizó las variaciones de la escorrentía superficial en la cuenca del río Baché (Huila, Colombia), ocasionada por los cambios de uso del suelo en tres períodos (2004, 2014, 2024).

Vacío de conocimiento: Faltaban análisis integrados sobre cómo la conversión de bosque a agricultura afectaba la respuesta hidrológica en suelos volcánicos (andisoles e inceptisoles), a pesar de cubrir el 49,8 % de la cuenca.

Objetivo: Evaluar el impacto de los cambios en la cobertura vegetal sobre la conductividad hidráulica (K_s) y la escorrentía, utilizando modelos hidrológicos y datos satelitales.

Metodología: Procesamiento de imágenes Landsat (4/7/8, 30 m) en ArcGIS; digitalización de modelos digitales de elevación.

Se usó el modelado con HEC-HMS para generar escenarios hidrológicos y se calculó el K_s y análisis comparativo de caudales.

Resultados: Reducción progresiva de K_s : 2,1 mm/h (2004) a 1,59 mm/h (2024); aumento de la escorrentía: 899 m³/s (2004, 44,29 % bosque) a 1619 m³/s (2024, 70,9 % agricultura), con un mayor impacto en suelos volcánicos cercanos a la red de drenaje.

Conclusiones: La conversión forestal ha reducido la capacidad de retención de agua del suelo en un 47 % en 20 años. El enfoque integrado de modelado SIG ha demostrado ser eficaz para evaluar los impactos hidrológicos, lo que pone de relieve la necesidad de políticas de conservación del suelo volcánico.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, escorrentía, HEC-HMS, conductividad hidráulica, infiltración.

ABSTRACT

Contextualization: The study analyzed surface runoff variations in the Baché River basin (Huila, Colombia) caused by land-use changes over three periods (2004, 2014, 2024).

Knowledge gap: Integrated analyses of how forest conversion to agriculture affected the hydrological response in volcanic soils (Andisols and Inceptisols) were lacking, despite covering 49.8% of the basin.

Objective: To evaluate the impact of changes in vegetation cover on hydraulic conductivity (Ks) and runoff, using hydrological models and satellite data.

Methodology: Landsat image processing (4/7/8, 30 m) in ArcGIS; digitalization of digital elevation models. HEC-HMS modeling was used to generate hydrological scenarios,

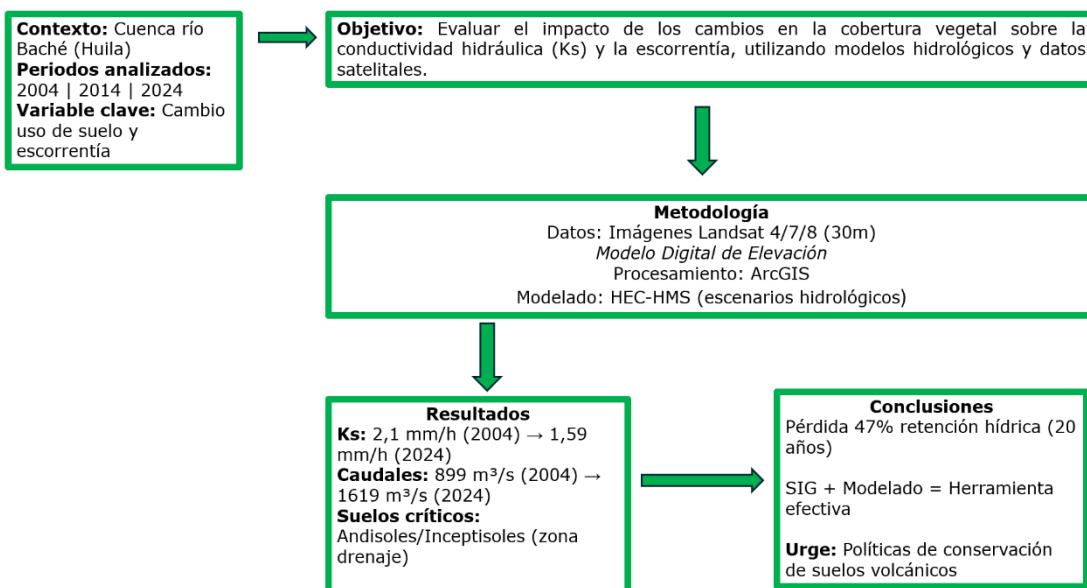
and Ks was calculated, and flow rates were compared.

Results: Progressive reduction in Ks: 2.1 mm/h (2004) to 1.59 mm/h (2024); Increase in runoff: 899 m³/s (2004, 44.29% forest) to 1619 m³/s (2024, 70.9% agriculture), with a greater impact on volcanic soils near the drainage network.

Conclusions: Forest conversion has reduced soil water retention capacity by 47% in 20 years. The integrated GIS modeling approach has proven effective in assessing hydrological impacts, highlighting the need for volcanic soil conservation policies.

Keywords: Watershed, runoff, HEC-HMS, hydraulic conductivity, infiltration.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: elaboración propia.

1 INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial, definida como el agua de precipitación que circula sobre el terreno hacia los cauces fluviales, constituye un componente crítico del ciclo hidrológico, cuya magnitud y temporalidad están directamente influenciadas por el cambio de uso del suelo y las propiedades hidrofísicas del suelo, particularmente la conductividad hidráulica, que determina la capacidad de infiltración del agua en el subsuelo. A partir de 2014, el Programa Hidrológico Internacional (PHI) fue implementado para paliar el menoscabo de las fuentes hídricas en América, enfocándose en la gestión sostenible de bosques, tierras y recursos hídricos (Howland & Francois Le Coq, 2022). Esta iniciativa facilitó la reforestación de aproximadamente cinco millones de árboles

nativos en zonas de alto impacto hidrológico en América del Sur, con especial atención en países como Brasil, Colombia, Ecuador y Perú (Marrero et al., 2024; Ruiz-Agudelo & Gutiérrez-Bonilla, 2025). En Colombia, la adaptación de políticas públicas en materia ambiental se vio reforzada durante el Decenio de las Naciones Unidas para los Desiertos y la Lucha Contra la Desertificación (2010-2014), lo que impulsó iniciativas como los proyectos LADA y GLASOD, promovidos por la FAO para evaluar y mitigar la degradación de tierras (Clerici et al., 2019). Estas acciones resultaron en la reforestación de alrededor de 800 hectáreas en departamentos como Caquetá, Cauca, Chocó, Huila y Nariño, empleando técnicas orientadas a la conservación de ecosistemas estratégicos

frente a la variabilidad climática (Rojas-Ospina et al., 2024).

No obstante, las tendencias globales revelaron que los suelos enfrentaban una situación crítica debido a los efectos acelerados del cambio climático (Rodríguez-Espinosa et al., 2025), generando desequilibrios hídricos y alteraciones significativas en los régimenes hidrológicos. La degradación química, biológica y física de los suelos, particularmente en áreas agrícolas (Leal et al., 2023), se agravó por prácticas inadecuadas como el manejo incorrecto de pendientes y la labranza intensiva (Esquivel et al., 2018). La reducción de la conductividad hidráulica, consecuencia de la compactación y pérdida de materia orgánica, limita la infiltración y aumenta la escorrentía superficial, exacerbando la erosión y reduciendo la recarga de acuíferos. En el departamento del Huila, esta problemática se intensifica por las proyecciones climáticas del Ideam, que indican un incremento de aproximadamente 2 °C en la temperatura para 2040 y una reducción del 30% en la disponibilidad de suelos aptos para agricultura (Gómez et al., 2023). Además, el Estudio Nacional del Agua (Cortés et al., 2022) evidenció la crítica situación hídrica de la región, con una oferta máxima de 549 m³/s y una oferta base de 213 m³/s en 2010, lo que refleja una presión creciente sobre los recursos hídricos (Cortés-Macías et al., 2022).

La cuenca del río Baché fue seleccionada como estudio de caso, debido a su importancia estratégica, económica y ambiental para el departamento del Huila. Con una superficie de 153 452,52 hectáreas, esta cuenca abastece de agua a municipios como Aipe, Neiva, Palermo, Santa María y Teruel,

sustentando actividades económicas clave como la agricultura y la ganadería (Burgos-Ayala et al., 2024). Además, alberga una alta diversidad de ecosistemas y su configuración hidrográfica, con un sistema de drenaje paralelo y ortogonal al cauce principal, la convierte en un modelo representativo para estudiar los impactos hidrológicos del cambio de uso del suelo. La cuenca está compuesta por tres subcuenca principales: río Baché (51,64% del área), río Yaya (16,22%) y río Tune (11,74%), con un caudal base de aproximadamente 12 m³/s que desempeña un papel crucial en la regulación hídrica regional (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004). La presencia predominante de andisoles e inceptisoles (49,8% del área), suelos particularmente vulnerables a la degradación antrópica, justifica su selección para evaluar cómo la transformación de coberturas vegetales altera los procesos hidrológicos.

En este sentido, la cuenca del río Baché presenta una génesis volcánica evidenciada por la predominancia de andisoles e inceptisoles (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004), suelos derivados de cenizas volcánicas se caracterizan por su mineralogía dominada por alofanos y ferrihidritos, que confieren propiedades únicas como alta capacidad de retención de humedad, baja densidad aparente y elevada afinidad por fosfatos (Sadeghian et al., 2019). La estratigrafía volcánica de la región, compuesta principalmente por depósitos piroclásticos del Complejo Volcánico Nevado del Huila, ha determinado la configuración geomorfológica de la cuenca, con pendientes pronunciadas en el flanco occidental, donde se originan los principales afluentes en las estribaciones del cerro

Chiflón y del cerro Chiquito. Los andisoles, clasificados como *Typic Fulvudands* y *Typic Hapludands*, muestran secuencias estratigráficas con horizontes ándicos de espesor variable (>35 cm), mientras que los inceptisoles (principalmente *Typic Dystrudepts* y *Humic Dystrudepts*) presentan desarrollo incipiente de horizontes subsuperficiales, reflejando la naturaleza juvenil de los materiales parentales de origen volcánico (IGAC, 2016). Esta composición edáfica particular influye directamente en la dinámica hidrológica de la cuenca, moderando los procesos de infiltración-percolación y determinando los patrones de escorrentía superficial observados en los modelos de simulación (Guduru et al., 2022; Leal et al., 2023).

Considerando esta problemática, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del río Baché durante el periodo 2004-2024, como consecuencia de las variaciones en las condiciones geomorfológicas e hidráulicas de-

rivadas de la expansión agrícola (Golubev et al., 2021). Para ello, se definieron dos objetivos específicos: (I) determinar el estado actual de la cuenca mediante el análisis de datos de precipitación y caudal para apoyar la planificación sostenible de los recursos hídricos, y (II) modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la geomorfología del suelo y la cobertura vegetal. La modelación hidrológica se empleó como herramienta fundamental para abordar los desafíos en la gestión y conservación del agua (Guduru et al., 2022), analizando las variaciones en la escorrentía superficial derivadas de las transformaciones en las condiciones geomorfológicas de los suelos y su cobertura en la cuenca del río Baché, contribuyendo así a la planificación sostenible del recurso hídrico en un contexto de crisis climática y variabilidad hídrica en el departamento del Huila (Arévalo-Hernández et al., 2024; Romero-Cuellar et al., 2018).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta el área de estudio y el diseño metodológico empleado en esta investigación.

Área de estudio

La cuenca del río Baché tiene una superficie total de 153 452,52 hectáreas, extendiéndose a través de varios municipios del departamento del Huila, Colombia, entre los cuales se incluyeron Aipe, Neiva, Palermo, Santa María y Teruel (Burgos-Ayala et al.,

2024). De acuerdo con información recopilada a partir del Sistema de Información Ambiental, esta zona fue fundamental para el equilibrio hídrico, tanto a nivel local como regional, ya que sostuvo los sectores de interés económico tales como la agricultura y la actividad ganadera (Camacho et al., 2018), las cuales dependieron significativamente de la disponibilidad de agua (Perdomo Moreno & Perdomo, 2004). Además, la cuenca albergó una amplia diversidad de ecosistemas, lo

que la posicionó como un área de gran importancia ecológica. En la figura 1 se ilustran la distribución geográfica y los límites muni-

ciales, resaltando los aspectos hidrológicos de la zona de estudio.

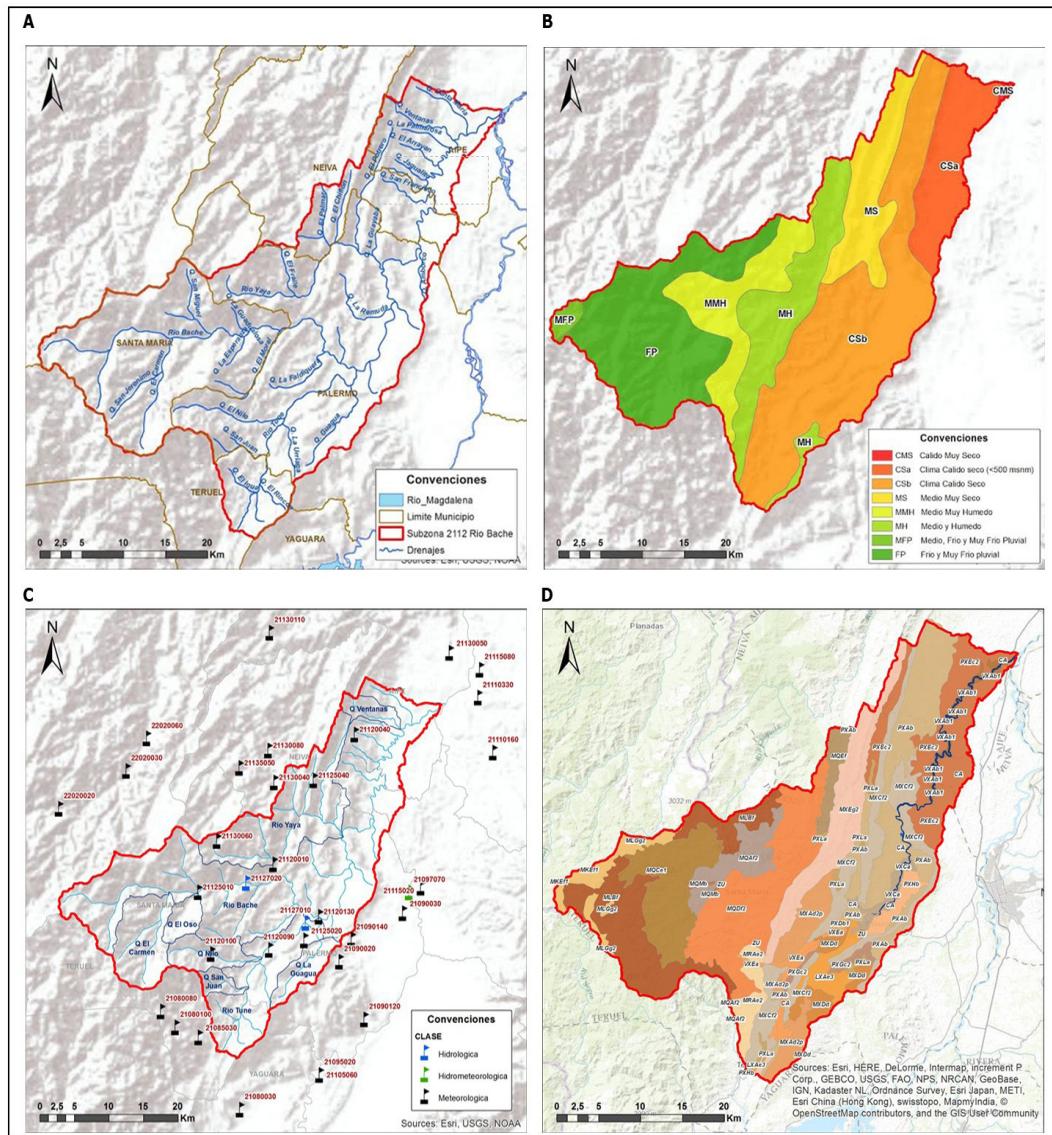


Figura 1. Caracterización de la cuenca del río Baché, (A) morfología de la cuenca, (B) clima de la cuenca, (C) estaciones meteorológicas de la cuenca y (D) caracterización de suelos de la cuenca

Fuente: elaboración propia.

Esta cuenca hidrográfica se caracteriza por presentar un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso fluvial

principal, el cual se origina en las estribaciones del cerro Chiflón y del cerro Chiquito, localizados en el flanco occidental, mientras

que en el sector oriental se desarrolla a partir de colinas suaves y elevaciones de baja pendiente. El cauce primordial sigue una trayectoria predominante en sentido meridional y nororiental, tal como se evidencia en los resultados consignados en la tabla 1. Este patrón de escurrimiento refleja la influencia de la geomorfología local, donde las formas

del terreno condicionan la red hidrográfica, generando una estructura ramificada con afluentes secundarios que convergen de manera perpendicular al eje principal del río.

Así, la red hidrográfica de la cuenca estuvo conformada por un conjunto de nueve afluentes, cuyas características se presentan en la tabla 1

Tabla 1.

Parámetros morfológicos de la cuenca del río Baché

Nombre del afluente	Perímetro (Km)	Superficie (Km ²)	Porcentaje de la Cuenca (%)
Río Baché	227,02	598,36	51,64
Río Yaya	87,75	187,91	16,22
Río Tune	78,59	136,01	11,74
Quebrada El Carmen	42,78	88,81	7,66
Quebrada Nilo	36,38	45,16	3,90
Quebrada La Guagua	33,16	38,22	3,30
Quebrada Ventanas	26,21	23,11	1,99
Quebrada El Oso	21,77	25,21	2,18
Quebrada San Juan	21,36	16,03	1,38

Fuente: elaboración propia.

El caudal del río Baché se calculó en aproximadamente 12 m³/s, valor que resultó altamente significativo para el departamento del Huila, destacando su papel crucial en la regulación hídrica de la zona. La cuenca del río Baché estuvo compuesta por tres subcuenca: la del río Yaya, que cubrió el 16,22 % del área; la del río Tune, con un 11,74 %, y la

del río Baché, que representó el 51,64 % de la superficie total, como se evidenció en la tabla 1.

Metodología

A continuación, se presenta el diseño metodológico empleado para cumplir cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

Diseño metodológico objetivo 1: Determinación el estado actual de la cuenca del río Baché mediante el análisis de datos de precipitación

Para el primer objetivo específico (Determinar el estado actual de la cuenca del río Baché mediante el análisis de datos de precipitación y caudal) se ejecutó una metodología integral que combinó caracterización morfométrica y análisis hidroclimatológico. Inicialmente, se realizó una caracterización detallada con base en un modelo digital de elevación (DEM) en formato raster, siguiendo la metodología descrita por Forestal et al. (2015). Este análisis morfométrico permitió establecer que la cuenca presenta un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso fluvial principal, con origen en las estribaciones del cerro Chiflón y del cerro Chiquito. La red hidrográfica se conformó por nueve afluentes, destacándose tres subcuenca principales: río Baché (51,64 % del área), río Yaya (16,22 %) y río Tune (11,74 %), según se evidencia en la tabla 1. El caudal base del río Baché se calculó en aproximadamente $12 \text{ m}^3/\text{s}$, valor de significativa importancia para la regulación hídrica regional.

Posteriormente, se recopilaron y procesaron datos hidroclimatológicos de las 24 estaciones meteorológicas del Ideam disponibles en la plataforma DHIME, abarcando series temporales de 2004 a 2024 y correspondientes a tres escenarios diferentes de usos y coberturas del suelo (Barrios-Perez et al., 2021). Para el análisis espacial de la precipitación, se aplicó el método de polígonos de Thiessen, considerando la distribución específica de las estaciones activas en cada escenario (17 en 2004, 14 en 2014 y 12 en 2024). Complementariamente, se emplearon técnicas de interpolación geoestadística mediante kriging y Nearest Neighbor para generar mapas de isoyetas con resolución de 100 m. El análisis estadístico *comprehensive* incluyó el cálculo de descriptores de tendencia central y dispersión, junto con la aplicación de regresión polinómica de quinto grado para identificar patrones no lineales en las series temporales. Este abordaje metodológico permitió establecer un balance hídrico robusto y simplificado, fundamental para la planificación sostenible de los recursos hídricos de la cuenca.

El diseño metodológico propuesto para este objetivo específico se presenta en la figura 2.

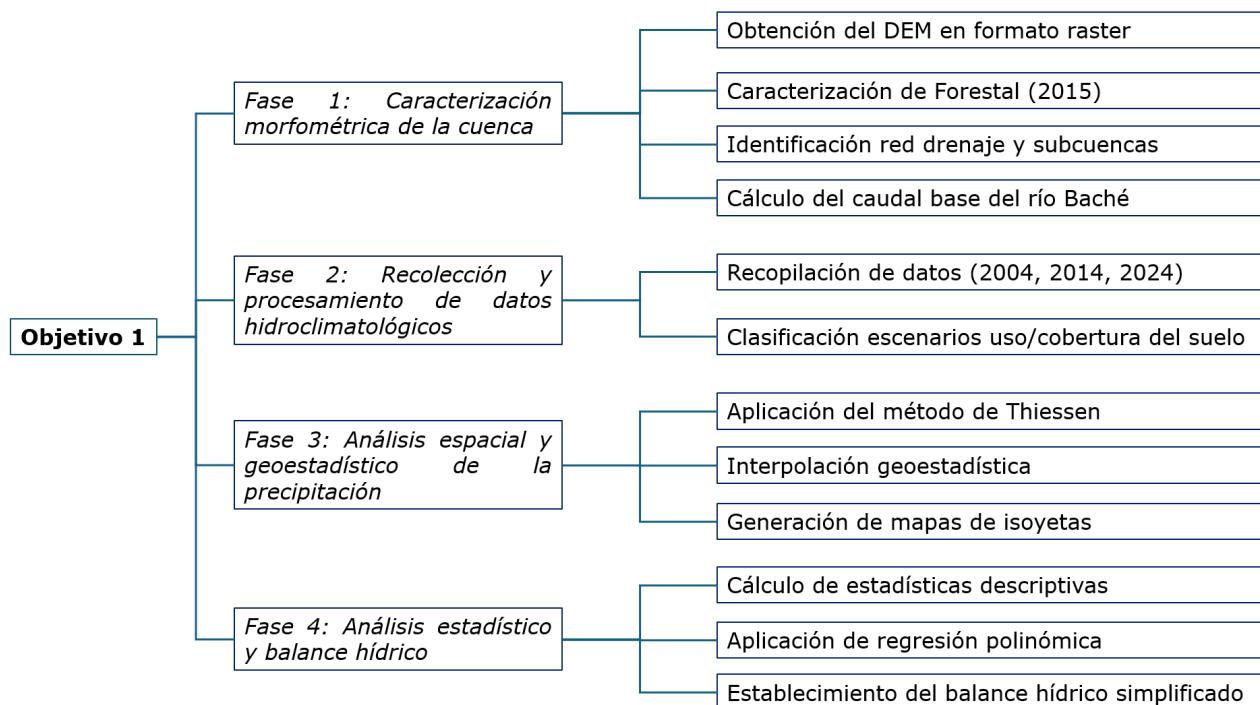


Figura 2. Diseño metodológico objetivo específico I

Fuente: elaboración propia.

Diseño metodológico objetivo 2: Modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la geomorfología del suelo y la cobertura vegetal en la cuenca

Para el segundo objetivo específico (Modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la cobertura vegetal y propiedades del suelo) se implementó una estrategia de modelación hidrológica avanzada. Inicial-

mente, se procesaron imágenes satelitales Landsat (4, 7 y 8) de los años 2004, 2014 y 2024 con resolución espacial de 30 m y escala 1:100.000 (Barrios-Perez et al., 2021), mediante clasificación supervisada que definió seis categorías de uso del suelo según referencias del IGAC. Simultáneamente, la caracterización edáfica se basó en datos del Geoportal del IGAC (Tabla 2), identificando que los andisoles e inceptisoles representan el 49,8% de la cuenca (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004).

Tabla 2.

Categorización de suelos en la cuenca del río Baché

Simbolo-gía IGAC	Orden	Subgrupo	Textura	Área (Ha)	Porc. Subg. (%)	Porc. Orden (%)
PXDb1	Al	Typic haplustalfs, typic haplustepts, typic argiustolls	Arena Arcilla	178,28	0,11	25,8
MKEf1	An	Typic fulvudands, typic udorthents, humic dystrudepts	Limo	29,74	0,02	
MLBf	An	Humic dystrudepts, typic udorthents, typic hapludands	Arena Limo	7296,13	4,42	
MQDf2	An	Typic hapludolls, entic hapludolls, lithic udorthents	Limo Arena	35197,75	21,30	
CA	Ca	Cuerpos de agua	Ca	8,43	0,01	
LXAe3	En	Entic haplustolls, typic ustorthents, lithic ustorthents	Limo Arcilla	2495,96	1,51	10,18
MLGg2	En	Typic udorthents	Limo	6474,26	3,92	
MXCf2	En	Typic ustorthents, lithic haplustolls, typic haplustepts	Limo Arena	1573,57	0,95	
PXEc2	En	Lithic ustorthents, typic ustorthents	Limo Arena	6250,17	3,78	
VXAb1	En	Fluventic haplustepts, aquic haplustepts, aquic ustifluvents, aquic endoaquepts	Arena Limo	40,45	0,02	
MQAf2	In	Tipic dystrudepts, typic udorthents	Limo Arcilla	17287,31	10,46	24,43
MQCe1	In	Humic dystrudepts, oxic dystrudepts, typic hapludands	Limo Arcilla	9418,97	5,70	
MQMb	In	Fluvaquentic eutrudepts, typic udifluvents, fluventic eutrudepts	Limo Arena	157,17	0,10	
MRAe2	In	Typic haplustepts, pachic haplustolls	Limo Arcilla	425,43	0,26	
MXDd	In	Humic haplustepts, ustic dystrudepts	Arena	10704,18	6,48	
PXAb	In	Typic haplustepts, fluventic haplustolls, typic ustifluvents	Limo Arcilla	546,81	0,33	

Simbolo-gía IGAC	Orden	Subgrupo	Textura	Área (Ha)	Porc. Subg. (%)	Porc. Orden (%)
PXGc2	In	Oxic haplustepts, typic dystrustepts	Arcilla Limo	324,84	0,20	24,43
PXHb	In	Plinthic endoaquepts	Arcilla Limo	1516,77	0,92	
MXEg2	Mr	Afloramientos rocosos, lithic ustorthents	Arena	22805,25	13,82	13,80
MQEf	Mo	Typic hapludolls, entic hapludolls, lithic udorthents	Limo Arena	39598,18	23,96	23,97
MXAd2p	O	Typic haplustolls, typic haplustepts	Limo	2200,08	1,33	1,77
PXLa	O	Typic ustifluvents, fluventic haplustolls, typic haplustepts	Limo Arena	198,43	0,13	
VXCa	O	Typic fluvaquents, vertic haplustepts, fluventic haplustolls	Limo	383,84	0,23	
VXEa	O	Typic haplustolls, typic natrustalfs	Limo Arcilla	129,09	0,08	
ZU	Zu	Zonas urbanas	Zu	4,73	0,00	0,003

Simbología, Al: alfisoles, An: Andisoles, Ca: cuerpos de agua, En: Entisoles, In: Inceptisoles, Mr: misceláneo rocoso, Mo: Molisoles, O: Oxisoles y Zu: zonas urbanas.

Fuente: elaboración propia.

El modelado hidrológico se implementó mediante el *software* HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020), utilizando específicamente el modelo de humedad del suelo (SMA) en su versión semidistribuida (Halwatura & Najim, 2013; Lin et al., 2023). La parametrización del modelo incorporó valores de intercepción diferenciados por cobertura vegetal (9 mm para áreas forestales, 3 mm para pastizales), almacenamiento en depresiones (50,8 mm), propiedades edáficas según Sadeghian et al. (2019) - profundidad de

3 m, porosidad de 0,453, Grupo Hidrológico C - y datos de evapotranspiración mensual. La conductividad hidráulica saturada (Ks) se estableció en 2,5 mm/h para la infiltración máxima y 0,6 mm/h para la percolación. Para la simulación del flujo base se implementó el método del reservorio lineal integrado en el módulo SMA de HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020; Uribe et al., 2020).

El diseño metodológico propuesto para este objetivo específico se presenta en la figura 3.

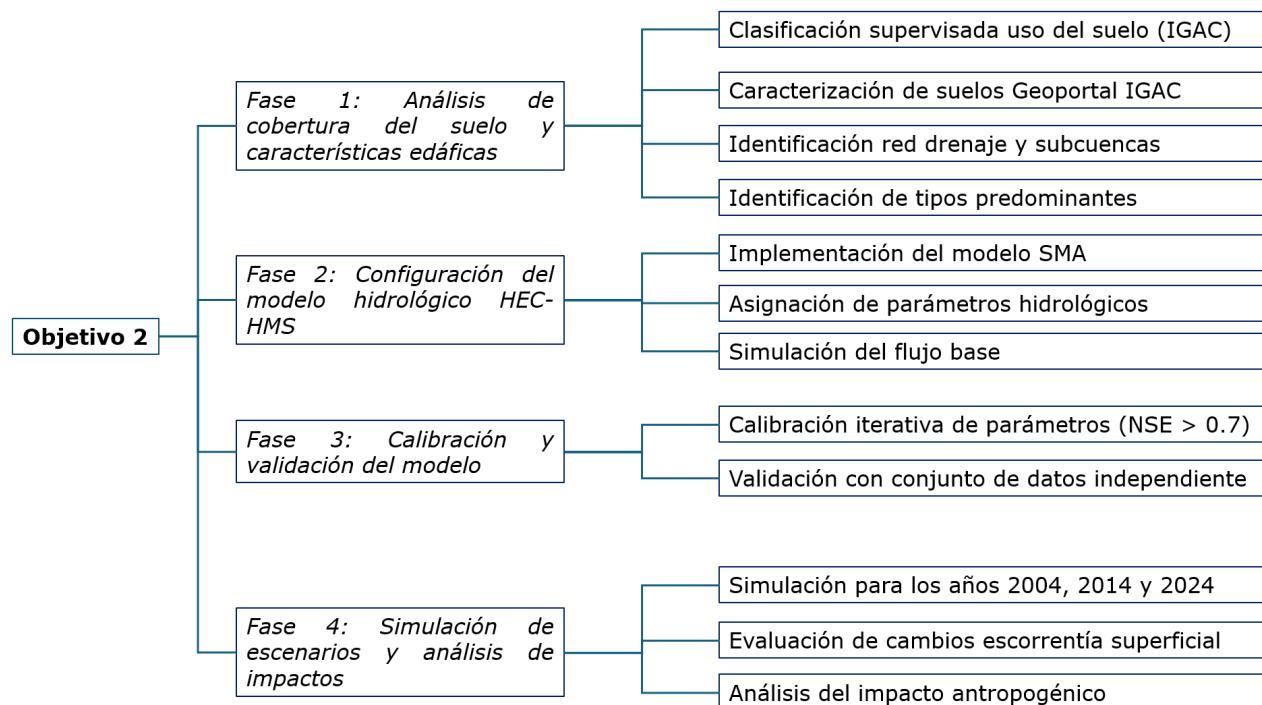


Figura 3. Diseño metodológico objetivo específico II

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en esta etapa del proceso, se realizó una calibración, ajustando iterativamente los parámetros hasta alcanzar valores de $NSE > 0,7$ y errores menores al 20 %, tanto en caudal pico como en volumen (Kastali et al., 2022). Finalmente, se simularon tres escenarios temporales de cobertura (2004, 2014, 2024) para cuantificar las variaciones en la escorrentía superficial generadas por la modificación de usos del suelo (Camacho et al., 2018; Bernal Núñez et al., 2023). Este análisis permitió evaluar los cambios en el caudal pico (de $899 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1619 \text{ m}^3/\text{s}$) y establecer la relación entre la reducción de la

conductividad hidráulica saturada (de 2,1 a $1,59 \text{ mm/h}$) y el incremento de la escorrentía superficial (Guduru & Mohammed, 2024). La validación del modelo se realizó con un conjunto de datos independiente, asegurando la robustez predictiva del mismo. La aplicación del modelo HEC-HMS demostró ser esencial para evaluar el impacto de cambios antropogénicos en el ciclo hidrológico (Kastali et al., 2022), proporcionando información crítica para la gestión sostenible de recursos hídricos en zonas vulnerables a cambios ambientales (Bernal Núñez et al., 2023).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los principales resultados encontrados en el de-

sarrollo de cada fase correspondiente al diseño metodológico.

Resultados del objetivo I: Determinación del estado actual de la cuenca

Fase 1: Caracterización morfométrica e hidrográfica

El análisis del DEM mediante la metodología de Forestal et al. (2015) permitió identificar que la cuenca del río Baché presenta un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso principal, conformado por nueve afluentes principales cuya configuración morfométrica se detalla en la tabla 1. Las subcuenca del río Baché (51,64 %), río Yaya (16,22 %) y río Tune (11,74 %) con-

centran el 79,6 % del área total, constituyendo las unidades hidrológicas dominantes. El caudal base se estimó en 12 m³/s, valor significativo para la regulación hídrica regional que evidencia la importancia estratégica de esta cuenca en el contexto departamental (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004).

Fase 2: Recolección y procesamiento de datos hidroclimatológicos

Se procesaron datos de las 24 estaciones del Ideam disponibles en la plataforma DHI-ME, identificando una reducción progresiva en la densidad de la red de monitoreo: 17 estaciones operativas en 2004, 14 en 2014 y solamente 12 en 2024 (Tabla 3).

Tabla 3.

Estaciones meteorológicas escenario abril de 2004, 2014 y 2024

Ne	Nombre estación	Altitud (m s.n.m.)	Área 2004 (ha)	Área 2004 (%)	Área 2014 (ha)	Área 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Área 2024 (%)
1***	La Mina	1800	5370,8	5,10	5370,8	5,1	5370,8	5,9
2***	El Totumo	700	8839,1	8,40	8839,1	8,4	8839,1	9,7
3*	El Cardo 2	480	1374,6	1,31	-	-	-	-
4**	Paraguay	1300	8922,7	8,47	10330,7	9,9	-	-
5***	Potrerito	850	15876,6	15,08	20374,7	19,5	20374,7	22,4
6***	El Volcán	1105	9923,8	9,43	9923,7	9,5	9923,7	10,9
7**	Palermo	550	2861,3	2,72	2861,5	2,7	-	-
8***	Rionegro	560	6362,0	6,04	7470	7,1	7470	8,2
9***	San Rafael	1030	4918,6	4,67	4918,7	4,7	4918,7	5,4

Ne	Nombre estación	Altitud (m s.n.m.)	Área 2004 (ha)	Área 2004 (%)	Área 2014 (ha)	Área 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Área 2024 (%)
10*	Santa Cecilia	450	230,9	0,22	-	-	-	-
11***	El Cúcharo	620	845,6	0,80	1118,8	1	1118,8	1,2
12***	Apto Benito Salas	439	214,2	0,20	220,9	0,2	220,9	0,2
13***	Santa María	1300	16968,9	19,2	16988,3	18,2	16968,3	18,6
14***	El Carmen	2250	5217,2	4,96	5217,1	5	5217,1	22,4
15***	San Luis	1140	2203,2	2,09	7035,8	6,7	7035,8	7,7
16*	San Francisco	825	11638,5	11,05	-	-	-	-
17***	Peña Rica	1780	3521,2	3,34	3521,2	3,3	3521,2	3,8

Nota: ha: hectárea; %: porcentaje; m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar;

*: 2004; **:2014; ***:2024

Fuente: elaboración propia.

Este deterioro en la infraestructura de monitoreo representa una limitante significativa para la gestión hidrológica. La estación Santa María mostró la mayor influencia areal (19,2 % en 2004, 18,2 % en 2014, 18,65 % en 2024), mientras que la estación Benito Salas presentó la menor contribución (0,20 - 0,24 %), como se evidencia en la configuración de polígonos de Thiessen de las figuras 4, 5 y 6.

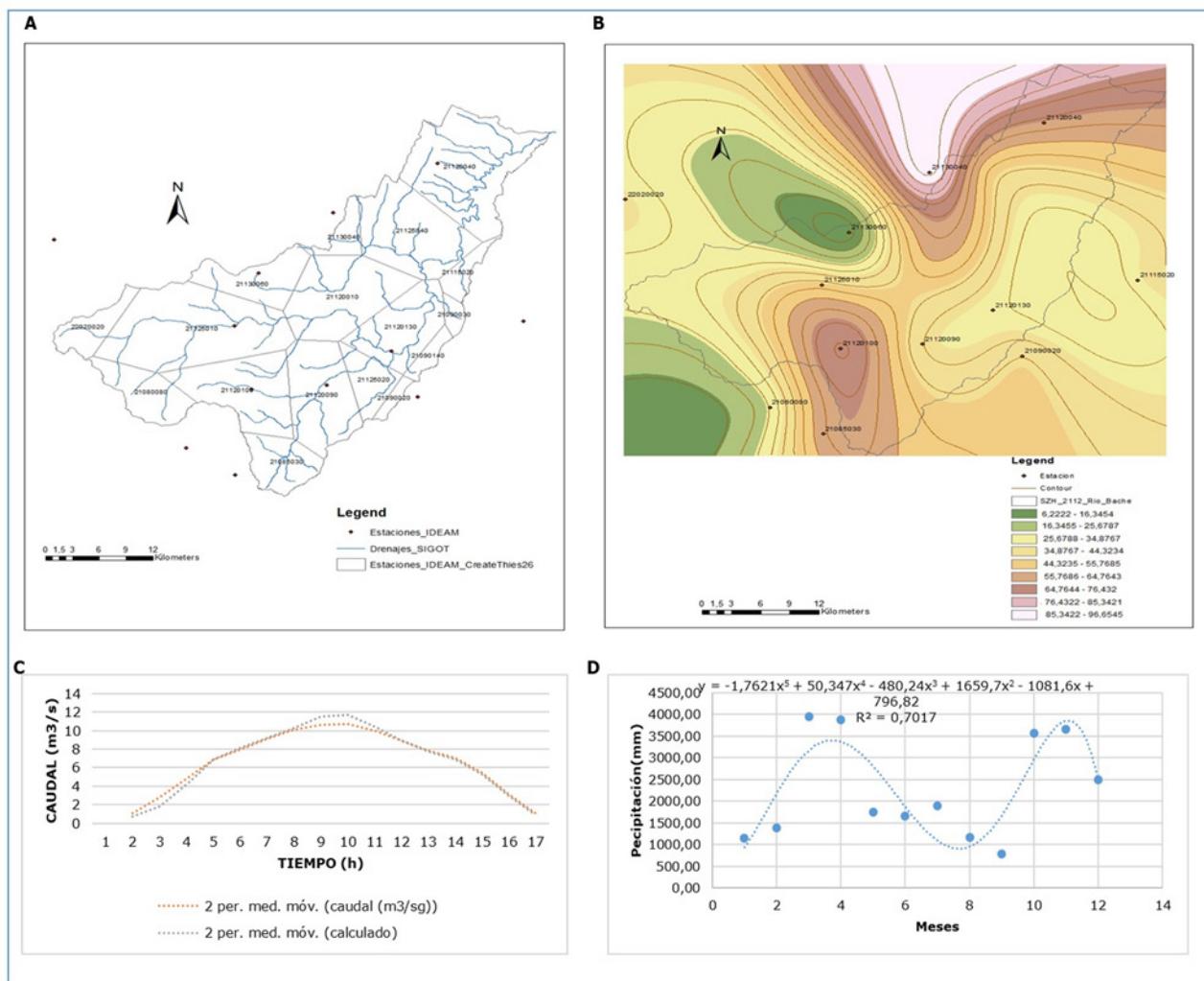


Figura 4. Calibración del año 2004, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D).

Fuente: elaboración propia.

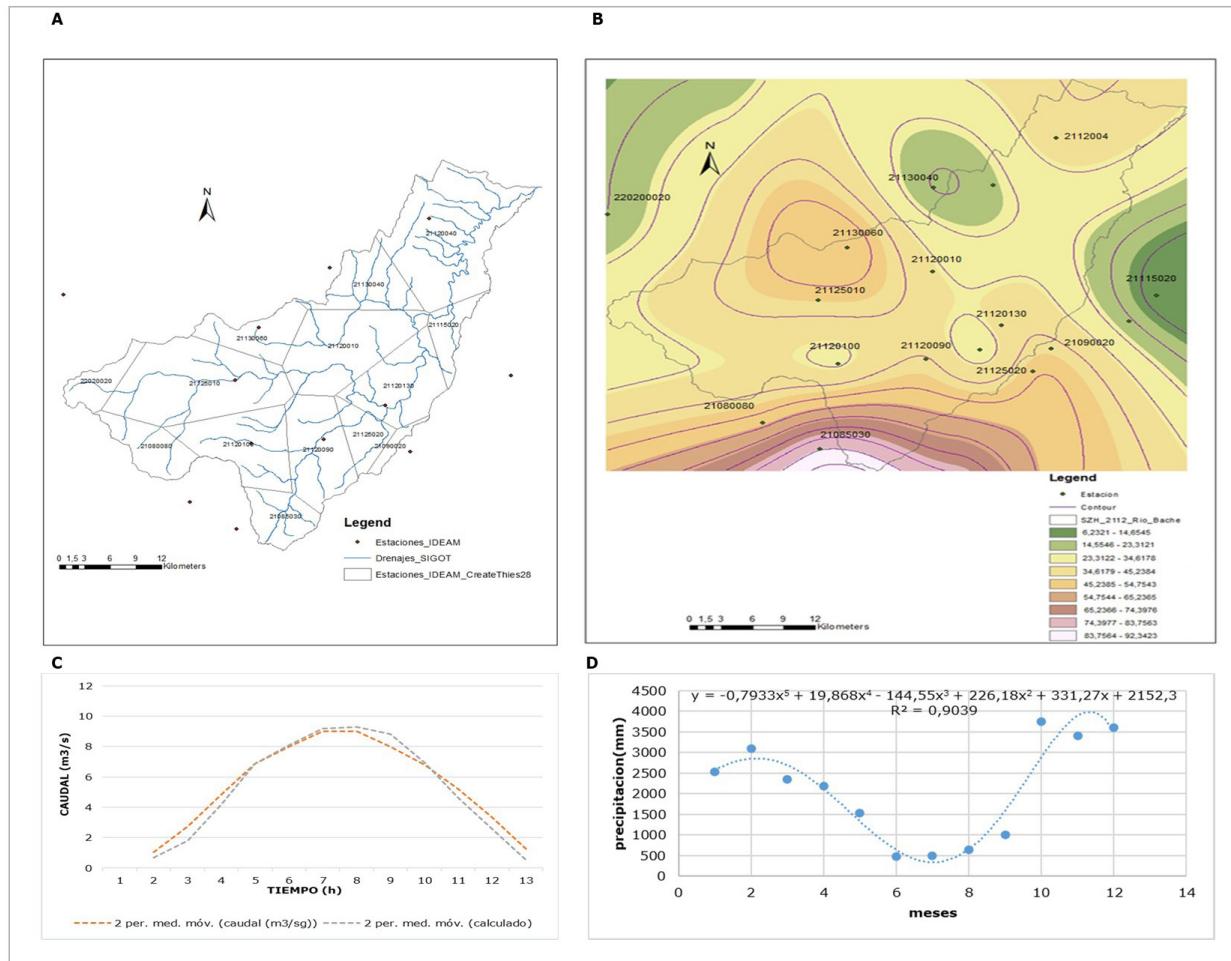


Figura 5. Calibración del año 2014, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D)

Fuente: elaboración propia.

El análisis hidrológico para el 2024 (Figura 6), ilustra la configuración espacial de 12 polígonos de Thiessen que representan la distribución de la precipitación en la cuenca. La estación meteorológica de Santa María resultó ser el principal punto de medición

de la precipitación, representando el 18,65 % de la precipitación total de la cuenca, mientras que la estación Benito Salas mostró la menor influencia, con una contribución de tan solo el 0,24 % a las mediciones de precipitación total.

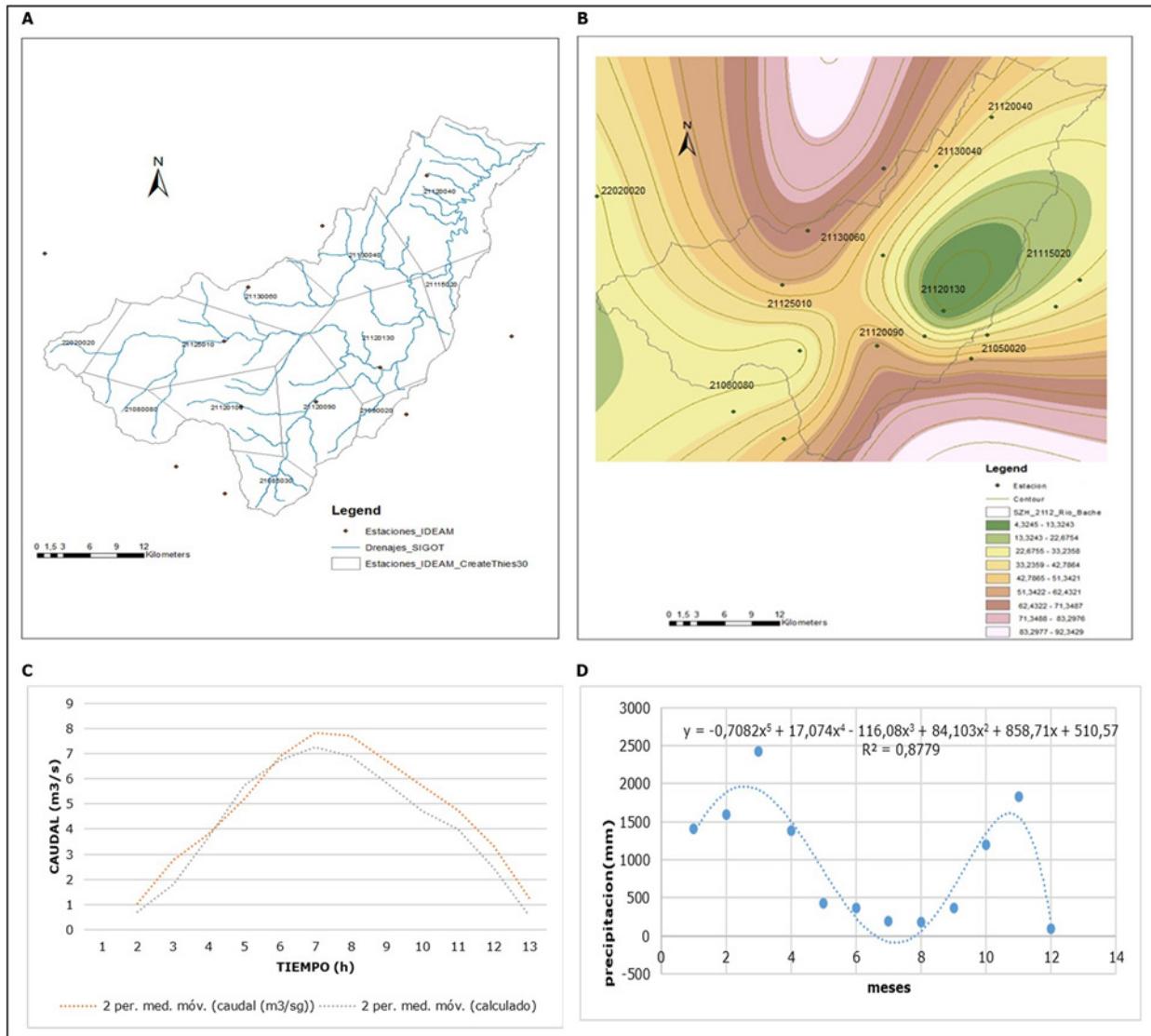


Figura 6. Calibración del año 2024, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D).

Fuente: elaboración propia.

Fase 3: Análisis espacial de la precipitación

La aplicación del método de Thiessen y técnicas de *kriging* ordinario implementadas en ArcGIS 10.5 permitió identificar patrones espaciales consistentes, con gradientes de precipitación nororiente-suroccidente en la mayoría de los eventos analizados. Los

eventos hidrológicos seleccionados (Tabla 4) mostraron precipitaciones entre 83 mm y 99 mm, con tiempos al pico de 58-68 horas, características típicas de sistemas convectivos de mesoescala. El coeficiente de escorrentía mostró una tendencia temporal creciente, variando de 0,13 (2004) a 0,18 (2024), lo que sugiere una alteración progresiva en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Tabla 4.

Parámetros de las tres tormentas estudiadas

Fecha	Precipitación (mm)	Caudal máx (m ³ /s)	Tiempo máx (h)	Escurrimiento directo (mm)	C
Abri-29/2004	99	11,74	58	13,4	0,13
Oct-15/2014	83	10,47	65	13,5	0,16
Mar-25/2024	95	9,11	68	14,5	0,18

Simbología, c: coeficiente de escorrentía

Fuente: elaboración propia.

Fase 4: Análisis estadístico y balance hídrico

La implementación de regresión polinómica de quinto grado reveló tendencias no lineales estadísticamente significativas en los parámetros hidrológicos analizados. Los volúmenes de escurrimiento directo representaron entre 45 % y 62 % del total precipitado, con coeficientes de escorrentía que

varian de 0,28 a 0,41 en función de la humedad antecedente del suelo (AMC). Estos valores, consistentes con estudios previos en cuencas adyacentes, confirman la representatividad de los resultados obtenidos. El análisis del balance hídrico incorporó los datos de evapotranspiración mensual presentados en la tabla 5, mostrando la marcada estacionalidad que caracteriza el régimen hidrológico de la cuenca.

Tabla 5.

Porcentajes de evaporación-evapotranspiración en la cuenca del río Baché

MESES												
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
0,63	0,59	0,43	0,57	0,59	0,78	1,20	1,48	0,99	0,9	0,88	0,86	

Fuente: elaboración propia.

Resultados del objetivo II: Modelación de cambios hidrológicos

Fase 1: Análisis de cobertura del suelo

El procesamiento de imágenes Landsat 4, 7 y 8 mediante clasificación supervisada y co-

rrección radiométrica con algoritmo COST (Kastali et al., 2022) mostró una transformación dramática del paisaje: las áreas forestales se redujeron del 43,24 % al 29,81 %, mientras que las áreas agrícolas aumentaron del 60,28 % al 72,12 % (Tabla 6). Los cultivos transitorios mostraron la expansión más no-

table, pasando del 3,38 % al 21 % del área total. Estos cambios se visualizan claramente en los mapas de la figura 7, donde la progre-

siva sustitución de coberturas naturales por usos antrópicos resulta evidente entre 2004 y 2024.

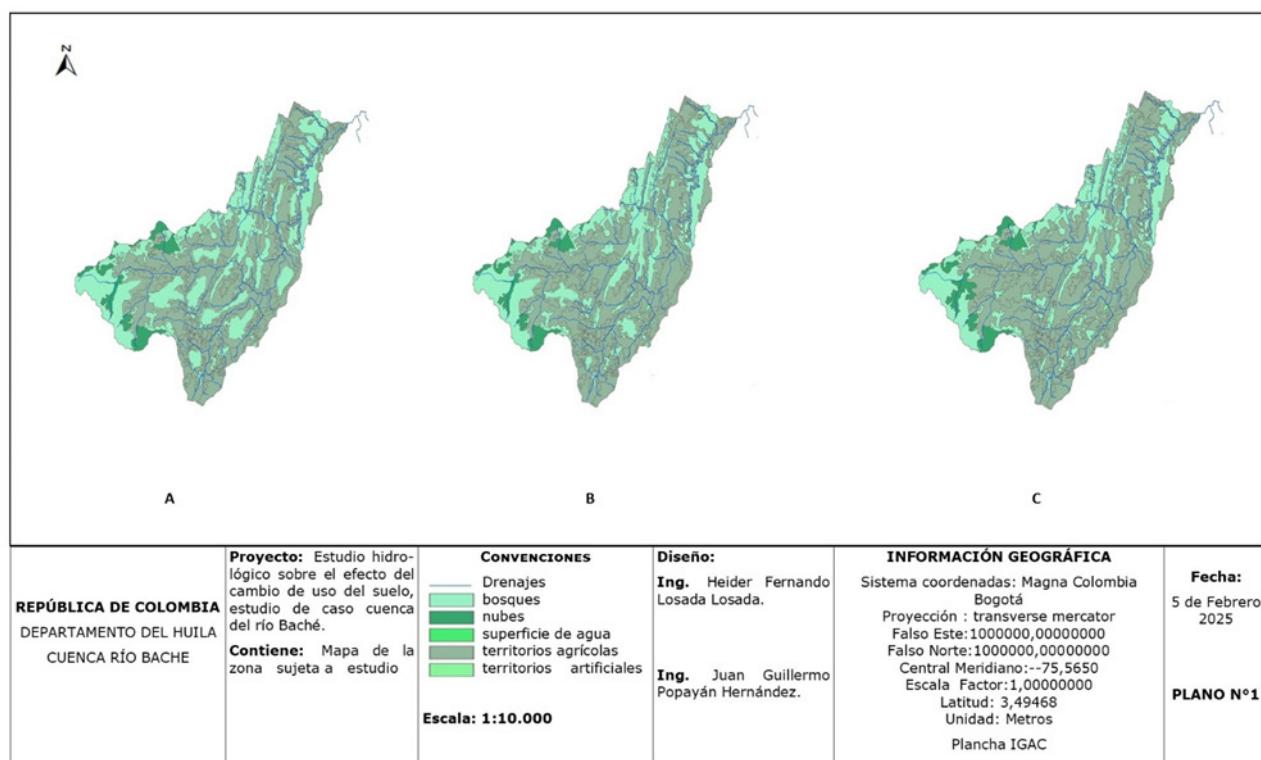


Figura 7. Escenarios de uso del suelo para la cuenta del río Baché para los años 2004 (A), 2014 (B) y 2024(C).

Fuente: elaboración propia.

Fase 2: Configuración del modelo HEC-HMS

La implementación del modelo SMA semidistribuido en HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020; Halwatura & Najim, 2013) incorporó una parametrización detallada que incluyó valores de intercepción diferenciados por cobertura (9 mm para áreas forestales, 3 mm para pastizales), almacenamiento en depresiones de 50,8 mm coherente con la topografía suave de la cuenca, y propiedades edáficas específicas obtenidas

del Geoportal IGAC (porosidad 0,453, profundidad 3 m, Grupo Hidrológico C). Los parámetros de conductividad hidráulica se establecieron en 2,5 mm/h para infiltración máxima y 0,6 mm/h para percolación, reflejando las características de los suelos predominantes (Sadeghian et al., 2019).

Fase 3: Calibración y validación

El proceso de calibración iterativa permitió alcanzar valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,71, con errores inferiores al 20 %, tanto en caudal pico como en

volumen de escorrentía. Los parámetros modificados durante la calibración (Tabla 6) mostraron ajustes particularmente significativos en conductividad hidráulica (KSAT

reducido de 220 a 0,42), porosidad (de 0,432 a 0,42) y composición textural (aumento del contenido de arcilla de 0,09 a 0,71).

Tabla 6.

Parámetros modificados

Parámetro	Valor por defecto	Valor modificado
MAN	0,057	0,22
CV	0	1
KSAT	220	0,42
G	109	407
DIST	0,845	0,341
POR	0,432	0,42
PCT_CLAY	0,09	0,71
PCT_SILT	0,03	0,38
PCT_SAND	0,70	0,27
COH	0,002	0,006

Simbología, MAN: Valor que indica la rugosidad superficial en la cuenca según Manning; G: Media de la fuerza capilar, expresada en milímetros; POR: Capacidad de retención de agua en el suelo (volumen de poros por unidad de volumen total); SMAX: Nivel máximo de saturación posible en el medio poroso; CV: Medida de la dispersión de la conductividad hidráulica saturada (KS); PCT_CL: Proporción de partículas de arcilla en el suelo (rango 0-1); PCT_SI: Proporción de partículas de limo en el suelo (rango 0-1); PCT_SAND: Proporción de partículas de arena en el suelo (rango 0-1); PCT_CLAY: Igual que PCT_CL, representa el contenido de arcilla; PCT_SILT: Igual que PCT_SI, representa el contenido de limo; DIST: Parámetro que describe la heterogeneidad en el tamaño de los poros; COH: Medida de la resistencia a la separación de partículas del suelo; KSAT: Velocidad máxima de infiltración de agua en el suelo, en condiciones de saturación (mm/h).

Fuente: elaboración propia.

Estos ajustes reflejan el deterioro físico de los suelos documentado en estudios previos

(Leal et al., 2023) y validan la representatividad del modelo implementado.

Fase 4: Simulación de escenarios y análisis de impactos

Las simulaciones para los tres escenarios temporales (Figura 8) mostraron un incre-

mento progresivo y estadísticamente significativo en los caudales pico: 897 m³/s (2004), 1110,76 m³/s (2014) y 1612 m³/s (2024).

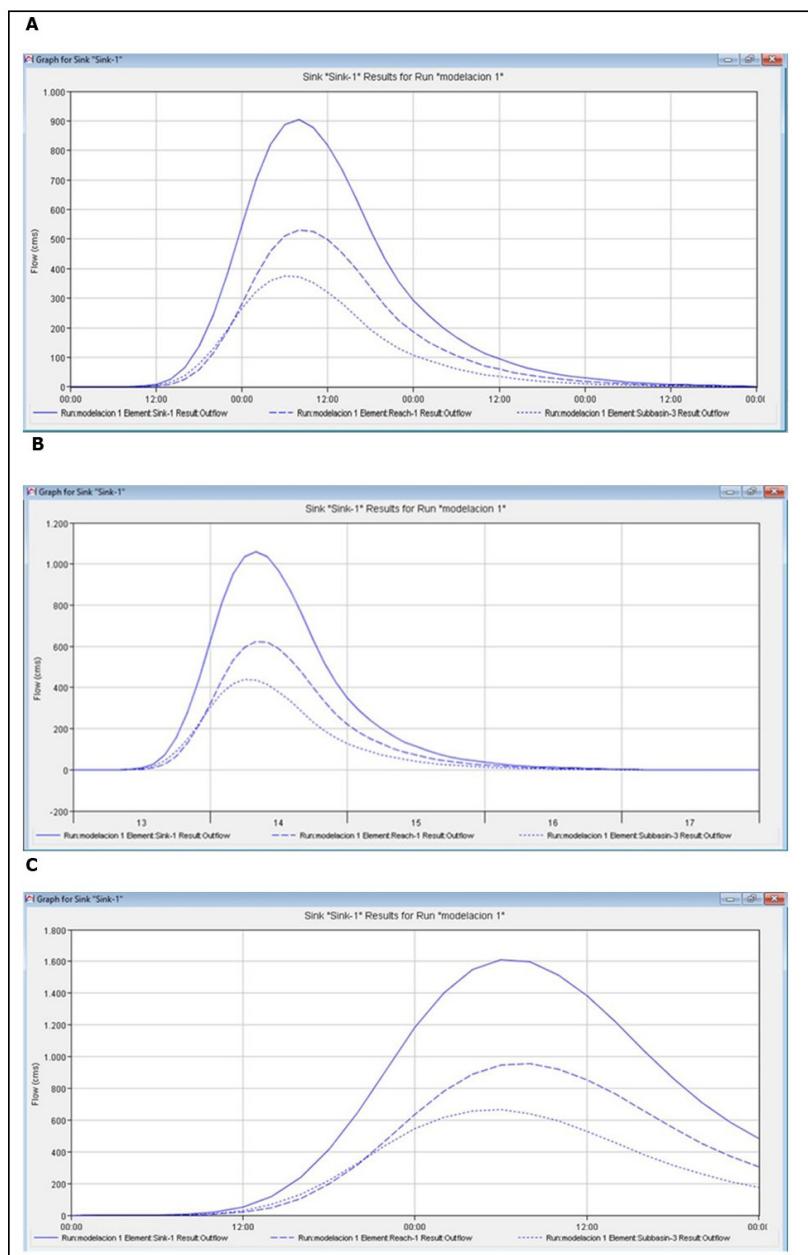


Figura 8. Modelación de los escenarios 2004(A),2014(B) y 2024(C)
Fuente: elaboración propia.

Simultáneamente, la conductividad hidráulica saturada mostró una reducción consistente de 2,1 mm/h a 1,59 mm/h, evidenciando el deterioro de las propiedades hidrofísicas del suelo. Los parámetros hidrológicos promedio (Tabla 7) mostraron

variaciones menores en capacidad de intercepción (1,26-1,29 mm) y cobertura vegetal (28,47 % - 29,27 %), mientras que el coeficiente de Manning se mantuvo constante en 0,145 para los períodos 2014-2024.

Tabla 7.

Valores de la cuenca del río Baché

Cobertura	Int. (mm)	Cover. (%)	N (manning)	R
2004	1,29	28,47	0,149	0,76
2014	1,22	28,61	0,145	0,78
2024	1,26	29,27	0,145	0,78

Simbología, R: Coeficiente de Nasch Sutcliffe

Fuente: elaboración propia.

La robustez del modelo HEC-HMS quedó demostrada mediante su capacidad para simular adecuadamente el comportamiento hidrológico en una cuenca de gran tamaño (>100,000 ha), capturando las complejas interacciones entre los cambios de cobertura vegetal y la respuesta hidrológica. Los resultados confirman que la expansión agrícola y la consecuente reducción de la cobertura forestal han alterado significativamente el ré-

gimen hidrológico de la cuenca, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. Estos hallazgos tienen implicaciones críticas para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región, particularmente en el contexto de cambio climático y creciente presión antrópica (Bernal Núñez et al., 2023; Guduru et al., 2022).

4 CONCLUSIONES

Esta investigación demostró una disminución progresiva de la conductividad hidráulica saturada (K_s) de 2,1 mm/h (2004) a 1,79 mm/h (2014) y, finalmente, a 1,59 mm/h (2024), reducción directamente asociada a la expansión agrícola y la degradación de las propiedades físicas del suelo. Se observó

una reducción de 14,35 puntos porcentuales en la cobertura forestal total, afectando particularmente a los andisoles e inceptisoles derivados de cenizas volcánicas, los cuales representan el 50,19 % del área de la cuenca y mostraron especial vulnerabilidad al deterioro estructural bajo cultivos transitorios.

Estos cambios alteraron fundamentalmente las propiedades hidrológicas del suelo, reduciendo su capacidad de retención de humedad y acelerando significativamente los procesos de escorrentía superficial.

El modelo HEC-HMS calibrado reveló un aumento de aproximadamente 24% en la escorrentía total de la cuenca y en los caudales máximos entre 2004 y 2014, con una tendencia ascendente continua hasta 2024. Esta respuesta hidrológica se correlacionó estrechamente con la conversión de la vegetación nativa a usos agrícolas, especialmente en los andisoles propensos a la erosión ubicados cerca de las redes de drenaje. El análisis de tormentas demostró que, en los escenarios actuales, la pérdida de cobertura vegetal y de permeabilidad del suelo (K_s) genera picos de caudal que exceden la capacidad de retención de la cuenca.

La integración metodológica de HEC-HMS con SIG y técnicas de teledetección resultó efectiva para evaluar cuantitativamen-

te los impactos del cambio de uso del suelo sobre el régimen hidrológico, proporcionando herramientas confiables para la planificación sostenible de los recursos hídricos. Los hallazgos obtenidos cumplen satisfactoriamente con el objetivo general de evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial durante el periodo 2004-2024, así como con los objetivos específicos de determinar el estado actual de la cuenca y modelar los cambios hidrológicos resultantes de las transformaciones en la geomorfología y cobertura vegetal. Para investigaciones futuras se recomienda incorporar: 1) análisis ampliado de eventos hidrológicos extremos, 2) mediciones cuantitativas *in situ* de la erosión del suelo, y 3) modelado de escenarios de cambio climático. Estas aproximaciones mejorarán sustancialmente la capacidad predictiva para la gestión sostenible de cuencas en contextos de crecientes presiones antropogénicas y variabilidad climática.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: recolección de datos escritura, análisis y edición.

Autor 2: escritura, corrección y análisis.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

De acuerdo con el documento *Líneamientos para el uso de la IA en publi-*

caciones con el Sello Editorial UNAD emitido por Editorial Sello Editorial UNAD, los

autores manifiestan que en la revisión final de este artículo se usó la herramienta de IA de código abierto denominada DeepSeek (disponible en <https://www.deepseek.com/>), específicamente en el proceso de edición del texto; el uso de esta herramienta contribuyó a disminuir los errores gramaticales. Así

mismo, los autores manifiestan que esta herramienta de IA se usó responsablemente, sin incurrir en posibles vulneraciones de derechos de autor o plagio. Finalmente, se indica que se usó el gestor bibliográfico Mendeley para la consolidación de la sección de Literatura citada.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Ciencias de la Información Geográfica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz, por el

apoyo logístico y el préstamo de los equipos para el análisis de la información empleada en esta investigación.

LITERATURA CITADA

Arévalo-Hernández, J. J., Medeiros de Oliveira, E., Araújo e Silva Ferraz, G., Polanía-Montiel, D. C., Liscano Solano, A. L. & Naves Silva, M. L. (2024). The delineation of management zones using soil quality indices for the cultivation of irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in Huila, Colombia. *Geoderma Regional*, 39, e00886. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00886>

Barrios-Perez, C., Okada, K., Garcés Várón, G. , Ramirez-Villegas, J., Rebolledo, M. C., & Prager, S. D. (2021). How does El Niño Southern Oscillation affect rice-producing environments in central Colombia? *Agricultural and Forest Me-*

teorology, 306. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108443>

Bernal Núñez, A. P. B., Gutiérrez-Montes, I., Hernández-Núñez, H. E., Gutiérrez Suárez, D. R. , Gutiérrez García, G. A., Suárez, J. C., Casanoves, F., Flora, C. & Sibelet, N. (2023). Diverse farmer livelihoods increase resilience to climate variability in southern Colombia. *Land Use Policy*, 131, 106731. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106731>

Burgos-Ayala, A., Jiménez-Aceituno, A., Meacham, M., Rozas-Vásquez, D., Mancilla García, M., Rocha, J. & Rincón-Ruiz, A. (2024). Mapping ecosystem services in

- Colombia: Analysis of synergies, trade-offs and bundles in environmental management. *Ecosystem Services*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101608>
- Camacho, W. A., Camacho, W. A., & Uribe, D. A. (2018). Estimación de la huella hídrica azul y verde de la producción cafetera en ocho cuencas en el sur del Departamento del Huila. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 338-354. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2284>
- Castro, C. V. & Maidment, D. R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling and Software*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104732>
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. & Villegas, J. C. (2019). Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, 685, 1181-1192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275>
- Cortes, J., Castro, A., Arboleda, G., Sepulveda, V., Piragauta, N. & Higuera, O. (2022). Hydrogeological and hydrogeochemical evaluation of groundwaters and surface waters in potential coalbed methane areas in Colombia. *International Journal of Coal Geology*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103937>
- Cortés-Macías, E. T., Fuentes López, C. , Gentile, P., Girón-Hernández, J. & Fuentes López, A. (2022). Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia. *Postharvest Biology and Technology*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111852>
- Esquivel, A., Llanos-Herrera, L., Agudelo, D., Prager, S. D., Fernandes, K., Rojas, A., Valencia, J. J. & Ramirez-Villlegas, J. (2018). Predictability of seasonal precipitation across major crop growing areas in Colombia. *Climate Services*, 12, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.cliserv.2018.09.001>
- Golubev, V., McCarter, C. & Whittington, P. (2021). Ecohydrological implications of the variability of soil hydrophysical properties between two Sphagnum moss microforms and the impact of different sample heights. *Journal of Hydrology*, 603(part B). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126956>
- Gómez, D., Aristizábal, E., García, E. F., Marín, D., Valencia, S. & Vásquez, M. (2023). Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 125, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>
- Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A. & Namarra, W. G. (2022). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki river watershed, rift valley basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104743>

- Guduru, J. U. & Mohammed, A. S. (2024). Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 17, 101017. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017>
- Halwatura, D. & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Howland, F. & Francois Le Coq, J. (2022). Disaster risk management, or adaptation to climate change? The elaboration of climate policies related to agriculture in Colombia. *Geoforum*, 131, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.02.012>
- IGAC. (2016). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Huila. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/14145393>
- Kastali, A., Zeroual, A., Zeroual, S. & Hamitouche, Y. (2022). Auto-calibration of HEC-HMS Model for Historic Flood Event under Rating Curve Uncertainty. Case Study: Allala Watershed, Algeria. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 482-493. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1051-4>
- Leal, J., Avila, E. A., Darghan, A. E. & Lobo, D. (2023). Spatial modeling of infiltration and its relationship with surface coverage of rock fragments and porosity in soils of an andean micro-watershed in Tolima (Colombia). *Geoderma Regional*, 33, e00637. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00637>
- Lin, Q., Lin, B., Zhang, D., Wu, J. & Chen, X. (2023). HMS-REST v1.0: A plugin for the HEC-HMS model to provide RESTful services. *Environmental Modelling and Software*, 170, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105860>
- Marrero, V., Baena, D., Berrio-Giraldo, L., Villegas-Palacio, C., Berrouet, L. & Ez-zine-De-Blas, D. (2024). Complexity of sustainable trajectories of a socioecological system. An application of the wayfinder guide in the tropical andes (Colombia). *Environmental Science and Policy*, 156, 103747. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103747>
- Perdomo Moreno, H. y Perdomo, L. J. (2004). Cuencas hidrográficas estratégicas para el desarrollo de la irrigación y otros proyectos hidráulicos en el Departamento del Huila. *Ingeniería y Región*, 3, 66-73. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432312&info=resumen&idioma=SPA>
- Rodriguez-Espinosa, C. A., Valencia, C. F., Ramirez, C. G. & Valencia, C. D. (2025). Dynamic effect of climate change on flood damage cost in the Andean region of Colombia using an ARDL-ECM model and climate change projections. *Sustainable Cities and Society*, 125, 106309. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106309>
- Rojas-Ospina, A., Zuñiga-Collazos, A. & Castillo-Palacio, M. (2024). Factors influencing environmental sustainability performance: A study applied to coffee

crops in Colombia. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(3), 100361 <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100361>

Romero-Cuéllar, J., Buitrago-Vargas, A., Quintero-Ruiz, T. & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, 5(1), 63-78. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>

Ruiz-Agudelo, C. A. & Gutiérrez-Bonilla, F. de P. (2025). The natural capital of the Colombian Caribbean Basins. Evidence of rapid anthropic transformation. *Sustainable Futures*, 9, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100524>

Sadeghian, S., Alarcon, V. F., Díaz-Poveda, V., Lince-Salazar, L. A. & Rey-Sandoval, J. C. (2019). Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición. *En Centro Nacional de*

Investigaciones de Café (Ed.), Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila, 80-105. https://doi.org/10.38141/10791/0005_4

Uribe, N., Srinivasan, R., Corzo, G., Arango, D. & Solomantine, D. (2020). Spatio-temporal critical source area patterns of runoff pollution from agricultural practices in the Colombian Andes. *Ecological Engineering*, 149, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105810>

Vargas, W. (2015). Una breve descripción de la vegetación, con especial énfasis en las pioneras intermedias de los bosques secos de la Jagua, en la cuenca alta del Rio Magdalena en el Huila. *Colombia Forestal*, 18(1), 47-70. <https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2015.1.A03>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 14-05-2025
Fecha de aceptado: 08-10-2025
DOI: 10.22490/21456453.9874

EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL DEL MUNICIPIO DE AIPE, HUILA, COLOMBIA, Y SUS RESERVAS NATURALES DE LA SOCIEDAD CIVIL DURANTE LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS

MULTITEMPORAL ASSESSMENT OF LAND COVER IN THE MUNICIPALITY OF AIPE, HUILA, COLOMBIA, AND ITS CIVIL SOCIETY NATURE RESERVES OVER THE PAST 30 YEARS

Diego Alejandro Tello-Ochoa ¹

María Daniela Pulido-Osorio ²

Carmen Elena Barragán-Ruiz ³

Citación: Tello-Ochoa, D.A., Pulido-Osorio, M.D., Barragán-Ruiz, C.E. (2026). Evaluación multitemporal de la cobertura vegetal del municipio de Aipe, Huila, Colombia, y sus reservas naturales de la sociedad civil durante los últimos 30 años. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 295 - 317. <https://doi.org/10.22490/21456453.9874>

¹ Biólogo, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. diegochoa1998@hotmail.com

² Especialista Sistemas de Información Geográfica, Fundación Universitaria Navarra-Uninavarra, Neiva, Colombia. maria.pulidoosorio8@gmail.com

³ Doctora en Ecología y Recursos Naturales, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil. car.hele.ruiz@gmail.com

RESUMEN

Contextualización: Las actividades antrópicas son responsables por la transformación de los ecosistemas, alterando visiblemente su estructura ecológica y funcionalidad. En Colombia, uno de los biomas más impactados por estas transformaciones es el bosque seco tropical, presente en áreas restringidas del país. El municipio de Aipe alberga relictos de este ecosistema, destacándose por su relevancia ecológica y necesidad de conservación.

Vacío de conocimiento: A pesar de la reconocida presencia de bosque seco tropical en Aipe, persiste un vacío de conocimiento acerca de la dinámica de su cobertura vegetal en las últimas décadas, especialmente frente al impacto de las actividades antrópicas y los procesos de desertificación. Esta limitación restringe la comprensión de las transformaciones del paisaje y dificulta la formulación de estrategias eficaces de conservación y manejo. En este contexto, resulta prioritario generar información actualizada que permita evaluar con precisión los cambios en la cobertura vegetal y orientar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental a escala local.

Propósito: Evaluar la cobertura vegetal del municipio de Aipe y sus reservas naturales de la sociedad civil a partir de un análisis multitemporal durante 30 años con uso de los Sistemas de Información Geográfica.

Metodología: Se aplicó clasificación supervisada mediante el algoritmo de “Máxima probabilidad”, realizando análisis con el índice de grado de fragmentación, conectividad y matrices de transición a la cobertura boscosa usando el software libre Qgis en su versión 3.28 y la extensión SemiAutomátic Classification Plugin - SCP versión 7.10.11.

Resultados y conclusiones: Entre 1992 y 2022, el municipio de Aipe experimentó una reducción de su cobertura boscosa, que descendió del 41,6% al 34,1% (-5.993 ha), mientras los pastizales y áreas agrícolas aumentaron progresivamente, confirmando la expansión agropecuaria como principal motor de transformación del paisaje. El análisis reveló que los bosques fueron remplazados primero por vegetación herbácea (1992-2010) y luego por pastos (2010-2022), con cambios estadísticamente significativos. El índice de fragmentación evidenció un deterioro progresivo ($R^2 = 0,9229$), reflejando pérdida de conectividad y tendencia hacia la insularización de los parches. En las Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC), la cobertura mostró mayor estabilidad inicial, pero entre 2010 y 2022 se evidenció un aumento significativo de pastos.

Palabras clave: antropización, clasificación supervisada, fragmentación del bosque, paisaje, SIG.

ABSTRACT

Contextualization: Anthropogenic activities are responsible for the transformation of ecosystems, visibly altering their ecological structure and functionality. In Colombia, one of the most impacted biomes by these transformations is the Tropical Dry Forest, which is restricted to limited areas of the country. The municipality of Aipe harbors remnants of this ecosystem, standing out for its ecological relevance and urgent need for conservation.

Knowledge gap: Despite the acknowledged presence of Tropical Dry Forest in Aipe, there remains a gap in knowledge regarding the dynamics of its vegetation cover over the past decades, particularly in relation to the impacts of human activities and desertification processes. This limitation constrains the understanding of landscape transformations and hinders the development of effective conservation and management strategies. In this context, generating updated information to accurately assess vegetation cover changes is a priority for guiding local-scale environmental management decisions.

Purpose: To assess the vegetation cover of the municipality of Aipe and its Civil Society Nature Reserves through a 30-year multitemporal analysis using Geographic Information Systems.

Methodology: Supervised classification was applied using the Maximum Likelihood algorithm, complemented by analyses of the fragmentation index, connectivity, and transition matrices of forest cover. The analyses were performed in QGIS version 3.28 with the Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) version 7.10.11.

Results and conclusions: Between 1992 and 2022, Aipe experienced a decline in forest cover from 41.6% to 34.1% (-5,993 ha), while grasslands and agricultural areas progressively expanded, confirming agricultural development as the main driver of landscape transformation. The analysis revealed that forests were initially replaced by herbaceous vegetation (1992–2010) and subsequently by pastures (2010–2022), with statistically significant changes. The fragmentation index showed a progressive deterioration ($R^2 = 0.9229$), indicating a loss of connectivity and a trend toward patch insularization. In the Civil Society Nature Reserves (RNSC), vegetation cover exhibited greater initial stability; however, between 2010 and 2022, a marked increase in pastures was detected.

Keywords: Anthropization, Forest fragmentation, GIS. Landscape, Supervised classification.

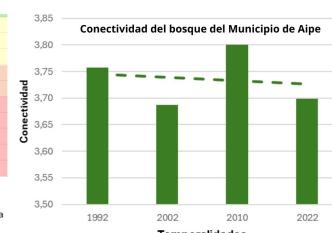
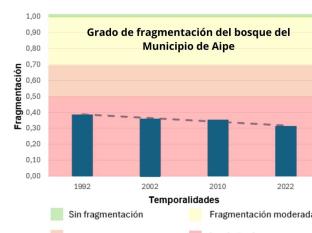
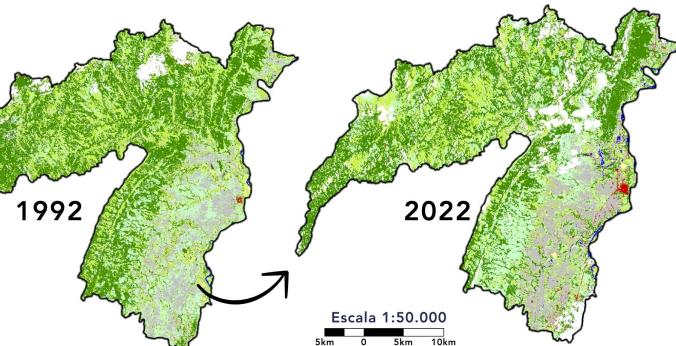
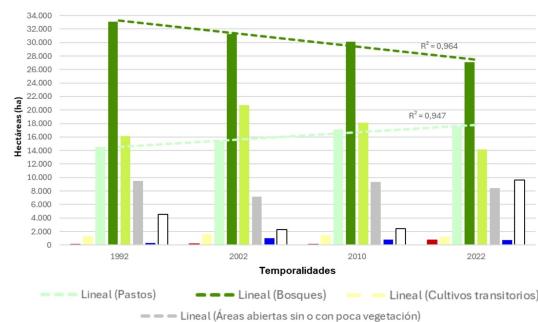
RESUMEN GRÁFICO

Cambios del Municipio de Aipe (1992-2022)

- Aumento en 2998 ha de Pastos
 - Disminución de 5993 ha de Bosque
 - Disminución de 2003 ha de Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
 - Tendencias lineales en la perdida de cobertura boscosa y tendencia a la ganancia de coberturas pastosas.

Levenda de coberturas

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1.1 - Zonas urbanizadas | 3.2 - Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva |
| 2.1 - Cultivos transitorios | 3.3 - Áreas abiertas, sin o con poca vegetación |
| 2.3 - Pastos | 5.1 - Aguas continentales |
| 3.1 - Bosques | 6.1 - Nubes y sombras |



Aumento del grado de fragmentación y disminución de conectividad del bosque del municipio de Aipe,

① INTRODUCCIÓN

La cobertura vegetal es la capa natural que cubre una superficie terrestre determinada y que comprende diferentes características ambientales (Aldás, 2013). Esta juega un papel crucial en la protección del medio ambiente al mantener la estabilidad hídrica (Hernández-Calderón y Salamanca-Carvajal, 2019), siendo indicador en la evaluación de procesos biofísicos en los ecosistemas (Changalombo & Rivera, 2022). Desde hace más de tres décadas, los cambios en la cobertura vegetal se reconocen como una causa importante de alteraciones ambientales a nivel mundial (Lambin et al., 2013). La modificación y disminución de la cobertura vegetal tienen implicaciones en la disponibilidad y calidad de los bienes y servicios

ambientales que ofrecen los ecosistemas, así como en la dinámica ecosistémica (García et al., 2016; González et al., 2023).

La extensión de la cobertura original del bosque seco tropical (BsT) en Colombia se estima que cubría 8 146 000 ha (Espinola y Montenegro, 1977), mientras que para el 2014 solo se conservaba aproximadamente el 9 % del BsT, equivalente a 720 000 ha (Pizano y García, 2014). La principal causa de la reducción de la cobertura vegetal es la actividad antrópica. Acciones como la quema de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo para ganadería, agricultura y urbanización han provocado un desequilibrio en el ciclo natural, modificando las propieda-

des de la superficie terrestre y favoreciendo la erosión y desertificación (Nakao Inouye et al., 2015). Estas actividades son responsables de la pérdida anual de 12 millones de hectáreas de cobertura vegetal en Colombia, lo que ha llevado a graves transformaciones en los paisajes y un aumento en la pérdida de biodiversidad (Mas y Flamenco, 2011; Vargas, 2013).

En el departamento del Huila, para el 2014, en términos territoriales el 49 % (977 000 hectáreas) está dedicado a la producción agrícola, con más de un millón de hectáreas destinadas a las actividades agropecuarias (Agronet, 2021). Estas actividades contribuyen a la degradación de los ecosistemas y aceleran la desertificación (Olaya et al., 2001; Núñez, 2017). El ecosistema representativo del municipio de Aipe es el BsT, uno de los más amenazados y menos estudiados a nivel nacional, debido a las actividades humanas (Alvarado-Solano & Otero-Ospina, 2015). Además, el 66,5 % del territorio está afectado por la desertificación, producto de la expansión agrícola, ganadera y urbana, lo que ha deteriorado la calidad del agua y del suelo, y ha causado la acumulación de lodo en ríos y embalses (CAM, 2024).

En la actualidad, el impacto específico de la actividad antrópica y la desertificación sobre la cobertura vegetal de Aipe en las úl-

timas tres décadas aún no ha sido determinado. Por ende, este estudio contribuye al conocimiento cualitativo y cuantitativo de la dinámica de la cobertura vegetal a lo largo de 30 años, mediante el análisis de imágenes satelitales de 1992, 2002, 2010 y 2022. Además, proporciona indicadores clave para la formulación de estrategias y la toma de decisiones orientadas a mitigar la degradación ambiental en la zona de estudio. La evaluación de los cambios en la cobertura vegetal contribuirá al diseño de acciones efectivas para el manejo y la recuperación del territorio municipal.

De esta forma, el objetivo de este estudio fue evaluar la transformación de la cobertura vegetal en el municipio de Aipe durante los últimos 30 años, considerando cuatro períodos específicos (1992, 2002, 2010 y 2022). Para alcanzar este propósito, se plantearon tres objetivos específicos orientados: 1) analizar la dinámica de la cobertura vegetal en las Reservas Naturales de la Sociedad Civil del municipio durante los períodos evaluados; 2) evaluar la conectividad y el grado de fragmentación del bosque, así como sus variaciones temporales en los diferentes momentos analizados; y 3) identificar las áreas de bosque con mayor nivel de transformación, reconociendo sus cambios espaciales y temporales en los períodos de estudio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Aipe, Huila (Lat: 3.2219 4444° N, Long: -75.23750000° O), se ubi-

ca en la región norte del departamento del Huila (Figura 1), específicamente en el valle interandino del río Magdalena, abarcando la zona de la cuenca alta.

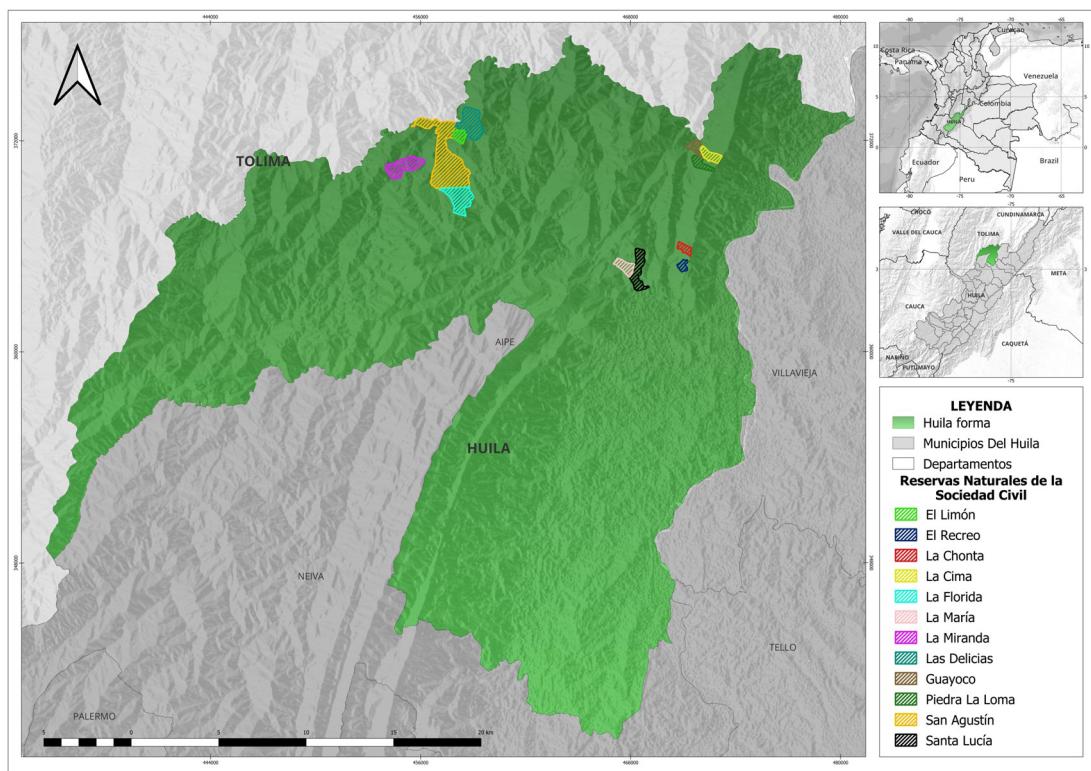


Figura 1. Mapa de localización geográfica del municipio de Aipe, departamento del Huila, que resalta las doce áreas de las Reservas Naturales de la Sociedad Civil utilizadas en el estudio

Fuente: autores.

Aipe incluye la cuenca del río Aipe, la cual está ubicada entre formaciones rocosas como lo es la cordillera central de los Andes, albergando pequeños fragmentos de bosques secos que enriquecen el paisaje circundante (Hernández-Calderón y Salamanca-Carvajal, 2019). Aipe cuenta con una extensión de 801,04 km², con un rango altitudinal que varía desde los 350 hasta los 640 m s.n.m. La temperatura varía entre los 23 °C y los 35 °C, y la precipitación fluctúa entre los 100 y los 2000 mm/año, siendo evidente una marcada estacionalidad climática que se extiende de 4 a 6 meses, periodo en el

cual las precipitaciones son inferiores a 100 mm (Díaz, 2017).

El municipio de Aipe cuenta con doce Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC), las cuales constituyen un importante aporte a la conservación del bosque seco tropical y a la conectividad ecológica de la región (Tabla 1). Estas reservas comenzaron a consolidarse desde el 2017, como respuesta al interés de las comunidades locales y propietarios de proteger los relictos de bosque, garantizar la preservación de la biodiversidad y fortalecer procesos de conservación participativa en el territorio.

Tabla 1.

Informaciones de coordenadas de las doce Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC) del Municipio de Aipe, Huila

#	Reserva	Latitud (°N)	Longitud (°O)
1	El Limón	3,33636	-75,39329
2	El Recreo	3,367453	-75,38331
3	La Chonta	3,30569	-75,25991
4	La Cima	3,35359	-75,24681
5	La Florida	3,32627	-75,38011
6	La María	3,29500	-75,29025
7	La Miranda	3,34526	-75,40669
8	Las Delicias	3,36533	-75,37179
9	Guayoco	3,35611	-75,25493
10	Piedra La Loma	3,34945	-75,25136
11	San Agustín	3,34000	-75,38096
12	Santa Lucía	3,28775	-75,26375

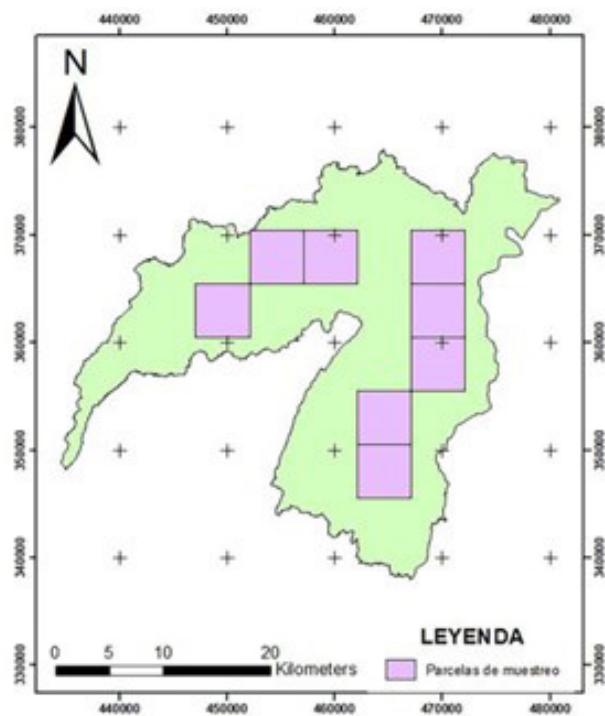
Fuente: autores.

Diseño experimental

Se recopilaron datos sobre las coberturas y usos del suelo en el área de estudio, siguiendo la metodología del IDEAM, Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra (IDEAM, 2010). Se aplicó un muestreo sistemático aleatorio que comprendió ocho parcelas de 25 km² cada una, las cuales en conjunto abarcaron 200 km², equivalentes al 25 % del área total del municipio de Aipe (Figura 2). En las ocho parcelas seleccionadas se levantó información en campo sobre coberturas y usos del suelo, que sirvieron para realizar una clasificación supervisada en el

software QGIS 3.28 mediante el *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) con áreas conocidas y visitadas previamente, utilizando puntos de entrenamiento. Entre estas parcelas se incluyeron siete Reservas Naturales de la Sociedad Civil, lo que permitió integrar datos tanto de áreas de conservación como de otras coberturas características del municipio, haciendo el entrenamiento más eficaz y preciso. Los registros obtenidos garantizaron la representatividad del territorio y constituyeron la base para la clasificación supervisada multitemporal de todo el municipio de Aipe.

Figura 2. Mapa de la localización geográfica de las ocho parcelas de muestreo establecidas para la obtención de información a priori sobre las coberturas en el municipio de Aipe, departamento del Huila



Fuente: autores.

Procesamiento de imágenes satelitales

Se usaron imágenes satelitales Landsat 4, 5 y 7 de los años 1992, 2002, 2010 y 2022 (Tabla 2) con nubosidad menor al 30 % y tamaño de píxel 30 m x 30 m, obtenidas del portal web *earthexplorer.usgs.gov* administrada por el *United States Geological Survey (USGS)*. Estas imágenes, provenientes de la colección

2, cuentan con productos de reflectancia superficial (*Surface Reflectance, SR*), los cuales incluyen correcciones atmosféricas estandarizadas. Adicionalmente, se aplicaron correcciones radiométricas a la imagen Landsat 7 del 2022, ya que presentaba “bandeado”, debido al fallo del *Scan Line Corrector (SLC)*, utilizando los archivos máscaras de validación que disponen las imágenes Landsat 7 para corregir este error.

Tabla 2.

Imágenes satelitales seleccionadas del satélite Landsat 4-5 y 7 utilizadas para la clasificación supervisada

Año	Satélite	Sensor	Codificación
1992	Landsat 4-5 TM C2 L1	TM	LT04_L1TP_008058_19920605_20200914_02_T1

Año	Satélite	Sensor	Codificación
2002	Landsat 7 ETM+ C2 L1	ETM+	LE07_L1TP_008058_20020921_20200916_02_T1
2010	Landsat 5 ETM+ C2 L1	ETM+	LT05_L1TP_008058_20100122_20200825_02_T1
2022	Landsat 7 ETM+ C2 L1	ETM+	LE07_L1TP_008058_20220926_20221022_02_T1

Fuente: autores.

Se realizó una clasificación supervisada para cada imagen, empleando el *SCP Dock* del complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), bajo el algoritmo de “máxima probabilidad”. Para este proceso, se definieron las coberturas del municipio mediante aproximadamente 50 polígonos de entrenamiento por clase, los cuales se clasificaron hasta nivel 2, siguiendo la metodología *Corine Land Cover (CLC)* adaptada por el IDEAM (2010) (Mendoza-Poggi et al., 2021).

A partir de los resultados de la clasificación, se seleccionó la cobertura boscosa con áreas superiores a 1 ha y se aplicaron distintos índices de análisis espacial. En primer lugar, se estimó el grado de fragmentación (F) propuesto por Galván-Guevara et al. (2015), con el propósito de cuantificar el estado de conservación de los bosques del municipio de Aipe. Este índice varía entre 0 y 1, donde F = 1 corresponde a ausencia de fragmentación; valores entre 1 y 0,7 indican fragmentación moderada; entre 0,7 y 0,5 representan un estado altamente fragmentado; y valores inferiores a 0,5 se asocian con bosques insularizados.

Posteriormente, se calculó el índice de conectividad espacial de los parches de bosque (*Forest Continuity Index, FCI*) de Vogelmann (1995), el cual evalúa la continuidad del bos-

que en función del área (m^2) y perímetro (m) de los fragmentos. Los resultados se expresaron en una escala logarítmica natural, en la que los valores más altos representan una mayor conectividad y los valores más bajos reflejan fragmentación y discontinuidad (Vogelmann, 1995; León-Alfaro, 2019).

Finalmente, se identificaron las áreas con mayor transformación de la cobertura boscosa hacia otras categorías de uso del suelo durante tres escenarios (1992-2002, 2002-2010 y 2010-2022). Este análisis se llevó a cabo mediante la herramienta *Land Cover Change* del complemento SCP, que permite generar matrices de transición. Dichas matrices registraron los cambios de una cobertura hacia otra, especificando la magnitud de superficie transformada y la proporción de cobertura que permaneció estable en cada periodo. Los resultados fueron sistematizados en tablas y representados en mapas temáticos, lo que facilitó el análisis multitemporal, tanto a escala municipal como en la interpretación de las Reservas Naturales de la Sociedad Civil incluidas en el estudio.

Análisis estadísticos

Se aplicaron pruebas de chi-cuadrado (χ^2) de independencia para analizar los cambios temporales en la cobertura boscosa del mu-

nicipio de Aipe y de las Reservas Naturales de la Sociedad Civil, considerando cuatro periodos de estudio. El mismo procedimiento se utilizó para contrastar los patrones de transformación de la cobertura (pérdida y

ganancia), con el fin de establecer si las diferencias observadas entre períodos presentaban significancia estadística. En todos los análisis se empleó un nivel de significancia de $p < 0,05$.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coberturas y uso del suelo del municipio de Aipe

En los cuatro escenarios analizados (1992, 2002, 2010 y 2022) se identificaron ocho coberturas de segundo nivel, según la metodología CLC adaptada para Colombia. Las coberturas predominantes fueron los bosques, las áreas con vegetación herbácea y/o arbus-

tiva y los pastos. En conjunto, se clasificaron cuatro categorías vegetales (bosques, pastos, áreas herbáceas y áreas sin vegetación), dos de uso del suelo (zonas urbanizadas y cultivos transitorios) y dos adicionales (aguas continentales y nubes/sombras), estas últimas relacionadas con cuerpos de agua superficiales y condiciones atmosféricas o de relieve que dificultan la interpretación (Figura 3).

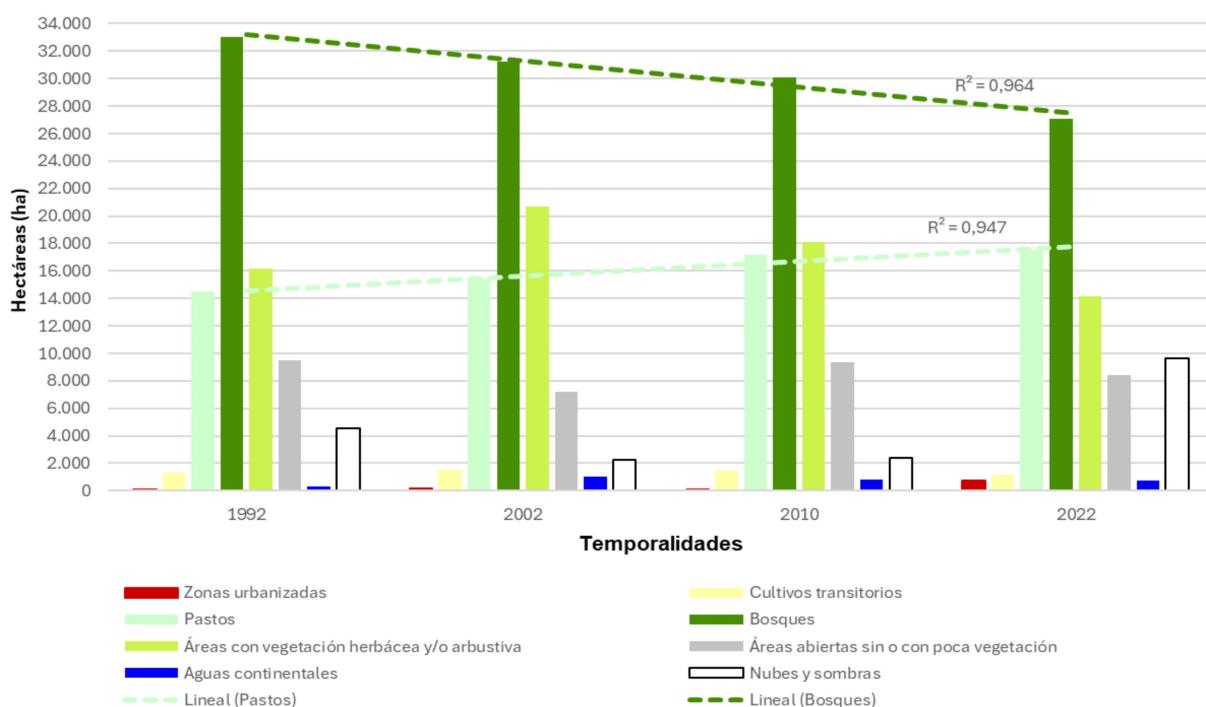


Figura 3. Gráfica de barras que presenta la distribución de las coberturas vegetales en el municipio de Aipe para los años 1992, 2002, 2010 y 2022, obtenidas a partir de un proceso de clasificación supervisada de imágenes satelitales. Se incluyen las categorías principales de cobertura, entre ellas bosques y pastos en líneas punteadas, cuya dinámica temporal fue evaluada mediante el ajuste de modelos de regresión lineal (R^2) para analizar tendencias en el periodo de estudio

Fuente: autores.

El análisis multitemporal evidenció variaciones significativas en todas las coberturas (Tabla 3). Los resultados de la prueba χ^2 de independencia ($p < 0,05$) confirmaron que los cambios registrados entre períodos fueron estadísticamente significativos. Entre los patrones más relevantes se destacó la reducción de bosques y áreas abiertas, acompañada por el aumento de la vegetación herbácea y de las superficies urbanizadas, lo que refleja un proceso sostenido de sustitución de coberturas naturales por usos antrópicos. Estos resultados coinciden con lo documentado en otros estudios de la región, que señalan la expansión agropecuaria y la ganadería extensiva como principales motores de deforestación y pérdida de hábitats (Etter et al., 2006; Armenteras et al., 2011; IDEAM, 2018).

Adicionalmente, se observó un incremento en la extensión de aguas continentales y

una reducción en la proporción de áreas clasificadas como nubes y sombras. Este comportamiento se asocia a la marcada estacionalidad tropical, caracterizada por períodos alternados de lluvias intensas y sequías prolongadas (Tucker, 1979; Ruiz y Febles, 2004), así como a la influencia de eventos climáticos interanuales como El Niño, que modifican los regímenes de precipitación y las dinámicas hidrológicas a nivel nacional (Camacho, 2015; Márquez et al., 2016). En este contexto, la imagen de 1992 corresponde a un periodo de déficit hídrico asociado al evento El Niño 1991-1992, mientras que la de 2002 fue capturada tras un ciclo de mayor pluviosidad posterior al evento El Niño 2002-2003, lo cual explica el aumento de las aguas continentales y la reducción de la cobertura nubosa en esos años (Devis-Morales, 2003; IDEAM, 2018).

Tabla 3.

Resultados de la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) aplicada a las coberturas del municipio de Aipe para el periodo 1992–2002. La tabla presenta los valores de χ^2 calculados para cada categoría de cobertura, junto con el nivel de significancia estadística (p), a fin de determinar si los cambios observados entre ambos años fueron estadísticamente significativos

Cobertura	χ^2	p-valor	($p < 0,05$)
Zonas urbanizadas	18,72	1,53E-05	Significativo
Cultivos transitorios	21,87	2,90E-06	Significativo
Pastos	28,59	8,91E-08	Significativo
Bosques	88,05	6,39E-21	Significativo
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	722,05	4,76E-159	Significativo
Áreas abiertas sin o con poca vegetación	190,34	5,12E-43	Significativo
Aguas continentales	389,47	2,13E-86	Significativo
Nubes y sombras	562,59	2,17E-124	Significativo

Fuente: autores.

Para los cambios presentados entre el 2002 y el 2010 se evidenció que la mayoría de las coberturas presentaron cambios estadísticamente significativos ($p < 0,05$), con excepción de las áreas de cultivos transitorios, que no mostraron diferencias relevantes entre ambos años, como se observa en la tabla 3.

Entre los cambios más notables se destaca la reducción en la cobertura boscosa, acompañada de un incremento en los pastos y las áreas abiertas, lo cual confirma la tendencia hacia la sustitución de coberturas naturales por usos productivos y actividades agropecuarias. Esta dinámica coincide también con los hallazgos de un estudio en el departamento del Quindío, donde la vegetación secundaria y los bosques mixtos disminuyeron del 23 % al 9 % entre 1954 y 2009, como resultado de la expansión de áreas de pastoreo y cultivo intensivo; al mismo tiempo, los cultivos aumentaron un 410 % en el mismo periodo (Quintero-Gallego et al., 2018). Al

igual que en el municipio de Aipe, dicho estudio identifica la ganadería y la agricultura de mercado como los principales impulsores del cambio en la cobertura del suelo, mostrando que la transformación observada en Aipe refleja una tendencia compartida con otras áreas rurales de los Andes colombianos.

Asimismo, se observaron variaciones significativas en la vegetación herbácea y en las superficies urbanizadas, lo que refleja un proceso de transformación del paisaje asociado tanto a la expansión antrópica como a la dinámica natural de recuperación secundaria. Este patrón es consistente con lo reportado por Sánchez-Cuervo & Aide (2013) en diferentes regiones de Colombia, donde la conversión de bosques a áreas de uso agropecuario suele estar acompañada de procesos de regeneración secundaria en áreas abandonadas, generando mosaicos de vegetación herbácea y arbustiva.

Tabla 4.

Resultados de la prueba de Chi-cuadrado (X^2) aplicada a las coberturas del municipio de Aipe para el periodo 2002-2010. La tabla presenta los valores de X^2 calculados para cada categoría de cobertura, junto con el nivel de significancia estadística (p), con el fin de determinar si los cambios observados entre ambos años fueron estadísticamente significativos

Cobertura	X^2	p-valor	($p < 0,05$)
Zonas urbanizadas	29,29	6,22E-08	Significativo
Cultivos transitorios	2,28	0,131	No significativo
Pastos	122,4	1,89E-28	Significativo
Bosques	34,27	4,80E-09	Significativo
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	226,81	2,96E-51	Significativo

Cobertura	χ^2	p-valor	(p<0,05)
Áreas abiertas sin o con poca vegetación	320,83	9,57E-72	Significativo
Aguas continentales	23,18	1,47E-06	Significativo
Nubes y sombras	4,03	0,0446	Significativo

Fuente: autores.

Entre 2002 y 2010, la mayoría de las coberturas presentaron cambios estadísticamente significativos ($p < 0,05$), con excepción de los cultivos transitorios, que no mostraron diferencias relevantes entre ambos años (Tabla 4). Asimismo, se registraron variaciones significativas en la vegetación herbácea y en las superficies urbanizadas, asociadas tanto a la expansión antrópica como a procesos de re-

generación secundaria (Tabla 5). Este comportamiento es consistente con lo señalado por Sánchez-Cuervo & Aide (2013), quienes destacan que la conversión de bosques hacia usos agropecuarios suele acompañarse de la recuperación de vegetación herbácea y arbustiva en áreas abandonadas, generando paisajes en mosaico.

Tabla 5.

Resultados de la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) aplicada a las coberturas del municipio de Aipe para el periodo 2010–2022. La tabla presenta los valores de χ^2 calculados para cada categoría de cobertura, junto con el nivel de significancia estadística (p), con el fin de determinar si los cambios observados entre ambos años fueron estadísticamente significativos

Cobertura	χ^2	p-valor	(p<0,05)
Zonas urbanizadas	482,36	1,49E-106	Significativo
Cultivos transitorios	2,86	9,10E-02	No significativo
Pastos	34,64	3,92E-09	Significativo
Bosques	177,55	1,09E-40	Significativo
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	1196,77	1,44E-262	Significativo
Áreas abiertas sin o con poca vegetación	41,59	1,14E-10	Significativo
Aguas continentales	3,2	7,30E-02	No significativo
Nubes y sombras	4459,62	1E-308	Significativo

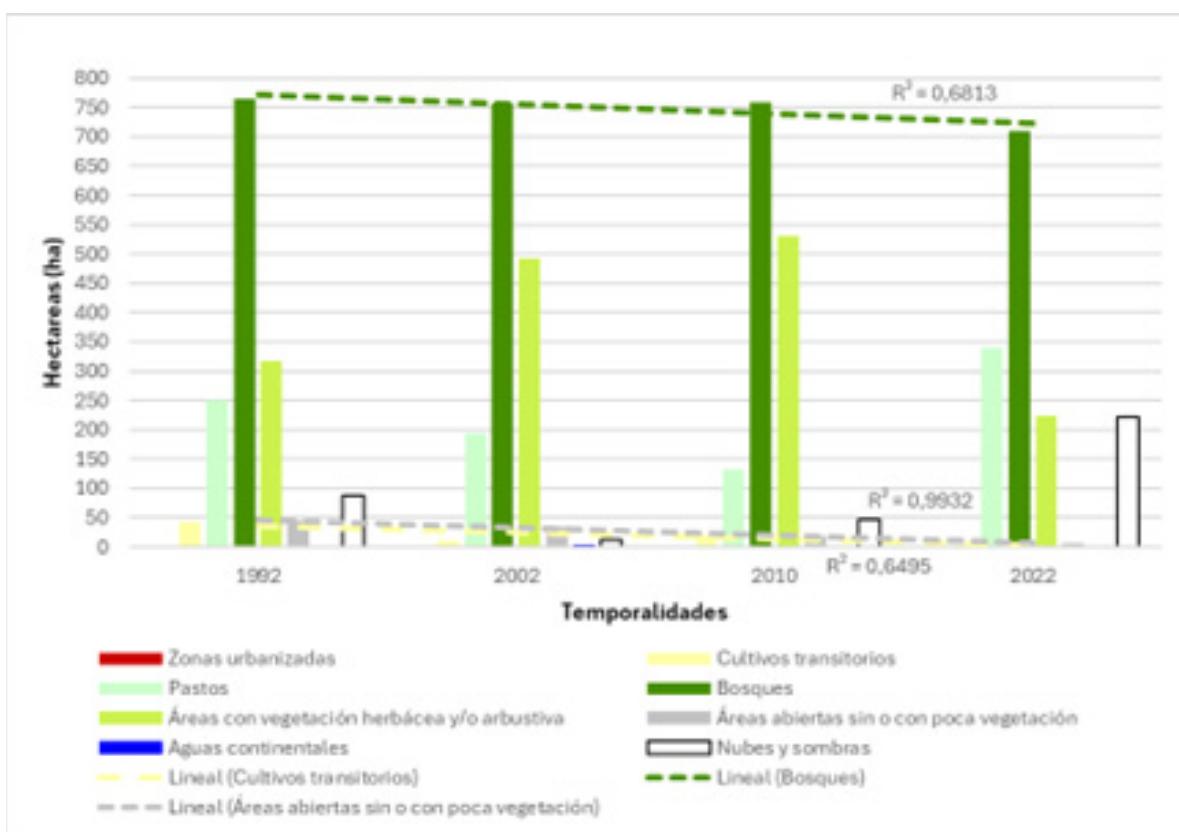
Fuente: autores.

Coberturas y uso del suelo de las RNSC

El análisis comparativo de los tres escenarios (1992–2002, 2002–2010 y 2010–2022) evidenció que los cambios en las coberturas dentro de las RNSC no fueron homogéneos, sino que respondieron a dinámicas diferenciales según el periodo analizado (Figura 4). Entre 1992 y 2002 se registró una reducción significativa de pastos, acompañada por un incremento significativo de vegetación herbácea y arbustiva (Tabla. 6), lo que eviden-

cia un proceso de regeneración secundaria. En el periodo 2002–2010 los cambios fueron menos marcados y se limitaron principalmente a variaciones en la categoría de nubes y sombras, reflejando una mayor estabilidad en las coberturas naturales. Finalmente, entre 2010 y 2022 se observaron transformaciones más pronunciadas, con aumentos significativos en pastos y en nubes/sombras, y reducciones en vegetación herbácea/arbustiva y áreas abiertas, lo que indica una intensificación de procesos de sustitución de coberturas naturales por usos agropecuarios.

Figura 4. Gráfica comparativa que muestra los resultados de clasificación supervisada de coberturas de las RNSC del municipio Aipe en los años 1992, 2002, 2010 y 2022. En línea punteada se ven las tendencias lineales de los cambios de las coberturas a través del tiempo



Fuente: autores.

Si bien estos resultados muestran un aumento de la presión antrópica en las RNSC durante la última década, debe considerarse que su formalización legal ocurrió a partir de 2018. Esto implica que su papel como instrumentos de conservación aún se encuentra en una fase inicial de implementación. Las RNSC tienen como propósito garantizar la protección y el manejo sostenible de la biodiversidad en predios privados, favoreciendo la conectividad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos. Sin embargo, el corto

tiempo transcurrido desde su reconocimiento formal limita la posibilidad de evidenciar impactos concretos en la dinámica del paisaje. En este sentido, los cambios detectados en los últimos períodos constituyen más bien una línea base que resalta la necesidad de fortalecer los procesos de gestión, monitoreo y acompañamiento técnico a las comunidades locales, de modo que estas reservas puedan cumplir efectivamente sus objetivos de conservación en el mediano y largo plazo.

Tabla 6.

Resultados de la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) aplicada a las coberturas de las RNSC del municipio de Aipe (1992-2002, 2002-2010 y 2010- 2022). La tabla presenta los valores de χ^2 calculados para cada categoría de cobertura, junto con el nivel de significancia estadística (p), con el fin de determinar si los cambios observados entre ambos años fueron estadísticamente significativos

Cobertura	1992-2002			2002-2010			2010- 022		
	χ^2	p-valor	(p<0,05)	χ^2	p-valor	(p<0,05)	χ^2	p-valor	(p<0,05)
Zonas urbanizadas	0,00	1.000	No significativo	0,50	0,479	No significativo	1,33	0,248	No significativo
Cultivos transitorios	35,59	2,43E-09	Significativo	2,09	0,149	No significativo	7,2	0,007	Significativo
Pastos	14,16	1,68E-04	Significativo	12,41	0,000426	Significativo	73,9	<0,0001	Significativo
Bosques	0,05	0,828	No significativo	0,00	0,971	No significativo	3,15	0,076	No significativo
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	75,62	3,44E-18	Significativo	2,02	0,155	No significativo	133,9	<0,0001	Significativo
Áreas abiertas sin o con poca vegetación	2.02	0.155	No significativo	4.39	0.036	Significativo	5,33	0,021	Significativo
Aguas continentales	6.40	0.0114	Significativo	1.00	0.317	No significativo	1,33	0,248	No significativo
Nubes y sombras	106.58	5.50E-25	Significativo	21.00	0.000005	Significativo	122,6	<0,0001	Significativo

Fuente: autores.

Grado de fragmentación y conectividad del bosque

La cobertura de bosque se categorizó como discontinua y fragmentada en todas las temporalidades analizadas (Figura 5a; Figura 5b). El análisis de la conectividad, basado en el índice FCI, mostró variaciones a lo largo del periodo estudiado. Es importante precisar que el FCI no tiene una escala absoluta (como índices normalizados entre 0 y 1), sino que funciona como un indicador relativo que permite comparar la continuidad del bosque entre diferentes años o áreas de estudio. De este modo, valores más altos del FCI indican mayor continuidad y compacidad de los parches de bosque, mientras que valores más bajos reflejan una mayor fragmentación y pérdida de conectividad (Vogelmann, 1995).

En este sentido, en 1992, el índice FCI alcanzó un valor de 3,76, lo que indica que los parches de bosque eran más densos, compactos y con menor perímetro, en comparación con años posteriores. En el 2002, el índice FCI bajó a 3,69, debido posiblemente, a una mayor fragmentación del bosque, ya que se dividió en pequeños parches con un perímetro total más extenso, pero con menor conectividad. En 2010, el índice FCI aumentó a 3,80, reflejando una mejora en la conectividad, ya que los parches restantes del bosque, aunque menos numerosos, eran más densos y estaban mejor preservados que en el 2002. Sin embargo, para este mismo año, el índice disminuye nuevamente, alcanzando un valor de 3,70, lo que indica una nueva fragmentación de los parches de bosque. Este aumento

en el perímetro total de la cobertura refleja un deterioro y una tendencia progresiva de áreas desconectadas del municipio.

En cuanto al grado de fragmentación (F) del bosque en Aipe, se evidencian cambios progresivos que reflejan un deterioro constante de la estructura del paisaje forestal. En 1992, el valor más alto (0,39) correspondió a la menor fragmentación registrada, aunque ya categorizada dentro del estado “Insularizado”. Posteriormente, los valores disminuyeron de manera continua: 0,36 en 2002, 0,35 en 2010 y 0,31 en 2022, indicando una tendencia sostenida hacia una mayor fragmentación. El análisis de regresión lineal confirmó esta dinámica negativa, con un valor de $R^2 = 0,9229$ (Figura 5b), lo que evidencia un ajuste fuerte y una tendencia estadísticamente consistente hacia la reducción del índice de fragmentación.

Estos resultados muestran que, a pesar de que en todas las temporalidades la cobertura boscosa se mantiene en la categoría insularizada, el proceso de fragmentación se ha intensificado con el tiempo, lo que ha generado una pérdida gradual de conectividad y una degradación progresiva del paisaje forestal en el municipio. Resultados similares han sido documentados en otras áreas de estudio que tienen parches de Bst en Colombia. Por ejemplo, en el arroyo Pechelín (Montes de María, Sucre), se reportó un índice de fragmentación de $F = 0,35$ para el 2010, coincidiendo con los valores obtenidos en Aipe para el mismo año (Vargas, 2013). Asimismo, estudios regionales sobre bosques secos en el Caribe y en cuencas del Cauca evidencian procesos análogos de re-

ducción de la cobertura arbórea y pérdida de conectividad, impulsados principalmente por la expansión de actividades agropecuarias y la presión antrópica constante (Etter et al., 2006; Pizano y García, 2014), lo que evi-

dencia que la dinámica observada en Aipe no es un fenómeno aislado, sino que responde a un patrón regional de degradación y fragmentación del paisaje forestal seco en Colombia.

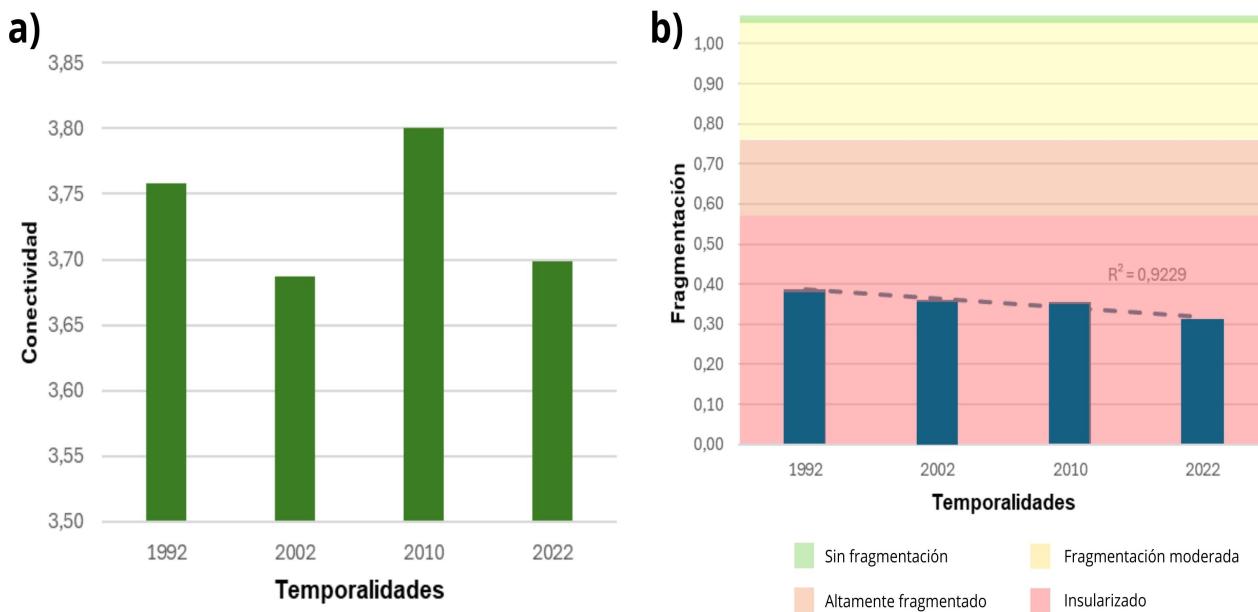


Figura 5. a) Índice de Continuidad Forestal (FCI), calculado a partir de la relación área/perímetro de los parches de bosque, presentado para los años 1992, 2002, 2010 y 2022 en el municipio de Aipe. Valores altos indican mayor compacidad y continuidad; valores bajos reflejan fragmentación. b) Índice de Fragmentación (F), que mide el aislamiento de los parches y se clasifica desde continuo hasta insularizado. La línea punteada corresponde a la regresión lineal ($R^2 = 0,9229$), que muestra la tendencia temporal

Fuente: autores.

Transformación de la cobertura boscosa

La transformación del bosque en el municipio de Aipe entre 1992 y 2002 evidenció un proceso de sucesión ecológica hacia áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, como se observa en la matriz de transición (Anexo C). En este periodo, únicamente 20 173 ha de bosque permanecieron intactas, mientras que 8297 ha (10,4 %) se con-

virtieron en vegetación herbácea/arbustiva y 2114 ha (2,7 %) en pastos, principalmente en las zonas centro, norte y sur del municipio (Figura 6a). El análisis de independencia χ^2 confirmó que estos cambios fueron estadísticamente significativos ($\chi^2 = 17,83$; $p < 0,001$), lo que evidencia una sustitución marcada de coberturas forestales por usos ganaderos, con implicaciones negativas para la biodiversidad, los ciclos de nutrientes y la capacidad de retención hídrica del suelo (Matías et al., 2020).

Durante el periodo 2002-2010 (Figura 6B) se mantuvo esta tendencia, con 2267 ha (8,3 %) transformadas en vegetación herbácea/arbustiva y 2267 ha (2,9 %) en pastos. El análisis χ^2 corroboró la significancia de estos cambios ($\chi^2 = 34,27$; $p < 0,001$), indicando que la presión antrópica continuó generando pérdidas en la cobertura boscosa.

Finalmente, entre 2010 y 2022 se registró un incremento más pronunciado de áreas

destinadas a pastos (4849 ha; 6,1 %) y a vegetación herbácea/arbustiva (2564 ha; 3,2 %) (Figura 6c). En este periodo, la cobertura boscosa descendió del 41,6 % en 1992 al 34,1 % en 2022, lo que representa una pérdida acumulada de 5993 ha (10,1 %) en tres décadas. El análisis χ^2 ($\chi^2 = 177,55$; $p < 0,001$) confirmó que esta reducción del bosque y su remplazo por pastos constituye un patrón consistente y acumulativo en el tiempo.

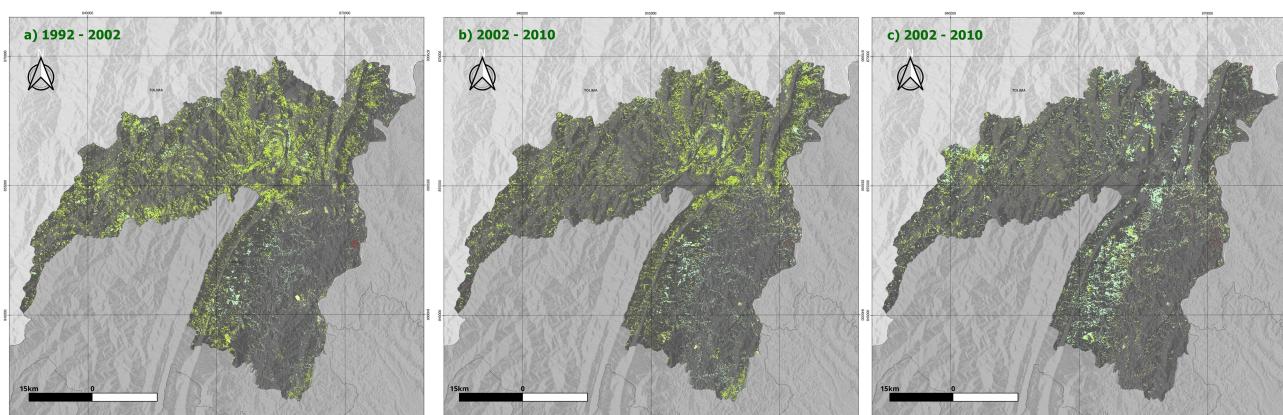


Figura 6. Mapas comparativos a escala 1:50.000 que ilustran la transformación de la cobertura boscosa en el municipio de Aipe, Huila, durante los siguientes periodos: a) 1992-2002, b) 2002-2010 y c) 2010-2022. Los parches coloreados representan áreas de bosque que fueron transformadas hacia otras coberturas, de acuerdo con la clasificación establecida en la leyenda del Corine Land Cover (CLC), donde cada color corresponde a una categoría específica de uso de cobertura

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

Entre 1992 y 2022, el municipio de Aipe presentó una reducción sostenida y estadísticamente significativa del bosque seco tropical, mientras que los pastizales y las áreas agrícolas mostraron un crecimiento progresivo. Esta dinámica confirma el avance de la

frontera agropecuaria y la presión antrópica como principales motores de transformación del paisaje, con efectos negativos sobre la cobertura forestal y los servicios ecosistémicos asociados.

El análisis de las Reservas Naturales de la Sociedad Civil evidenció que estas han contribuido a mantener mayor estabilidad en las coberturas boscosas y en la vegetación herbácea-arbustiva dentro del municipio. No obstante, los cambios registrados entre 2010 y 2022 muestran que estas áreas también están siendo afectadas por procesos de expansión agropecuaria, lo que resalta la necesidad de fortalecer su gestión, el monitoreo permanente y el acompañamiento institucional para consolidar su papel en la conservación y la conectividad ecológica dentro del departamento.

La evaluación de la conectividad y fragmentación del bosque demostró que la cobertura boscosa de Aipe se encuentra altamente fragmentada y con tendencia creciente hacia la insularización. Esta condición compromete la funcionalidad ecológica del paisaje al limitar la movilidad de especies, reducir la regulación hídrica y disminuir la resiliencia del ecosistema. En este sentido, se requiere la implementación de corredores biológicos y planes de restauración que

mitiguen la pérdida de conectividad y eviten una degradación irreversible del bosque seco tropical. De la misma forma, la identificación de las áreas más transformadas reveló un patrón espacial diferenciado: entre 1992 y 2010 la deforestación se concentró en el norte del municipio, mientras que en el periodo 2010-2022 el proceso se intensificó hacia el sur. Este hallazgo constituye un insumo clave para orientar el ordenamiento territorial, priorizar zonas críticas y optimizar las acciones de restauración y conservación.

En conjunto, los resultados responden a los objetivos planteados y ofrecen una línea base sólida para la toma de decisiones ambientales dentro del municipio de Aipe, Huila, Colombia. Igualmente, la información generada proporciona herramientas técnicas para el diseño de políticas públicas, el fortalecimiento de las RNSC, la planificación de procesos de restauración ecológica y la búsqueda de un equilibrio entre la producción agropecuaria y la conservación de ecosistemas estratégicos como el bosque seco tropical.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: Formulación del proyecto, recolección de información, investigación, análisis de datos, escritura.

Autor 2: Metodología, análisis de datos, conceptualización, revisión y edición.

Autor 3: Formulación del proyecto y coordinación de la investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Asociación de Mujeres del

Bosque Seco Tropical (ASOBOSPA) y a los responsables por conservar las Reservas Na-

turales de la Sociedad Civil del municipio de Aipe, también por su valioso apoyo y colaboración en el desarrollo de esta investigación. Su contribución fue fundamental para

la realización del trabajo de campo y el acceso a información clave sobre los esfuerzos de conservación en la región.

FINANCIAMIENTO

Nº aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Nº aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Agronet. (2021, marzo 25). *Retos del departamento del Huila frente a la planificación del ordenamiento rural agropecuario*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Retos-del-departamento-del-Huila-frente-a-la-planificacion-del-Huila-del-ordenamiento-rural-agropecuario.aspx>

Aldás, J. P. (2013). *Estudio de variación de la cobertura vegetal y estado actual del Cerro Imbabura aplicando herramientas GIS con fines de declaración de área protegida*. [Tesis de Magíster en Sistemas de Información Geográficas]. Repositorio Universidad San Francisco de Quito.

Alvarado-Solano, D. P. & Otero-Ospina, J. T. (2015). Spatial Distribution of Tropical Dry Forest in Valle Del Cauca, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 20(3), 141-153. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n3.46703>

Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J. & Morales, M. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11(3), 693-705. https://www.researchgate.net/publication/226697849_Understanding_deforestation_in_montane_and_lowland_forests_of_the_Colombian_Andes

Benedetti Henao, C. (2015). El Fenómeno del Niño 1991-1992 - evidencia en la acumulación de capital humano. Uniandes. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/13141>

Camacho, A. (2015). El Fenómeno del Niño 1991-1992: Evidencia en la acumulación de Capital Humano. *Repositorio Universidad de los Andes*.

Changalombo, D., Rivera, J. (2022). Evaluación de la dinámica temporal de la cobertura vegetal del Cantón Salcedo mediante el uso de imágenes satelitales desde el año 2000 al 2020. *Universidad Técnica de Cotopaxi*. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7870>

Devis-Morales, A. (2003). Evolución del evento el niño 2002-2003 y efectos sobre la cuenca del pacífico colombiano y la bahía de Tumaco. *Boletín Científico CCCP*. https://www.researchgate.net/publication/319145938_Evolucion_del_evento_El_Nino_2002-2003_y_efectos_sobre_la_cuenca_del_Pacifico_colombiana_y_la_Bahia_de_Tumaco

Díaz, L. M. (2017). Caracterización fisonómico-estructural del bosque seco tropical en seis parcelas permanentes en Aipe (Huila) e implementación de prácticas comunitarias para su conservación. *Universidad distrital Francisco José de Caldas*. <http://hdl.handle.net/11349/6914>

Espinal, L. y Montenegro, E. (1963). Formaciones vegetales de Colombia. *Insti-tuto Geográfico Agustín Codazzi*, 201. https://discovered.ed.ac.uk/discovery/fulldisplay?vid=44UOE_INST:44UOE_

VU2&tab=Everything&docid=alma992207343502466&lang=en&context=L&query=any,contains,god,%20humanity,%20cosmos&sortby=-date&facet=frbrgroupid,include-1310909670&offset=0

Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S. & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 369-386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>

Galván-Guevara, Ballut-Dajud, De La Ossa-V. (2015). Determinación de la fragmentación del bosque seco del arroyo Pechelín, Montes de María, Caribe, Colombia. *Biota Colombiana*, 16(2): 149-157. <chrome-extension://efaidnbmnnibpcapcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/491/49144024007.pdf>

García Sancho, A. G., Nájera González, O., Murray Núñez, R. M. & Marceleño Flores, S. M. L. (2016). Dinámica espaciotemporal de la cobertura y uso del suelo en una cuenca hídrica. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(9), 29-42. <https://ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/42>

González-Hernández, L., Romo-Lozano, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Martínez Dá-mian, M. Á., Mohedano Caballero, L. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y bosques*, 29(3). <https://www.redalyc.org/journal/617/61778755001/html/>

Hernández-Calderón, L. N., Salamanca-Carvajal, J. A. (2019). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca del Río Sardinata, del departamento de Norte de Santander-Colombia. *Universidad Católica de Colombia*.

IDEAM, (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. 72. <https://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/Documentos-Gesti%CB3n%20del%20riesgo%20Purac%C3%A9/Leyenda%20nacional%20coberturas%20tierra.pdf>

IDEAM. (2018). Bosques y deforestación en Colombia: Informe técnico anual de la tasa de deforestación nacional 2017. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.

Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

León-Alfaro, Y. (2019). Análisis de fragmentación y conectividad del bosque en la subcuenca del río Tapezco, Costa Rica: Conectando el bosque para proteger el agua. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 102-120. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.67969>

Márquez, C. I., Ustariz, G., Peña, D. F., Caicedo, I. H., & Cuevas, A. (2016). *Fenómeno El Niño: Análisis comparativo 1997-1998 / 2014-2016*.

Mas, J. F. y Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*. 5(1), 1-24 <chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/NS 5 1 Mas-Flamenco.pdf>

Matías, J., Rodríguez, M. J., Carrillo-Vico, A., Casals, J., Fondevilla, S., Haros, C. M., Pedroche, J., Aparicio, N., Fernández-García, N., Aguiló-Aguayo, I., Soler-Rivas, C., Caballero, P. A., Morte, A., Rico, D., & Reguera, M. (2024). *From “farm to fork”: Exploring the potential of nutrient-rich and stress-resilient emergent crops for sustainable and healthy food in the Mediterranean region in the face of climate change challenges*. *Plants*, 13(14), 1914. <https://doi.org/10.3390/plants13141914>

Mendoza-Poggi, M. L., Giler-Ormaza, A. M., Aguilar-Porro, C., Pimentel-Leiva, R. (2021). Evaluación del uso y cobertura del suelo en la cuenca río Chico. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2596>

Nakao Inouye, C. E., Cabral de Sousa, W., de Freitas, D. M., Simões, E. (2015). Modeling the spatial dynamics of urban growth and land use changes in the north coast of São Paulo, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 108, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.016>

Núñez, E. J., Toro, O. A. (2017). Desarrollo de un modelo espacial a partir de herramientas de procesamiento digital de imágenes para cuantificar la tendencia de la desertificación del desierto de la Tatacoa, en el departamento del Huila. *Universidad Católica de Manizales*. Tesis de Maestría (Magíster en Teledetección). Universidad Católica de Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/1858>

Olaya, A., Sánchez, M., & Acebedo, J. C. (2001). La Tatacoa: Ecosistema estratégico de Colombia. Universidad Surcolombiana. <https://biblioteca.usco.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11279>

Pizano, C. y García, H. (2014). El Bosque Seco Tropical en Colombia. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH)*.

Quintero-Gallego M. E., Quintero-Angel M. & Vila-Ortega J. J. (2018). Exploring land use/land cover change and drivers in Andean mountains in Colombia: A case in rural Quindío. *Sci Total Environ.* 2018 Sep 1;634:1288-1299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.359>

Ruiz, T. y Febles, G. (2004). La desertificación y la sequía en el mundo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 8(2). Universidad de Colima. <chrome-extension://efaid-nbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/837/83780201.pdf>

Sánchez-Cuervo, A. M. & Aide, T. M. (2013). Consequences of the Armed Conflict, Forced Human Displacement, and Land Abandonment on Forest Cover Change in Colombia: A Multi-scaled Analysis. *Ecosystems* 16, 1052-1070. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9667-y>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Vargas, J. A. (2013). Análisis multitemporal de la cobertura del suelo en el departamento del Huila (Alto Magdalena, Colombia). *UDCA*. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1297>

Vogelmann, J. E. (1995). Assessment of forest fragmentation in southern New England using remote sensing and geographic information systems technology. *Conservation Biology*, 9(2), 439-449. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.9020439.x>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

Fecha de recibido: 08-08-2024
Fecha de aceptado: 11-04-2025
DOI: 10.22490/21456453.8484

ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS DE CHIRPS Y WORLDCLIM EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA, MÉXICO

SPATIO TEMPORAL ANALYSIS OF MONTHLY PRECIPITATION AND TEMPERATURE ESTIMATES FROM CHIRPS AND WORLDCLIM IN THE SONORA RIVER BASIN, MEXICO

Ildefonso Narváez-Ortiz¹
Rocío Alexandra Ortiz-Paz²
Claudio César Hernández-Vásquez³

Citación: Narváez-Ortiz, I., Ortiz-Paz, R. y Hernández-Vásquez, C. (2026). Análisis espacio temporal de estimaciones de precipitación y temperaturas de Chirps y WorldClim en la cuenca del río Sonora, México. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 319 - 343. <https://doi.org/10.22490/21456453.8484>

¹ Ingeniero agroforestal, Ph. D, Mg, Programa de Ingeniería Agroforestal - Universidad Internacional del Trópico Americano, Yopal, Casanare, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4988-8886>
ildenarvaez@unitropico.edu.co

² Ingeniera Agroforestal, MSc, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, C.I La Selva, Colombia.
<https://orcid.org/0000-0003-3931-8780> rortizp@agrosavia.co

³ Ingeniero en Recursos Naturales, Ph. D, Universidad Autónoma Chapingo, Edo México, México.
<https://orcid.org/0000-0003-2945-2118> claudiohdezvqz@gmail.com

RESUMEN

Contextualización: se analizan las estimaciones de precipitación y temperatura en la cuenca del río Sonora, México, utilizando datos ráster de Chirps y WorldClim. Con estas plataformas se puede suplir la ausencia de datos debido a la baja o nula instrumentación, aportando información para la planificación y toma de decisiones a nivel territorial.

Vacío de conocimiento: a pesar de la información generada a partir de sensores remotos que facilitan la interpolación y estimación de variables climáticas en áreas sin mediciones directas, persisten dudas sobre la precisión de los datos interpolados en rásters en comparación con los registros climáticos obtenidos en tierra, especialmente en áreas de baja densidad de estaciones y diversidad geográfica.

Propósito: el objetivo principal es evaluar la precisión de las estimaciones de precipitación de Chirps y de las temperaturas máxima y mínima de WorldClim, usando registros mensuales de 19 estaciones climatológicas

en la cuenca del río Sonora durante el periodo 1981-2013.

Metodología: se recopilaron datos de Chirps y WorldClim, comparándolos con registros de estaciones climatológicas mediante el Valor Absoluto del Error Relativo (PBIAS) y la relación de la Desviación Estándar (RSR). Se utilizaron rutinas de código en R.

Resultados y conclusiones: los resultados muestran que las estimaciones de Chirps y WorldClim presentan un ajuste “Bueno” a “Muy bueno”. No obstante, se identificaron casos de subestimación y sobreestimación principalmente en las temperaturas. Las estimaciones de temperaturas mostraron un alto grado de ajuste, mientras que las de precipitación fueron más dispersas. Las plataformas con datos en ráster son confiables para estudios climáticos y de planificación en la región.

Palabras clave: clima, interpolación, baja instrumentación, estaciones climatológicas, ráster

ABSTRACT

Contextualization: The precipitation and temperature estimates in the Sonora River Basin, Mexico, are analyzed using Chirps and WorldClim raster data. These platforms help compensate for the lack of data due to low or nonexistent instrumentation, providing valuable information for territorial planning and decision-making.

Knowledge Gap: Despite the information generated from remote sensors that facilitate the interpolation and estimation of climate variables in areas without direct measurements, uncertainties persist regarding the accuracy of interpolated raster data compared to ground-based climatological records, especially in regions with low station density and diverse geographical features.

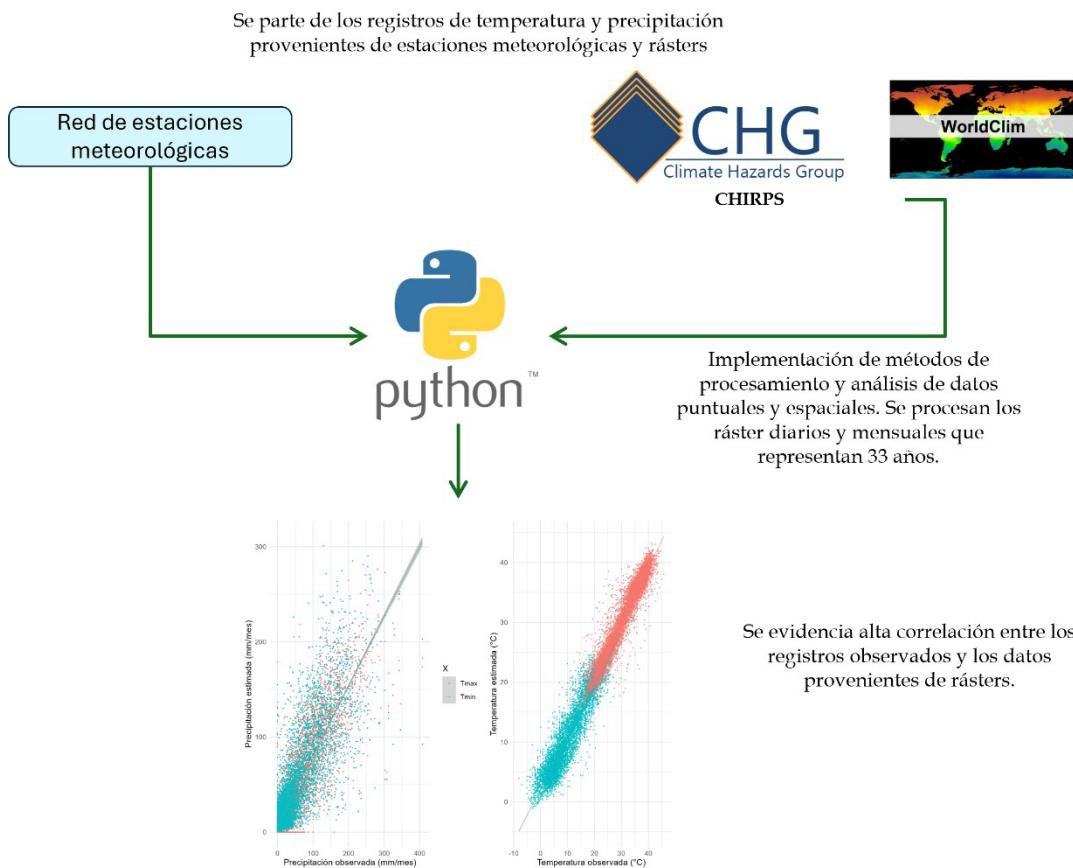
Purpose: The main objective is to assess the accuracy of Chirps precipitation estimates and WorldClim maximum and minimum temperature estimates using monthly records from 19 climatological stations in the Sonora River Basin during the period 1981–2013.

Methodology: Data from Chirps and WorldClim were collected and compared with climatological station records using the Percentage Bias (PBIAS) and the Standard Deviation Ratio (RSR). R programming routines were used for analysis.

Results and Conclusions: The results show that Chirps and WorldClim estimates exhibit a “Good” to “Very Good” fit. However, cases of underestimation and overestimation were identified, primarily in temperature estimates. Temperature estimates showed a high degree of accuracy, whereas precipitation estimates displayed greater dispersion. Raster-based data platforms are reliable for climate studies and planning in the region.

Keywords: Climate, Interpolation, Low instrumentation, Climatological stations, Rasters.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores

1 INTRODUCCIÓN

La forma tradicional para obtener datos climatológicos necesarios para el estudio de fenómenos hidrometeorológicos como las sequías e inundaciones es mediante las observaciones de los registros de las estaciones climatológicas *in situ*. Este método empleado durante años presenta serias limitaciones, tanto espaciales como temporales, debido a que no existe uniformidad en la distribución geográfica de las estaciones; ade-

más, en muchos de los casos, los registros climatológicos presentan errores de captura y ausencia de datos (Dinku, 2019; Infante y Zárate, 2012). Los datos faltantes son un problema recurrente en la mayoría de las estaciones climatológicas de México y ocasionan limitaciones a la hora de hacer análisis y modelación. La Organización Meteorológica Mundial (OMM), en su *Guía de prácticas climatológicas* (OMM, 2018), ofrece in-

formación detallada sobre diversos métodos para datos faltantes, pero requieren de un análisis particular y detallado de uso y forma de aplicación (Herrera Oliva et al., 2017).

En México, para obtener datos de temperatura y precipitación, a menudo se recurre a los registros de estaciones meteorológicas; sin embargo, las plataformas Chirps y WorldClim son herramientas de origen satelital para acceder a registros climatológicos históricos confiables, quasi globales de alta resolución espaciotemporal (Paredes Trejo et al., 2016; Paredes-Trejo et al., 2021; Zakeri & Mariethoz, 2024). Chirps y WorldClim están siendo utilizadas con mayor frecuencia en estudios de aprovechamiento de recursos hídricos, de planeación en cultivos y ganadería (Romero & Alfaro, 2024; Romero-Hernández et al., 2024; Shumilo & Skakun, 2024); también, son importantes en el monitoreo de sequías (Tikuye et al., 2024) y, en la estimación de recarga de agua subterránea (Belay et al., 2024).

A nivel mundial, se han realizado diversos estudios que buscan evaluar la precisión de los registros con respecto a estaciones en tierra. Shrestha et al. (2017) evaluaron la precisión de Chirp y Chirps en la cuenca del río Koshi en Nepal y encontraron que los registros guardan ajuste aceptable con variaciones, en función de las configuraciones geográficas, es decir, mejor ajuste a mayor

altitud. Rivera et al. (2019) compararon las condiciones de humedad y sequía en el centro-oeste semiárido de Argentina y concluyen que Chirps es una herramienta promisoria para estudios hidrometeorológicos, a la vez que sugieren estudiar su aplicación para el cálculo de índices como el SPI. Shen et al. (2020) realizaron la evaluación de la precisión a nivel global de Chirps, concluyendo que guarda precisión aceptable pero que se debe tener precaución cuando se trate con registros previos al año 2000. López-Bermeo et al. (2022) evaluaron la precisión de Chirps a nivel regional en el departamento de Antioquia, en Colombia, encontraron que la precisión varía en función de la diversidad climática y condiciones geográficas, evidenciaron sub y sobre estimaciones, no obstante, concluyeron que es una herramienta aceptable como fuente de información para estudios de precipitación anuales e interanuales, pero no es recomendable con datos diarios.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio es evaluar la precisión de las estimaciones de precipitación de Chirps y de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de WorldClim en la cuenca del río Sonora, México, utilizando como conjunto de datos de referencia los registros mensuales de 19 estaciones climatológicas en el periodo comprendido desde 1981 hasta 2013.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio. La cuenca del río Sonora se localiza en la región centro-noreste del estado que lleva el mismo nombre y

se enmarca por las coordenadas geográficas 28°5'19.23" y 30°59'18.56" de latitud norte y 109°52'8.92" y 111°37'52.81" de longitud

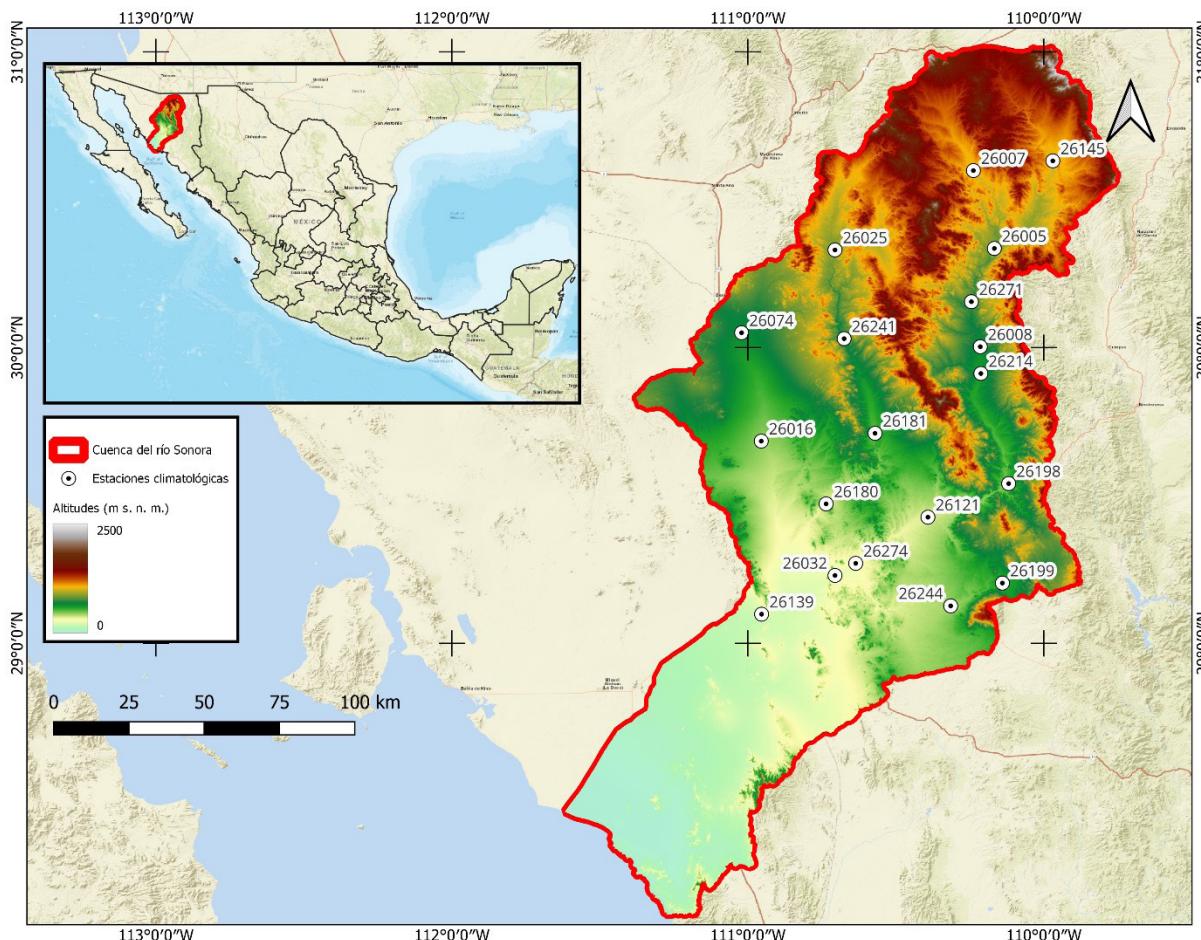
oeste. Se extiende desde la costa del mar de Cortés desde los 0 hasta los 2.411 m s. n. m., con una superficie total de 26 827 km². La zona de estudio comprende la parte media y alta de la cuenca con una extensión territorial de 21 220 km² (Figura 1).

La precipitación media anual varía entre 300 y 600 mm, con dos períodos de lluvias, el más importante se presenta en verano y se asocia a los efectos del monzón de Norteamérica. La temperatura media oscila entre 12 °C y 24 °C, con registros de las temperaturas más bajas en las zonas montañosas y las más altas en las zonas cercanas a la ciudad de Hermosillo (SMN, 2019).

Información climatológica. Se utilizaron dos fuentes de datos para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima (P, Tmáx y Tmín): i) los registros históricos de las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la zona de estudio y ii) las bases de datos ráster de los productos Chirps y WorldClim. La plataforma Chirps consiste en una serie de rásters que representan la precipitación diaria, y WorldClim integra rásters con valores mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Chirps (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) y WorldClim (Kyrgyzbay et al., 2023) se apoyan con estaciones en tierra para validar las estimaciones mediante la tecnología infrarroja, cuentan con datos diarios de precipitaciones en formatos como NetCDF y tif desde 1981 a la fecha, con una extensión espacial que comprende de las latitudes de 50 °S a 50 °N y todas las longitudes a una resolución de 0,05°. Es administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la University of California, Santa Bárbara (UCSB) (Funk et al., 2015; Kyrgyzbay et al., 2023). WorldClim es una plataforma que ofrece datos climáticos en formato tif de variables como temperatura, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y presión del vapor del agua, a una resolución espacial que está entre 30 segundos y 10 minutos, con una extensión temporal desde 1961 hasta el presente (Fick & Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005; Perrin et al., 2020). Se basa en la interpolación de datos de estaciones meteorológicas y otras fuentes como la NASA, NOAA y servicios meteorológicos nacionales.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de las estaciones climatológicas



Fuente: autores.

Estaciones climatológicas. Se obtuvieron registros mensuales (observados) de 19 estaciones climatológicas (*in situ*) (Figura 1, Tabla 1) que pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019). El conjunto de

datos climatológicos corresponde a 33 años de observación (1981-2013) y fueron sometidos a un estricto control de calidad en lo que respecta a su continuidad, variabilidad y magnitud (Hernández-Vásquez et al., 2020).

Tabla 1.

Características geográficas y climáticas de las estaciones climatológicas.

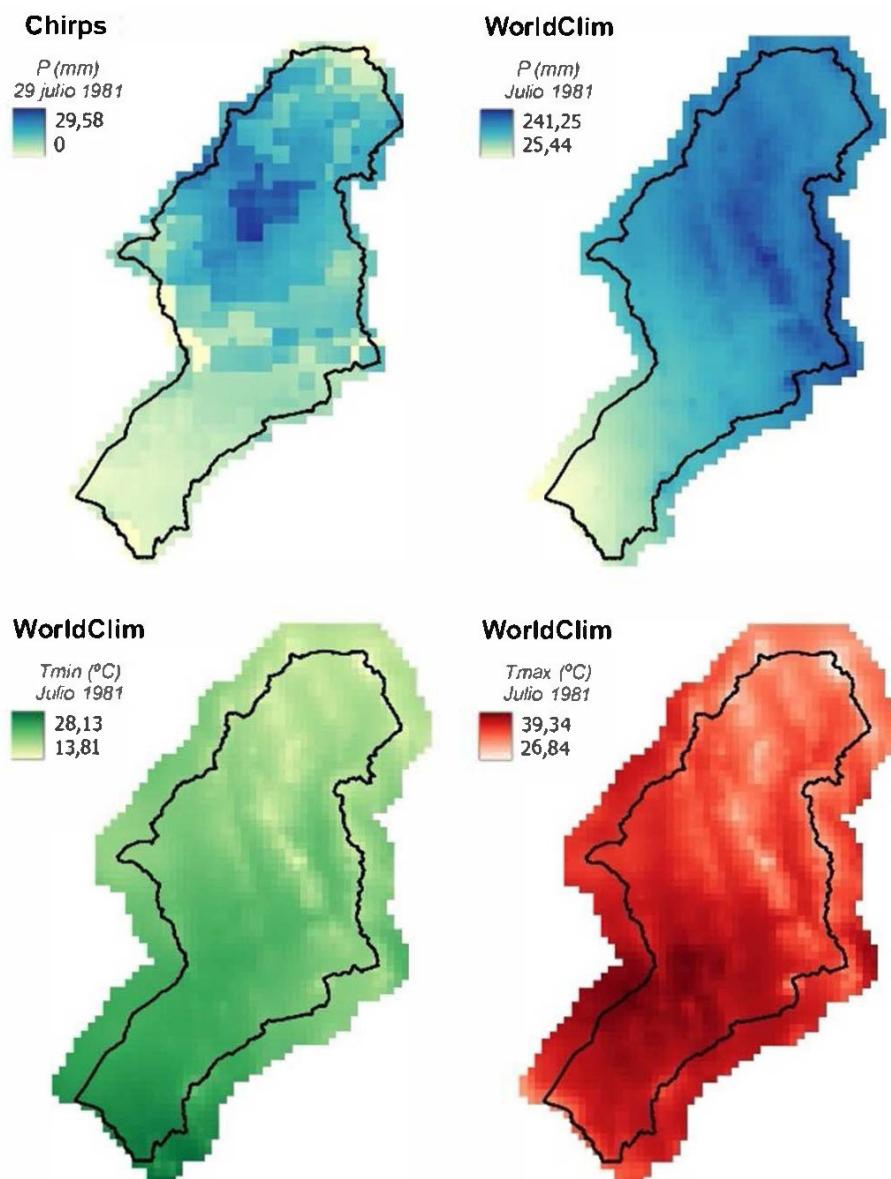
Clave	Estación	Altitud	Latitud	Longitud	P (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
			(N)	(W)			
26005	Arizpe	836	30°20'08"	110°10'03"	474,5	29,4	10
26007	Bacanuchi	1049	30°35'56"	110°14'18"	489,1	28	7,4
26008	Banamichi	675	30°00'12"	110°12'54"	459,7	30,7	13,3
26016	Carbo	464	29°41'03"	110°57'18"	374,6	31,2	13
26025	Cucurpe	853	30°19'50"	110°42'21"	524,7	29,6	10,3
26032	El Orégano	279	29°13'48"	110°42'21"	410,6	33,8	14,1
26074	Querobabi	661	30°03'02"	111°01'17"	394	31,2	11,3
26121	Ures	385	29°25'37"	110°23'31"	375,6	31,8	9,1
26139	Hermosillo II	221	29°05'56"	110°57'14"	363,5	32,2	17,7
26145	Bacoachi	1049	30°37'54"	109°58'12"	465,5	28	8,2
26180	El Cajón	390	29°28'19"	110°44'09"	414,2	32,1	11,7
26181	Rayón	560	29°42'38"	110°34'14"	500,5	30,6	11,8
26198	Mazocahui	449	29°32'26"	110°07'09"	517,6	31,4	11,2
26199	Pueblo de Álamos	589	29°12'15"	110°08'25"	498,8	30,8	11,7
26214	Huepac	644	29°54'46"	110°12'47"	496,5	30,1	9,7
26241	Meresichic	712	30°01'50"	110°40'30"	521,8	28,5	11
26244	Rancho Viejo	450	29°07'37"	110°18'54"	458,6	31,1	12,4
26271	Sinoquipe	740	30°09'20"	110°14'42"	504,5	30,5	11,6
26274	Topahue	300	29°16'15"	110°38'09"	418,6	33,1	12,9
<p><i>P = Precipitación promedio anual, Tmáx = Temperatura máxima promedio, Tmín = Temperatura mínima promedio</i></p>							

Fuente: autores.

Productos ráster. Los rásters se obtuvieron para el mismo periodo que en las estaciones *in situ*. De Chirps (Funk et al., 2015) (www.chc.ucsb.edu/data/chirps) se adquirieron datos de precipitación a una escala de tiempo diaria (12 053 rásters) con una resolución espacial de 3 minutos de arco y

de WorldClim (www.worldclim.org/data) se obtuvieron datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a una escala de tiempo mensual (396 rásters de cada variable) con resolución espacial de 2,5 minutos de arco (Figura 2).

Figura 2. Ejemplo de capa ráster con datos de Precipitación (P), Temperatura mínima (Tmín) y Temperatura máxima (Tmáx) de Chirps y WorldClim



Fuente: autores.

Herramientas de análisis. La preparación de rásters, organización y extracción de los datos se hizo mediante rutinas de código con el lenguaje de programación Python (QGIS Development Team, 2023; Van Rossum & Drake, 2009) y el programa QGIS 3.16.9-Hannover (QGIS Development Team, 2023).

Las capas que representan precipitación y temperatura se descargaron de los servidores <https://climateserv.servirglobal.net/map> (Chirps) (Funk et al., 2015) y <https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html> (WorldClim), el primero provee capas ráster de precipitación diaria y el segundo capas ráster de precipitación, temperatura máxima y mínima mensual. La preparación de las capas ráster se hizo con el programa QGIS 3.X (QGIS Development Team, 2023) y la consola de Python que trae incorporada, donde se generaron rutinas de código, utilizando los módulos GDAL (GDAL/OGR contributors, 2024), Numpy (Harris et al., 2020) y Pandas (Pandas development team, 2020).

Mediante rutinas de Python se hicieron los recortes de los ráster según el polígono de la zona de estudio, a fin de tener archivos con similar tamaño y peso. Para obtener la temperatura media mensual se sumó y se dividió entre dos los rásters de temperatura máxima y temperatura mínima para cada uno de los 396 meses.

Una vez preparados los ráster mensuales de precipitación y temperatura, mediante Python y los módulos Numpy (Harris et al., 2020) y Pandas (Pandas Development Team, 2020) se generaron arreglos matriciales tri-

dimensionales donde los ejes X y Y representan las coordenadas de latitud y longitud, ubicando los píxeles de cada ráster, y el eje Z representa el tiempo en meses durante el periodo de estudio 1981 y 2013. Con la propiedad iloc del módulo Pandas (Pandas Development Team, 2020) se extrae la serie de datos en un punto dado de los ejes X y Y en función de las coordenadas geográficas de cada una de las 19 estaciones consideradas en este estudio.

Se generaron tres matrices tridimensionales; dos de precipitación (CHIRPS y WorldClim) y la de temperatura media (WorldClim), las cuales resumen las variables climáticas en tiempo y espacio. Las series de datos en la ubicación de las 19 estaciones meteorológicas mostradas en la tabla 1 se trajeron y se exportaron a un archivo delimitado por comas. Para cada una de las 19 estaciones se tienen cuatro series: registros observados de temperatura y precipitación mensuales, precipitación Chirps, precipitación y temperatura de WorldClim.

De cada matriz tridimensional, se tomó el valor correspondiente al píxel donde coinciden las coordenadas de la ubicación de cada una de las 19 estaciones climatológicas conformando series diarias de precipitación con datos de Chirps y series mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima con datos de WorldClim. Las series diarias (Chirps) fueron sumadas para obtener la precipitación total acumulada a nivel mensual. Las series de tiempo con los datos de las variables climatológicas de los rásters y las estaciones climatológicas fueron guardadas en archivos de texto separado por comas.

Análisis estadístico. Se realizó con lenguaje de programación R (R Core Team, 2025), donde se procesaron los archivos de texto y se evaluó el ajuste de las series mediante correlaciones y los índices presentados en la tabla 2. Se analizaron las series de precipitación de Chirps y WorldClim vs. estaciones y las series de temperaturas mínimas y máximas de WorldClim vs. estaciones. La visualización de los datos y de los resultados se realizó gracias a la librería ggplot (Wickham, 2016). Las series de precipitación diaria de Chirps se sumaron para obtener valores mensuales que pudieran ser comparables con la precipitación, temperatura mínima y máxima de WorldClim y las 19 estaciones meteorológicas.

Índices para evaluar el ajuste. El ajuste de los datos rásters comparados con los datos de la precipitación y la temperatura registrada en las estaciones climatológicas *in situ*, fue evaluado usando los estadísticos del valor absoluto del error relativo (PBIAS)

(Shen et al., 2020) y el RSR que corresponde a la relación de la desviación estándar de las observaciones y la raíz del error cuadrático medio (Moriasi et al., 2007; Shrestha et al., 2017). Los índices mencionados se calculan con las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$PBIAS = \frac{\sum(R_{est} - R_{sat})}{\sum(R_{est})} * 100$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum(R_{est} - R_{sat})^2}}{\sqrt{\sum(R_{est} - \bar{R}_{est})^2}}$$

donde, R_{est} es el registro de la estación climatológica *in situ* y \bar{R}_{est} es el promedio del periodo considerado para la estación *in situ*, R_{sat} es la serie con las estimaciones de las variables climatológicas de los satélites Chirps o WorldClim. Los valores del PBIAS y del RSR se interpretaron cualitativamente con base en las categorías propuestas por Moriasi et al. (2007) presentadas en la tabla 2.

Tabla 2.

Rangos de valores del PBIAS y RSR para su interpretación cualitativa

Clasificación	RSR
Muy bueno	0 a 0,5
Bueno	0,5 a 0,6
Satisfactorio	0,6 a 0,7
Insatisfactorio	> 0,7
Clasificación	PBIAS (%)
Insatisfactorio	< -55
Satisfactorio	-55 a -30
Bueno	-3 a -15
Muy bueno	-15 a 15

Clasificación	RSR
Bueno	15 a 30
Satisfactorio	30 a 55
Insatisfactorio	> 55

Fuente: autores.

Además, el PBIAS permite determinar si en la serie comparada se tiene subestimación o sobreestimación en función de su valor. Si el valor es menor de 20 se considera

subestimación y cuando es superior a 20 se considera sobreestimación (López-Bermeo et al., 2022).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste de las estimaciones de los rasters. Se realizó la evaluación estadística del ajuste de las estimaciones basadas en interpolaciones y datos mixtos con los registros en estaciones climatológicas, con la finalidad de analizar la capacidad que tienen las plataformas con datos raster para capturar y almacenar información climática histórica.

La evaluación estadística (PBIAS y RSR) del ajuste de las estimaciones de las variables climatológicas (P, Tmáx y Tmín) se presenta en la tabla 3. De manera general y con base en las categorías presentadas en la tabla 2, las estimaciones de la precipitación y la tempera-

tura de Chirps y WorldClim guardan un ajuste “Bueno” y “Muy bueno”, ocasionales apariciones de “Satisfactorio” y ausencia de ajustes “Insatisfactorios”, con respecto a los registros históricos de las estaciones climatológicas en tierra. Los índices estadísticos menores de -20 o superiores a 20 para PBIAS (López-Bermeo et al., 2022), y mayores de 0,6 con RSR, corresponden a datos donde los sensores remotos sobreestiman o subestiman las series de temperatura y los picos de precipitación. Los resultados obtenidos son consistentes con lo concluido por Bai et al. (2016), Katsanos et al. (2016) y Peng et al. (2020).

Tabla 3.

Estadísticas de ajuste

Estación	Estación vs. Chirps				Estación vs. WorldClim			
	P		P		Tmin		Tmax	
	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR
26005	-7,574	0,433	0,263	0,527	9,567	0,376	-0,797	0,283
26007	-5,112	0,417	0,787	0,530	24,522	0,328	-0,501	0,157

Estación	Estación vs. Chirps				Estación vs. WorldClim			
	P		P		Tmin		Tmax	
	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR	PBIAS	RSR
26008	-4,139	0,386	-1,425	0,470	-5,158	0,220	-0,203	0,224
26016	-2,748	0,544	-3,011	0,597	-6,487	0,265	0,675	0,198
26025	-20,548	0,484	-5,830	0,515	2,505	0,441	-1,593	0,503
26032	-16,082	0,478	-11,495	0,559	-2,251	0,255	-2,668	0,295
26074	-22,424	0,583	-13,926	0,644	-1,320	0,192	-4,587	0,354
26121	25,811	0,672	19,724	0,644	49,668	0,653	2,530	0,399
26139	-29,539	0,614	-18,368	0,651	-18,876	0,603	0,383	0,175
26145	-8,772	0,452	-1,398	0,531	19,504	0,434	0,795	0,346
26180	-20,097	0,527	-6,801	0,586	13,523	0,275	1,068	0,199
26181	-20,385	0,472	-10,298	0,524	6,625	0,251	1,052	0,238
26198	-19,883	0,463	-0,778	0,550	10,144	0,274	-1,464	0,263
26199	-5,053	0,399	10,838	0,495	-0,669	0,231	0,729	0,320
26214	-9,594	0,418	-7,780	0,513	37,958	0,557	2,596	0,307
26241	-13,019	0,521	-8,728	0,587	8,946	0,491	5,344	0,543
26244	-7,965	0,373	4,833	0,473	-3,328	0,224	3,223	0,312
26271	-13,775	0,432	-9,099	0,469	4,472	0,266	-2,707	0,278
26274	-15,141	0,544	-13,228	0,613	7,229	0,203	0,467	0,209

Fuente: autores.

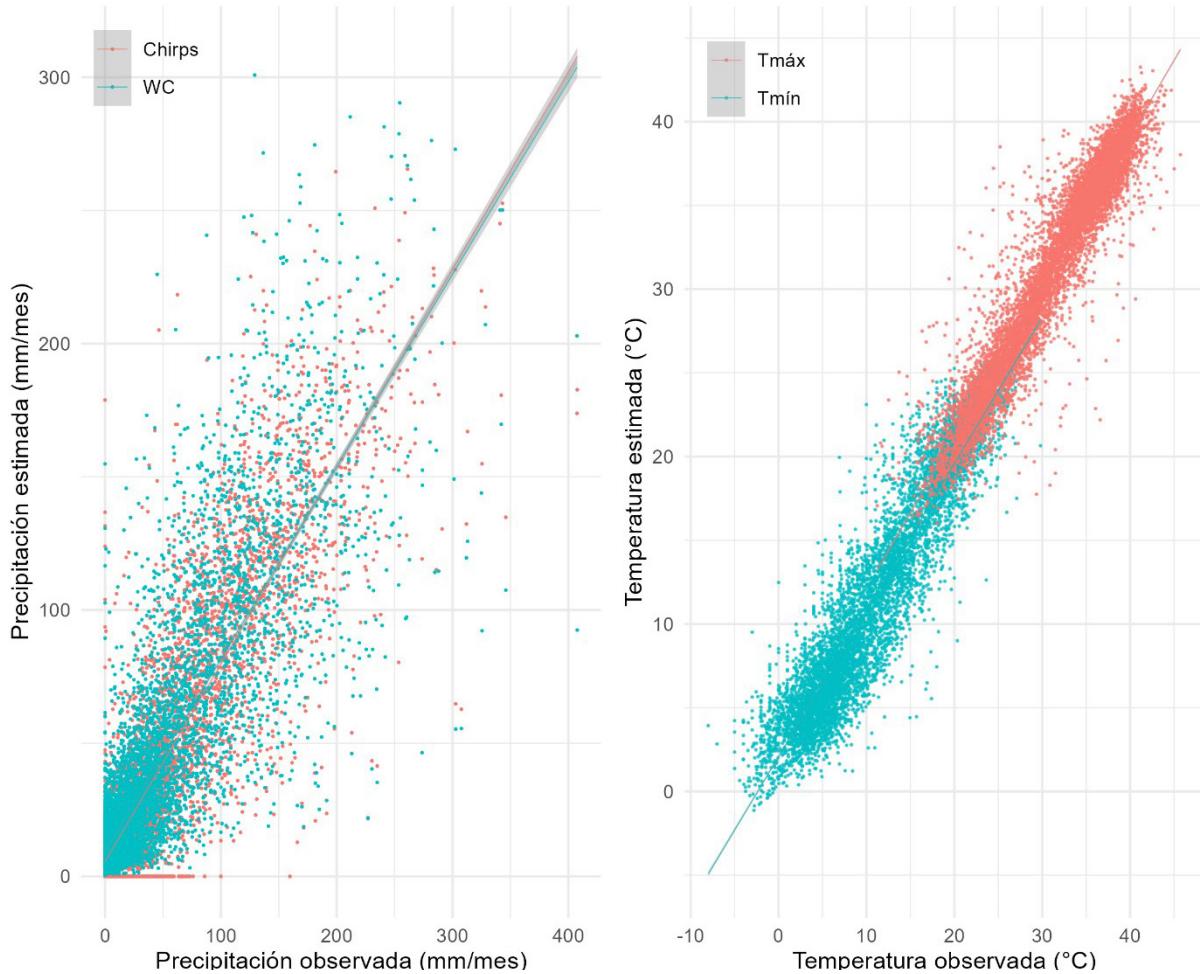
La dispersión de los registros de las estaciones y su equivalente estimación de cada ráster se presenta en la figura 3. Se aprecia que la precipitación presenta mayor dispersión que la temperatura, tanto con Chirps como con WorldClim, es decir, existe mayor diferencia entre los datos observados y las estimaciones de los rásters. A diferencia de lo encontrado por López-Bermeo et al. (2022), en este trabajo, Chirps tiende a sobreestimar

al considerar los valores en las 19 estaciones analizadas, posiblemente relacionado con la diferencia del volumen de precipitación entre Colombia y el norte de México, donde predomina la región árida o semiárida (Bai et al., 2018). Por otra parte, WorldClim tiende a subestimar ligeramente los valores mensuales de precipitación. En cuanto a las temperaturas mínima y máxima, sus estimaciones muestran un alto ajuste, con ligera

sobreestimación. El ajuste de las estimaciones de temperatura proporcionadas por WorldClim es notablemente alto; según las categorías de interpretación, son “Muy buenos”

(Figura 3), evidenciado al tener un intervalo de confianza estrecho (banda gris: intervalo de confianza al 95 %).

Figura 3. Dispersión de los registros de estaciones *in situ* vs. rásters



Fuente: autores.

El ajuste lineal de los registros de las estaciones, en comparación con los valores interpolados en rásters (Tabla 4) confirma las interpretaciones cualitativas. El valor esperado del intercepto para un ajuste ideal es de cero, no obstante, se tienen valores desde -0,76 hasta 3,03, lo cual corresponde a las variaciones presentes en las series y que se manifiestan en subestimación o sobreestima-

ción. La precipitación tanto en Chirps como en WorldClim muestran mayor magnitud en el intercepto, en comparación que las temperaturas, esto debido a la escala de los registros. Similar situación se encuentra en el coeficiente de correlación, donde los mayores ajustes que rondan el 0,9 se encuentran en la temperatura, mientras que la precipitación ronda en 0,7.

Tabla 4.

Modelo lineal de estaciones en comparación con los rásters

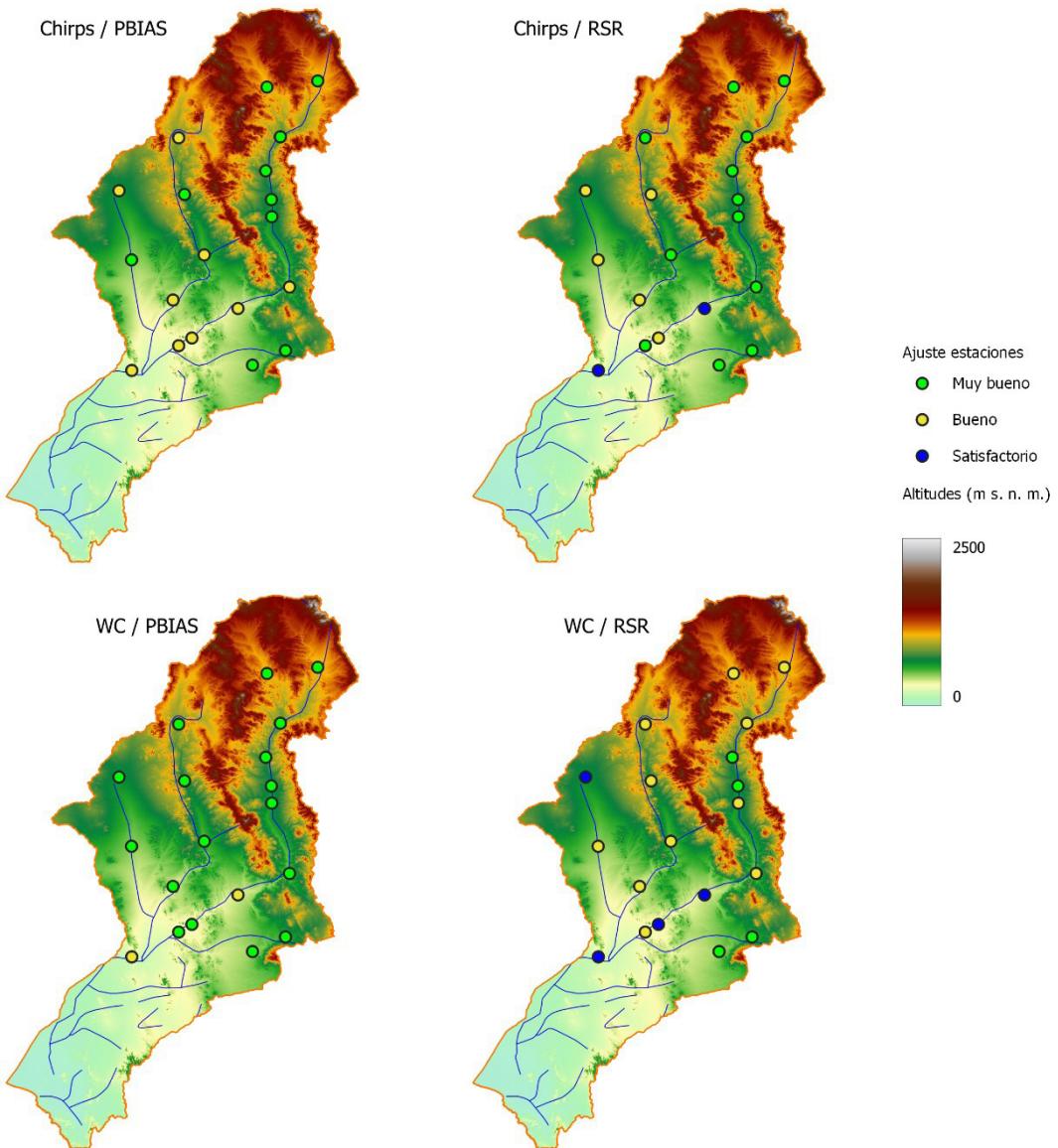
	Intercepto	Pendiente (Error estándar)	Intervalo de confianza 95% de la pendiente	R2	Valor P
PP Chirps	3,03	1,05 (0,0065)	1,03 - 1,06	0,78	p < 0,0001
PP WC	2,71	0,97 (0,0073)	0,96 - 0,99	0,7	p < 0,0001
T min	-0,76	1,01 (0,0042)	1,001 - 1,018	0,88	p < 0,0001
T max	-0,13	1 (0,0038)	0,995 - 1,009	0,9	p < 0,0001

Fuente: autores.

La distribución geográfica de las estaciones con su respectiva interpretación cualitativa del ajuste se muestra en las figuras 4 y 5. No se determina ningún patrón de asocia-

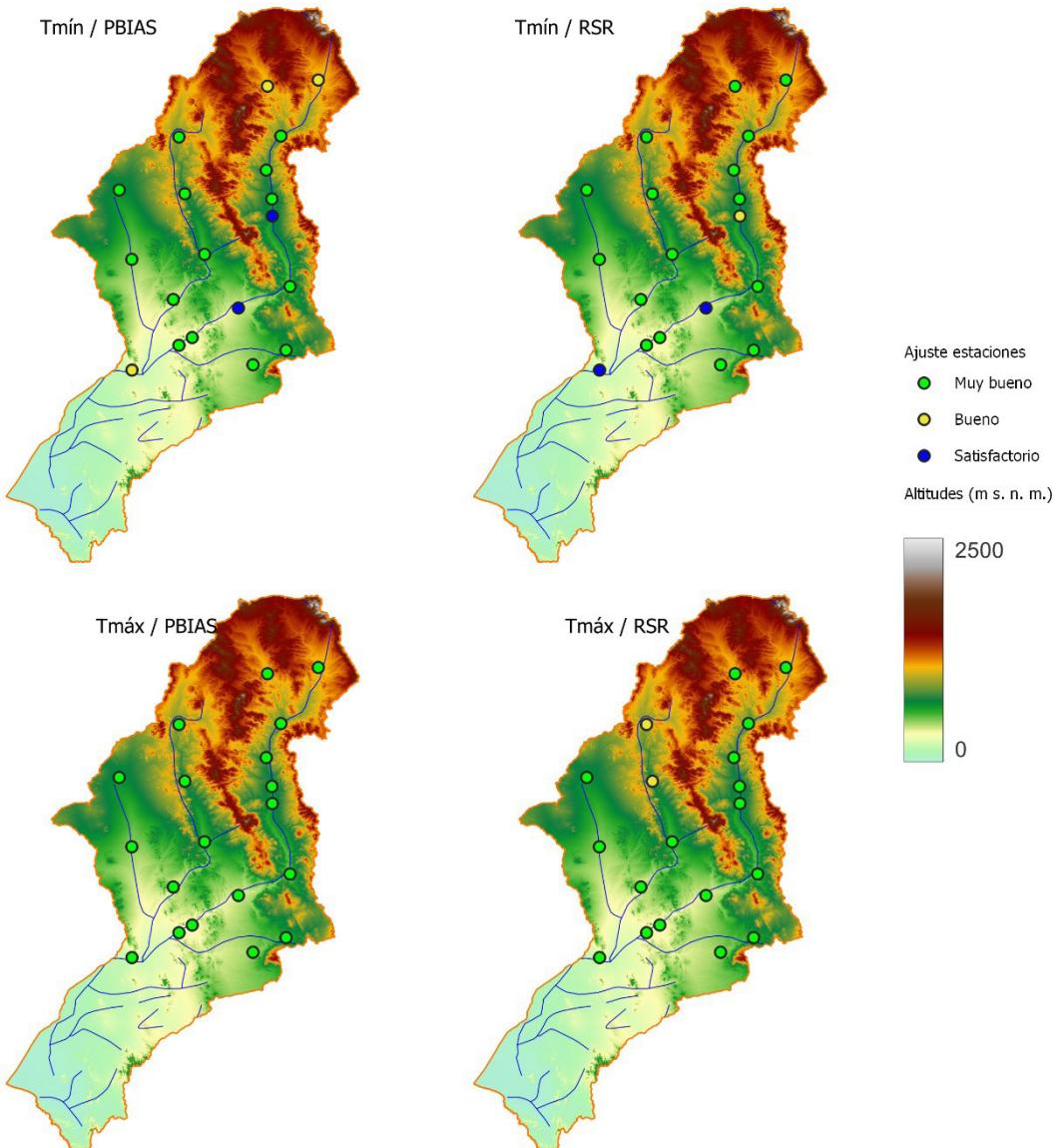
ción entre el grado de ajuste y la altitud, posiblemente porque la variabilidad en cuanto a altitud no es significativa e inferior a 1000 m s.n.m. (Katsanos et al., 2016).

Figura 4. Ajuste de los registros de precipitación de rásters



Fuente: autores.

Figura 5. Ajuste de los registros de temperatura de rásters

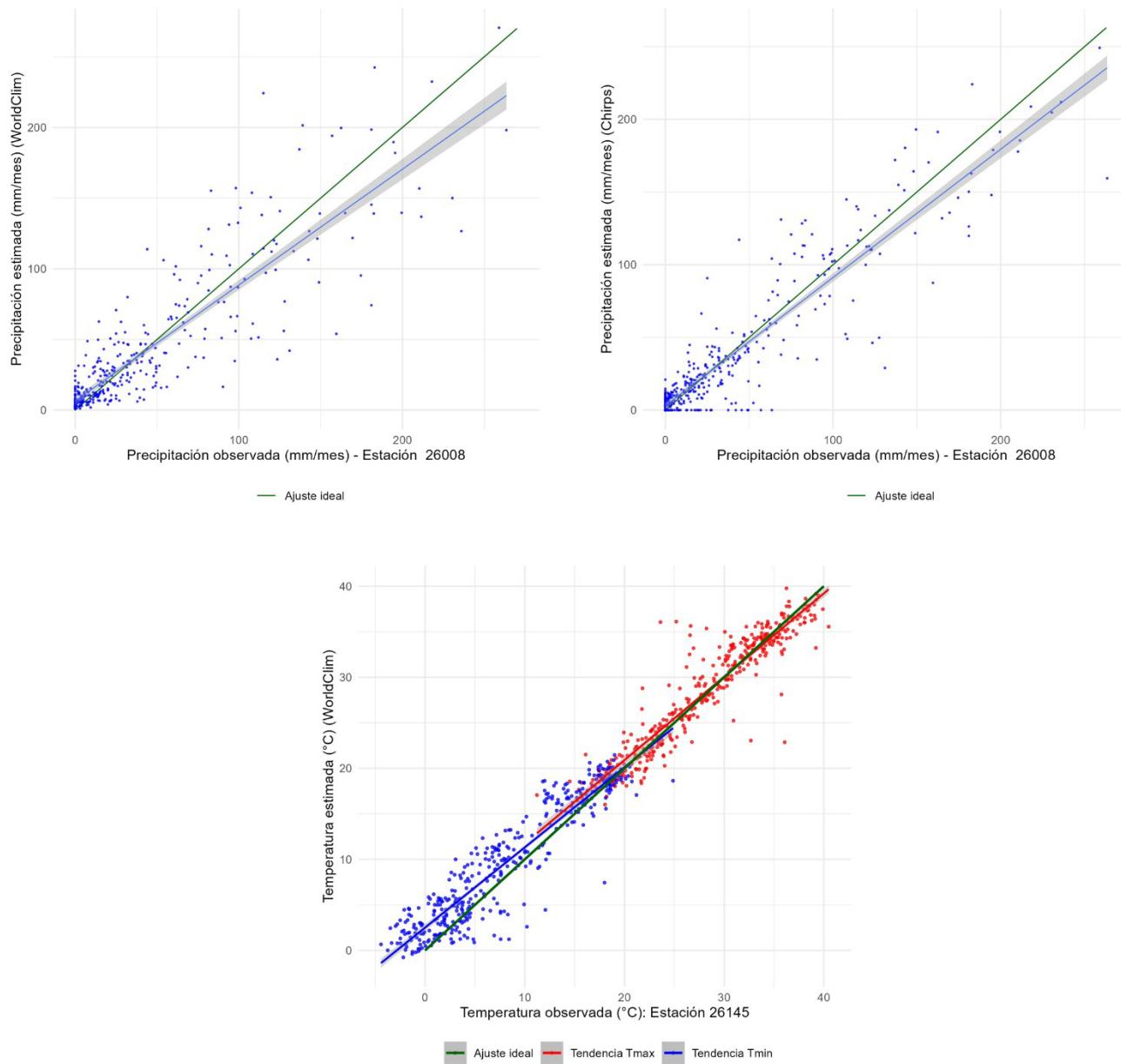


Fuente: autores.

Las series de precipitación y temperatura con ajuste “Muy bueno” se presentan en la figura 6. Se puede observar mayor dispersión en los registros de precipitación que en los registros de temperatura, esta tendencia es

similar en WorldClim y Chirps. En la dispersión de la temperatura mínima tiende a formarse una línea sobre los 45°, lo cual indica alto nivel de ajuste.

Figura 6. Series con ajuste “Muy bueno”: Precipitación WorldClim y Chirps – Estación 26145, Temperatura – Estación 26198

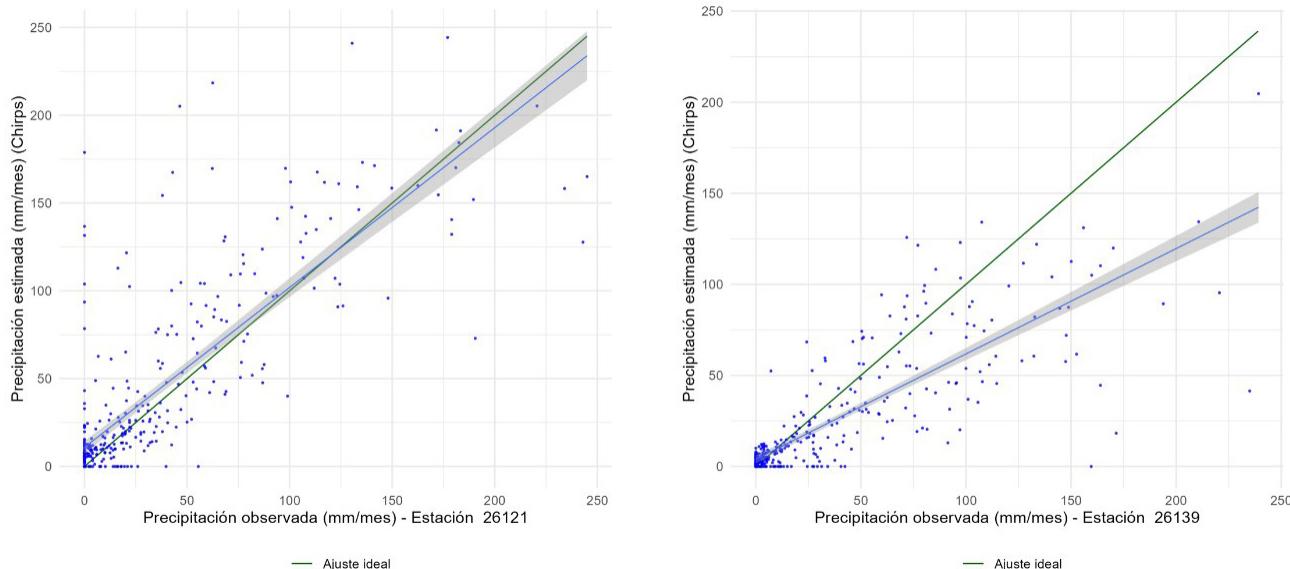


Fuente: autores

Sobre la precipitación estimada a través de Chirps, se tienen cinco casos de subestimación y un caso de sobreestimación de acuerdo con los rangos propuestos por López-Bermeo et al. (2022). Los registros de precipitación obtenidos por sensores remotos en las ubicaciones de las estaciones 26121 y 26139 presentan el menor grado de ajuste, debido

a la mayor dispersión que conlleva a generar tendencia hacia la sobreestimación o subestimación (Figura 7). La proporción de puntos atípicos que influyen hacia la sobre o subestimación es pequeña con relación al total, no obstante, tener mayor dispersión influencia para obtener estadísticas que indican bajo ajuste.

Figura 7. Series con bajo nivel de ajuste en precipitación: Arriba – Estación 26121, Abajo – Estación 26139.

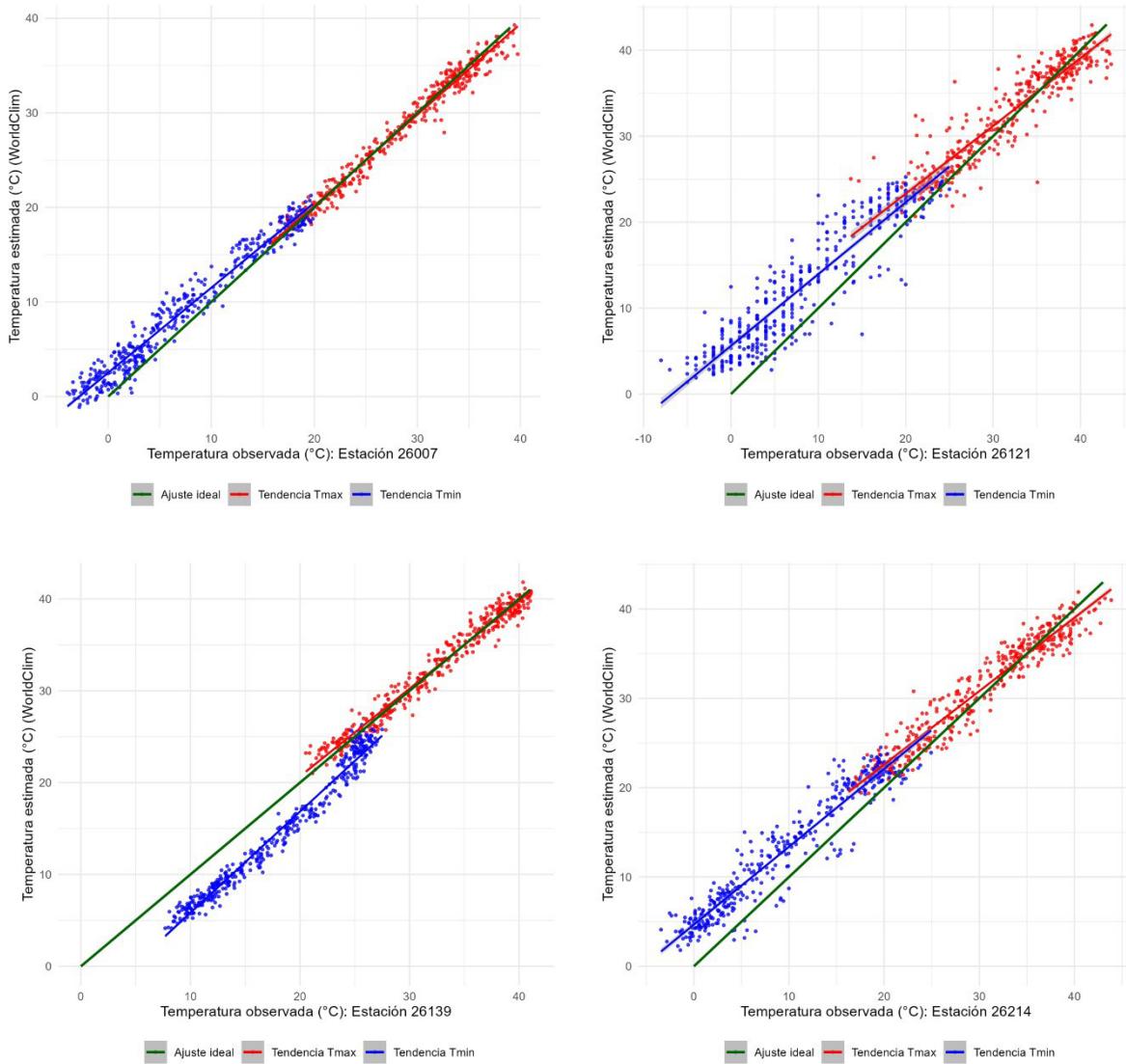


Fuente: autores.

En el caso de las estimaciones de temperatura máxima de WorldClim los ajustes son “Bueno” o “Muy bueno”, en cambio las series de temperatura mínima presentan casos donde el ajuste es “Satisfactorio”, debido a la sobreestimación (Figura 8). No obstante,

las estimaciones por sensores remotos son representativas del comportamiento de la temperatura y pueden ser utilizadas para estudios o planeación territorial considerando reescalamiento y ajuste de errores sistemáticos (Hempel et al., 2013; Poggio et al., 2018).

Figura 8. Series con bajo nivel de ajuste en temperatura mínima y máxima



Fuente: autores.

Las series de temperatura presentan errores sistemáticos que sobreestiman o subestiman el valor observado (Figura 8). El grado de ajuste y la aplicabilidad de los datos y resultados de análisis basados en sensores

remotos pueden ser optimizados al realizar corrección de errores sistemáticos con métodos como el ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) (Hempel et al., 2013; Méndez, 2016).

4 CONCLUSIONES

Los registros históricos de precipitación y temperatura de las bases de datos raster de Chirps y WorldClim tienen alto grado de confiabilidad y pueden ser utilizados en estudios hidrológicos y de clima con fines de planeación agrícola u ordenamiento territorial. Las estimaciones de temperatura tienden a integrar errores sistemáticos que subestiman o sobreestiman el valor de la variable, este comportamiento se puede tratar con estrategias de corrección de errores como el ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project). No se encontró una asociación significativa entre el grado de ajuste de las estimaciones y la altitud.

Por otra parte, para que la información que se encuentra en los ráster de Chirps o WorldClim sea cada vez más utilizada y aprovechada por los tomadores de decisiones, sobre todo en espacios territoriales, es esencial profundizar en el manejo de las plataformas y el desarrollo de aplicaciones que faciliten su uso. Una alternativa para mejorar el ajuste es promediar los píxeles vecinos. Asimismo, promover la implementación de herramientas y uso de *software* libre para alcanzar entidades territoriales que no cuentan con los recursos para acceder a información y tecnología.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original.

Autor 2: análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Autor 3: logística, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Universidad Internacional del Trópico Americano – Unitró-

pico y la Universidad Autónoma Chapingo. Se extiende agradecimiento a la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue posible gracias al apoyo de una beca de CONACYT 2018-2021 Autor 1, en el marco de la investigación

Pronóstico de caudales mediante filtros de Kalman, Programa Nacional de Becas del Gobierno de México.

LITERATURA CITADA

- Bai, L., Chen, Z., Xu, J. & Li, W. (2016). Multi-scale response of runoff to climate fluctuation in the headwater region of Kaidu River in Xinjiang of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3–4), 703-712. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1539-2>
- Bai, L., Shi, C., Li, L., Yang, Y. & Wu, J. (2018). Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over Mainland China. *Remote Sensing*, 10(3), 362. <https://doi.org/10.3390/rs10030362>
- Belay, A. S., Yenehun, A., Nigate, F., Tilahun, S. A., Dessie, M., Moges, M. M., Chen, M., Fentie, D., Adgo, E., Nyssen, J. & Walraevens, K. (2024). Estimation of spatially distributed groundwater recharge in data-scarce regions. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102072. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102072>
- Dinku, T. (2019). Challenges with availability and quality of climate data in Africa. *Extreme hydrology and climate variability* (pp71-80). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00007-5>
- Fick, S. E. & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedeleros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GDAL/OGR contributors. (2024). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219-236. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>
- Hernández-Vásquez, C. C., Ibáñez-Castillo, L. A., Gómez-Díaz, J. D. & Arteaga-Ramírez, R. (2020). Analysis of meteorological droughts in the Sonora river basin, Mexico. *Atmósfera*. <https://doi.org/10.20937/ATM.52954>
- Herrera Oliva, C. S., Campos Gaytán, J. R. y Carrillo González, F. M. (2017). Esti-

mación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 71, 34-44. <https://doi.org/10.33064/iycuua201771598>

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

Infante, S. y Zárate, G. (2012). *Métodos estadísticos: Un enfoque interdisciplinario* (2.ª ed.). La Gaya Ciencia.

Katsanos, D., Retalis, A. & Michaelides, S. (2016). Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period. *Atmospheric Research*, 169, 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.015>

Kyrgyzbay, K., Kakimzhanov, Y. & Sagin, J. (2023). Climate data verification for assessing climate change in Almaty region of the Republic of Kazakhstan. *Climate Services*, 32, 100423. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100423>

López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J. & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth*, 127, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>

Méndez, R. (2016). *Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en las zonas de topografía compleja* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile].

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (OMM-Nº 100).

Pandas Development Team. (2020). *pandas-dev/pandas: Pandas* [Versión 1.0]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>

Paredes Trejo, F. J., Álvarez Barbosa, H., Peñaloza-Murillo, M. A., Moreno, M. A. & Farias, A. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera*, 29(4), 323-342. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04>

Paredes-Trejo, F., Alves Barbosa, H., Venkata Lakshmi Kumar, T., Kumar Thakur, M. & de Oliveira Buriti, C. (2021). Assessment of the CHIRPS-based satellite precipitation estimates. In *Inland Waters - Dynamics and Ecology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91472>

Peng, F., Zhao, S., Chen, C., Cong, D., Wang, Y. & Ouyang, H. (2020). Evaluation and

- comparison of the precipitation detection ability of multiple satellite products in a typical agriculture area of China. *Atmospheric Research*, 236, 104814. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104814>
- Perrin, G., Rapinel, S., Hubert-Moy, L. & Bioret, F. (2020). Bioclimatic dataset of Metropolitan France under current conditions derived from the WorldClim model. *Data in Brief*, 31, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105815>
- Poggio, L., Simonetti, E. & Gimona, A. (2018). Enhancing the WorldClim dataset for national and regional applications. *Science of The Total Environment*, 625, 1628-1643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.258>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rivera, J. A., Hinrichs, S. & Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS dataset to assess wet and dry conditions along the semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*, 8413964. <https://doi.org/10.1155/2019/8413964>
- Romero, D. & Alfaro, E. J. (2024). Spatiotemporal variability of the rainy season in the Yucatan Peninsula. *International Journal of Climatology*, 44(8), 2561-2574. <https://doi.org/10.1002/joc.8468>
- Romero-Hernández, C. M., Avila-Díaz, A., Quesada, B., Medeiros, F., Cerón, W. L., Guzman-Escalante, J., Ocampo-Marulanda, C., Rodrigues Torres, R. & Zuluaga, C. F. (2024). Bias-corrected high-resolution precipitation datasets assessment over a tropical mountainous region in Colombia: A case of study in Upper Cauca River Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 140, 104898. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104898>
- Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y. & Zhang, J. (2020). Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). *Journal of Hydrology*, 591, 125284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>
- Shrestha, N. K., Qamer, F. M., Pedreros, D., Murthy, M. S. R., Wahid, S. M. & Shrestha, M. (2017). Evaluating the accuracy of Climate Hazard Group (CHG) satellite rainfall estimates for precipitation based drought monitoring in Koshi Basin, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.004>
- Shumilo, L. & Skakun, S. (2024). Optical flow of temperature reveals climate change patterns for agriculture and forestry. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, 101198. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101198>
- SMN. (2019). *Sistema de Información Climática Computarizada CLICOM*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://cupa-clicom.cicese.mx/malla/index.php>

Tikuye, B. G., Ray, R. L., Manjunatha, B., Tefera, G. W. & Gurau, S. (2024). Drought monitoring using the Climate Hazards InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) in Ethiopia. *Natural Hazards Research*, 5 (2), 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.12.002>

Van Rossum, G. & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace. <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/1593511>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag. <https://ggplot2.tidyverse.org>

Zakeri, F. & Mariethoz, G. (2024). Synthesizing long-term satellite imagery consistent with climate data: Application to daily snow cover. *Remote Sensing of Environment*, 300, 113877. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113877>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

ÁREA AGRÍCOLA

Arias-Aguirre, D. M., Martínez-Osorio, J. W. y Alvarado-Sanabria, O. H. (2026). Efecto de la inoculación con tres microorganismos sobre el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 11 – 34. <https://doi.org/10.22490/21456453.8974>

Álvarez-Herrera, J. G., Jaime-Guerrero, M., Patiño-Serrano, L. M. (2026). Evaluación de diferentes estrategias de fertilización en el control del rajado de tallos en alstroemeria variedad ‘Bali’. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 35 – 53. <https://doi.org/10.22490/21456453.9127>

Botina-Azaín, B. L., Beltrán-Acosta, C. R., Zapata-Narváez, Y. A. (2026). Germinación conidial y crecimiento micelial *in vitro* de *Trichoderma koningiopsis* (Th003) con agroquímicos de papa. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17 (1), 55 – 72. <https://doi.org/10.22490/21456453.9186>

Ochoa Flórez, D. E., Durán Osorio, D. S., Trujillo Navarro, Y. Y. (2026). Influencia de la región y tostión en la identificación de grupos funcionales de cafés colombianos mediante espectroscopía infrarroja. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 73- 95. <https://doi.org/10.22490/21456453.9358>

Intriago-Flor, F. G., Viteri-Castro, L. M., Alvarado-Vásquez, K. E. (2026). Aprovechamiento integral de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la elaboración de una infusión en la microempresa de chocolates Fuentes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 97-118. <https://doi.org/10.22490/21456453.9621>

ÁREA PECUARIA

Sandoval Chila, M. D., Lozada I onz^a lez, C. A., Posada D uitrago, M. L. (2026). Marcadores moleculares y diversidad genética en conejos: herramientas para la mejora y conservación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 119 – 149. <https://doi.org/10.22490/21456453.9980>

ÁREA AMBIENTAL

Zuluaga, L., Caballero, A., Arias, J., Lombo, D. y Rivera, M. (2026). Etnobotánica cuantitativa en agropaisajes del Caribe Colombiano: Implicaciones para la conservación del bosque seco tropical. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 151 - 182.

<https://doi.org/10.22490/21456453.8412>

Vásquez, J. A., Cely, G. E. y Serrano, P. A. (2026). Captura de carbono en suelos, bajo tres coberturas vegetales en complejos de páramos de Boyacá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 183-219. <https://doi.org/10.22490/21456453.8955>

Vivas-Sánchez, J., Gamboa-García, D., Duque, G. (2026). Dinámica temporal de los hábitos tróficos e incidencia de microplásticos en bagres (Ariidae) en la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 221 - 242.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9131>

Bustamante Rua, M. O., Daza Álvarez, C. A., López Rugeles, D., Melo López, V., García Leoz, V. (2026). Análisis geoespacial de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en el corredor minero del Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17 (1), 243 – 265.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9133>

Losada Losada, H. F., Popayán-Hernández, J. G. (2026). Impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial y la conductividad hidráulica: estudio de caso en la cuenca del río Baché, Huila (2004-2024). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 267 – 294.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9883>

Tello-Ochoa, D.A., Pulido-Osorio, M.D., Barragán-Ruiz, C.E. (2026). Evaluación multitemporal de la cobertura vegetal del municipio de Aipe, Huila, Colombia, y sus reservas naturales de la sociedad civil durante los últimos 30 años. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17 (1), 295 - 317. <https://doi.org/10.22490/21456453.9874>

Narváez-Ortiz, I., Ortiz-Paz, R. y Hernández-Vásquez, C. (2026). Análisis espaciotemporal de estimaciones de precipitación y temperaturas de Chirps y WorldClim en la cuenca del río Sonora, México. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(2), 319 - 343.

<https://doi.org/10.22490/21456453.8484>

INSTRUCCIONES PARA AUTORES ■

La **Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)** es una publicación oficial de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), destinada a publicar artículos resultado de las investigaciones originales en el área agraria y ambiental y áreas de conocimiento afines.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA) y su misión en ser divulgadores de la investigación en áreas agrarias y las otras ciencias involucradas en las que se abarcan en todas las disciplinas dentro de las áreas de las ciencias agrarias y ambientales (OCDE) a través de artículos de artículos de investigación y artículos de revisión resultantes del trabajo de los investigadores nacionales e internacionales.

Proceso de arbitraje de manuscritos.

La recepción formal de artículos se hará única y exclusivamente a través de la plataforma de gestión editorial de la revista, Open Journal System – OJS (<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/index>).

Nota: aquellos manuscritos que sean remitidos al correo electrónico no serán considerados para iniciar el proceso editorial.

El equipo de gestión editorial realiza la verificación inicial a los manuscritos postulados y revisa que estén orientados a las temáticas de RIAA y conforme a las normas de la publicación. Aquellos que no cumplan con la lista de chequeo inicial serán devueltos al autor.

Los artículos que acaten los lineamientos editoriales establecidos por la revista iniciarán la fase de asignación de revisores. El equipo editorial seleccionará expertos en el tema para que evalúe el manuscrito bajo la modalidad de doble ciego. Estos expertos serán académicos, especialistas o árbitros ad hoc de reconocida credibilidad en el ámbito nacional y/o internacional. Los revisores dictaminarán sobre originalidad, relevancia, pertinencia y contenido y registrarán su decisión en el Formato para concepto de

evaluación. En caso de obtener evaluaciones positivas, se le notificará al autor para que incorpore dichas observaciones y continúe dentro del proceso editorial.

Una vez adaptado el artículo, el autor deberá remitirlo nuevamente al equipo editorial, dentro de los plazos establecidos para ello, junto con una comunicación especificando las modificaciones efectuadas y cuáles no, indicando los motivos de la negativa. En caso de que un artículo obtenga un concepto favorable y otro desfavorable, será un integrante el comité editorial y/o científico el encargado de dirimir cualquier controversia y cuyo concepto y recomendación editorial será definitiva. Las decisiones del Comité Editorial son inapelables.

Las correcciones ortográficas en el texto son hechas directamente por el equipo editorial de la revista, sin consultar a los autores, además tiene la autonomía de revisar el documento y compararlo con softwares anti-plagio con miras de asegurar la originalidad del manuscrito, luego de este proceso, el comité emitirá observaciones que el autor debe acatar previo a la evaluación por pares. Sin embargo, una versión final antes de impresión y/o publicación en la página web de la RIAA será enviada a los autores para su aprobación. Se considera que la versión final es aceptada si el autor no responde en los tiempos estimados.

La recepción de un manuscrito no obliga a la publicación del mismo. La revisión de los manuscritos se hará respetando el derecho de los autores a la confidencialidad en cuanto a la información, resultados y esfuerzo creativo. Así mismo, se respetará el derecho a la confidencialidad de los revisores y editores.

Política de acceso libre

RIAA proporciona acceso público y gratuito a todo su contenido con el fin de promover un mayor intercambio global del conocimiento y fomentar la lectura y citación de los originales publicados. RIAA no tolera ninguna forma de plagio (total, parcial o conceptual). En caso de

dentificar algún plagio, además de informar al autor el retiro del artículo, buscará advertir a los autores plagiados. RIAA se acoge a lo establecido en la política de plagio de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Periocidad

RIAA es una publicación semestral (enero-junio y julio-diciembre).

Idioma

Los manuscritos enviados pueden estar escritos en español o inglés.

Tipología de manuscritos La RIAA admite las siguientes tipologías de artículos:

Artículo de investigación: se asocia a la divulgación de productos de investigación en sentido estricto. Su estructura debe contar con:

- Introducción
- Materiales Y Métodos
- Resultados y Discusión
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

Artículo de revisión: es la sistematización, análisis y balance de lo investigado sobre un problema en particular y tiene por objeto dar cuenta de sus referentes conceptuales, metodológicos y epistemológicos, además de los avances y tendencias del campo investigado. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión analítica de por lo menos 50 referencias bibliográficas. Un 60% de la literatura citada debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 4 años.

La estructura que se propone es:

- Introducción
- Planteamiento de la temática
- Recuperación Bibliográfica (en forma de tablas, pictogramas, mapas conceptuales entre otros)
- Discusión Ge Oos Kallazgos
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Literatura citada

La postulación formal de los artículos de revisión estará sujeta al previo análisis y verificación de la temática y pertinencia del asunto abordado por parte del equipo editorial. En ese sentido, la carta para la solicitud de publicación del artículo de revisión se recibirá de manera inicial a través del correo electrónico de la revista y una vez cuente con el respectivo aval de los editores, se le solicitará al autor realizar envío a través de OJS para el respectivo proceso editorial.

Remisión del manuscrito

Como parte del proceso de envío, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

La Revista de Investigación Agraria y Ambiental se acoge a la cultura de la originalidad para el desarrollo de la producción intelectual de la institución y por esta razón todos los artículos postulados serán sometidos a verificación con la herramienta **Turnitin**. En caso que el informe arroje un % de similitud superior al 30% y no derivarse de un trabajo de grado o tesis de postgrado, el equipo editorial tendrá la autonomía de retirar el artículo del proceso editorial.

Lista de comprobación inicial:

1. El manuscrito es inédito, no se ha publicado previamente, ni está siendo postulado simultáneamente a otra publicación.
2. Cumple con los lineamientos establecidos en las Instrucciones para Autores.
3. Se emplea la plantilla diseñada para la presentación de manuscritos.
4. Se han registrado todos los autores en el envío. Este paso es indispensable para evitar retrasos posteriores en el proceso, edición y publicación del artículo.
5. En el apartado "Comentarios para el editor" tendrá la opción de sugerir 3 posibles evaluadores, con su respectivo nombre, afiliación institucional y correo electrónico.
6. Citas y referencias redactadas según estilo APA.
7. Emplea tesauros para la construcción de palabras clave.

Formato general del documento

- Documento en formato Word
- Tamaño de papel carta (21.5 x 27.9 cm) y márgenes 3 cm superior, 2.5 cm izquierda, 3 cm inferior y 2 cm derecha, a una sola columna.
- Tipo de letra Verdana, tamaño 10.
- Espacio interlineal de 1.15 cm.
- Se recomienda que la extensión de los manuscritos postulados para publicación no exceda las 4000 palabras (incluyendo tablas, figuras y literatura citada), y hasta 6000 palabras para los artículos de revisión (incluyendo tablas, figuras y literatura citada).
- Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas), le recomendamos que lo coloque como anexo al documento. Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

Título y autores

El título no debe exceder 15 palabras. Debe describir el contenido del artículo de manera clara y concisa, evitando el uso de palabras ambiguas, abreviaturas y signos de interrogación y exclamación.

Para cada uno de los autores que aparecen en el encabezado se debe proporcionar: nombre completo, último título académico obtenido o estudios actuales, filiación institucional, ciudad y país, correo electrónico. Omite cargos, grados docentes, nombres de grupo de investigación, reconocimientos, etc.

Resumen

El resumen identifica el objetivo y expone de manera breve la metodología, los resultados y las conclusiones del estudio. No deberá exceder las 250 palabras, tampoco incluir citas bibliográficas o abreviaturas, excepto aquellas que sean ampliamente conocidas. Según sea el idioma original del manuscrito deberá incluirlo en un segundo idioma (inglés y español).

Palabras clave

Se sugiere emplear una lista de cuatro a siete palabras, presentadas en orden alfabético y separadas por punto y coma (;).

No repita palabras que se encuentren en el título. Evite el uso de palabras en plural y frases. Idealmente emplee palabras normalizadas o descriptores del tesoro AGROVOC, UNESCO y que sean aceptadas por bases de datos internacionales.

Resumen gráfico

Es una representación concisa y visual de los principales hallazgos de la investigación. Deberá permitir al lector comprender rápidamente la esencia del artículo e incentivar su lectura.

Será requisito que todos los artículos aceptados incluyan esta imagen.

Tablas y figuras

Las tablas deben explicarse por sí solas y no duplican lo planteado en el texto, sino que lo sustituyen o complementan.

Dentro del texto refiérase a la tabla de la siguiente forma, (Tabla 1). Presente los datos en una tabla real sin líneas y columnas, a espacio sencillo, sin divisiones verticales ni divisiones internas. Se deben utilizar unidades del Sistema Internacional (SI). Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados como notas al pie en cada tabla. En ningún caso se admitirán tablas en formato apaisado.

Un ejemplo de la presentación de una tabla es:

Tabla 1. Ejemplo de la presentación de una tabla

Número de la muestra	Nombre	Apellido	Departamento
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Fuente de consulta: adaptado de: XXXXX.

Dentro de la categoría de figuras se incluyen gráficos, imágenes, fotos, y cada una de ellas debe tener su correspondiente leyenda y fuente, en caso de ser de su propia autoría mencionarlo. Las abreviaturas y acrónimos deben ser explicados en la leyenda

de la figura. Las figuras deben ser enviadas en formato .jpg .gif o .png y deben tener la calidad necesaria para su publicación (más de 1024pixeles). Un ejemplo de figura:

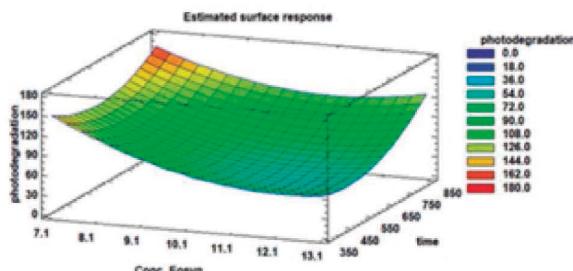


Figura 1. Título de la figura. Leyenda de la figura, el tipo de letra verdana tamaño 9.

Fuente de: xxxxxx

Ecuaciones

Todas las ecuaciones se enumeran al lado de la misma de la forma ecuación 1 citadas en el texto como (ecuación 1). Las ecuaciones se sugieren que se desarrollen en el editor de ecuaciones de Microsoft Word o a través de la aplicación de Mathtype.

Contribución de la autoría

En esta sección se explica cuál fue la contribución de cada autor al artículo. Ejemplo: Primer autor: Metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura – borrador original. Segundo autor: Investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura – revisión y edición. Tercer autor: Logística, revisión y edición. Cuarto autor: análisis de datos, revisión y edición. Quinto autor: Adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura – revisión y edición.

Agradecimientos

Esta sección se utilizará para hacer un reconocimiento a aquellas personas o instituciones que han hecho contribuciones sustanciales al trabajo o han prestado asistencia en la investigación (técnica, financiera, logística, intelectual, entre otras.). Los agradecimientos deben ir como una sección separada después de la discusión y antes de las referencias. Se incluye aquí, las referencias de los proyectos que hicieron posible el estudio.

Literatura citada

Deberán incluirse todas aquellas fuentes o autores que fueron citados en el cuerpo del documento. Nunca deberá referenciarse un autor que no haya sido citado y viceversa. Tenga en cuenta que no se admitirán artículos sin referencias. Un 60% de las citas debe provenir de investigaciones publicadas en los últimos 10 años.

Esta lista se organiza en orden alfabético y sin enumerar, y cada una debe tener sangría francesa. Para la referenciación de números o volúmenes de alguna publicación usar números arábigos y no romanos.

Forma básica:

Apellido, A.A., Apellido, B.B., y Apellido, C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen (número), pp-pp.

Solo utilice fuentes electrónicas que correspondan a publicaciones con respaldo institucional, cuyo contenido no pueda ser modificado o eliminado en el futuro. No utilice información proveniente de páginas comerciales o sitios de opinión.

El formato de la literatura citada debe seguir la normas APA, en cuanto a citación de artículos científicos, libros, capítulos de libro, páginas Web, tesis de doctorado, maestría y pregrado, informes, reportes, etc.

Anexos

Si tiene figuras que ocupen una página completa (dos cuartillas) o información adicional relevante del estudio, pero que por su extensión no es posible situarla en el texto principal, le recomendamos que lo coloque como anexo al documento (Anexo 1, Anexo 2, etc.). Esta figura quedará enlazada en el espacio web donde se alojará su artículo y en el caso de la versión impresa se maneja con código QR.

*** Se sugiere que los autores usen la plantilla diseñada para los artículos presentados a la revista:

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about/submissions> ***

GUIDE FOR AUTHORS ■

The Journal of Agrarian and Environmental Research (RIAA) is an official publication of the School of Agricultural, Livestock and Environment Sciences (ECAPMA) of the National Open and Distance University (UNAD), destined to publish articles resulting from the original investigations in the agrarian and environmental area and related areas of knowledge in animal production, agriculture and sustainable use of natural resources. As examples of related areas, mention, among others, Ethics, Ecology, Sociology, Geography, History, Law and Economics, when dealing with perspectives of development, styles of agriculture, agrarian history, development sustainable, of environmental ethics, of agrarian and environmental policy, environmental, forestry and agrarian legislation or of significant and innovative contributions with a systemic, interdisciplinary and / or transdisciplinary vision.

The mission of RIAA is to promote communication and collaboration between national and international researchers through the dissemination and transfer of knowledge related to agricultural sciences and the environment, to strengthen the generation of new knowledge. The subjects in which RIAA publishes its research products are:

1. Agroecology and sustainable production models
2. Animal physiology and nutrition
3. Ethology and animal welfare
4. Land use and management
5. Principles and strategies of environmental management
6. Rural development, Education and Social projection

7. Biotechnology and alternative energies
8. Agroforestry systems, agroforestry, agrobiodiversity
9. Clean technologies
10. Integral management of solid waste
11. Environmental Modeling and risk management
12. Climate change
13. Diagnosis and pollution control
14. Animal and environmental ethics
15. Alternative processes for water treatment.

Article arbitration process

The editor receives the postulated manuscripts for publication and reviews that are oriented to the RIAA themes and in accordance with the publication rules. After this, the originals pass to the Editorial Committee for the appointment of external peers. All originals are submitted to arbitration in the double-blind modality, at least two pairs, which must be academics, specialists or *ad hoc* arbitrators. According to the opinion of the peers (which is recorded in the format for evaluation concept), the authors are requested or not to make major or minor modifications and the adaptation of the originals to the editorial policy of the journal.

In the event that a document presents a favorable and unfavorable concept, it will be sent to a third evaluator whose opinion will be final, with the Editorial Committee in charge of resolving any dispute that may arise with respect to the evaluations, and it is the instance that decides which articles will be published, the decisions of the Editorial Committee are unappealable.

The orthographic corrections in the text are made directly by the editorial Committee of the journal, without consulting the authors, it also has the autonomy to review the document and compare it with anti-plagiarism software in order to ensure the originality of the manuscript, after this process, the committee will issue observations that the author must comply with prior to the peer evaluation.

However, a final version prior to printing and / or publication on the RIAA website will be sent to the authors for approval. It is considered that the final version is accepted if the author does not respond in the estimated times.

The reception of a manuscript does not oblige the publication thereof. The revision of the manuscripts will be done respecting the right of the authors to the confidentiality regarding the information, results and creative effort. Likewise, the right to confidentiality of reviewers and editors will be respected.

Remission of the manuscript

As part of the submission process, authors are required to verify that their submission meets all the elements shown below. Authors who do not comply with these guidelines will be returned to the authors.

Initial checklist:

1. The manuscript is unpublished, it has not been previously published, nor is it being simultaneously submitted to another publication.
2. It complies with the guidelines established in the Instructions for Authors.
3. The template designed for the presentation of manuscripts is used.

4. All authors have been registered in the shipment. This step is essential to avoid further delays in the process, editing and publication of the article.
5. SUGGEST 5 POSSIBLE EVALUATORS with their respective name, affiliation and email. Add the data in the box called "Comments for the EDITOR". If you wish, you can mention the possible evaluators with whom you have a conflict of interest and who do not want you to review your manuscript.
6. references written according to APA style.
7. Use thesauri for the construction of keywords.

Free Access policy

RIAA provides free public access to all its content to promote a greater global exchange of knowledge and encourage the reading and citation of published originals. RIAA does not tolerate any form of plagiarism (total, partial or conceptual). In case of identifying any plagiarism, in addition to informing the author of the withdrawal of the article, it will seek to warn the plagiarized authors. RIAA accepts the provisions of the plagiarism policy of the National Open and Distance University (UNAD).

Frequency

RIAA is a biannual publication (January-June and July-December).

Language

Submitted manuscripts may be written in Spanish or English.

Postulation of manuscripts

The RIAA has several types of articles:

- Research Articles
- Review articles

Research articles are associated with the dissemination of research products in the strict sense. This manuscript format should have: introduction, materials and methods (experimental design and statistical analysis), results and discussion, conclusions, acknowledgments, author contributions and cited literature.

On the other hand, **the review article** is the systematization, analysis and balance of the research on a problem and aims to account for their conceptual, methodological and epistemological references, in addition to the advances and trends of the field investigated. It is characterized by presenting a careful analytical review of at least 50 bibliographical references. 60% of the cited literature must come from research published in the last 4 years. The structure that must have is: introduction, approach of the subject, standard bibliographic review (in the form of tables, pictograms, conceptual maps among others.), discussion of the findings, conclusions, acknowledgments and literature cited.

General format of the document

Document in Word format. Letter paper size (21.5 x 27.9 cm); margins 3 cm upper, 2.5 cm left, 3 cm lower and 2 cm right, to a column. Font Verdana, size 10. Interlinear space of 1.5.

It is recommended that the extension of manuscripts postulated for publication does not exceed 4000 words (including tables, figures and literature cited); 6000 words for review articles.

If you have figures that occupy a complete page (two pages), we recommend that you place it as an annex to the document. This figure will be linked in the web space where your article will be housed and in the case of the printed version, it will be handled with a QR code.

Titles and authors

The title must not exceed 15 words. You must describe the content of the article clearly and concisely, avoiding the use of ambiguous words, abbreviations and question marks and exclamation marks.

For each of the authors that appear in the header, you must provide: full name, last academic degree obtained or current studies, institutional affiliation, city and country, email. Omit charges, teaching degrees, research group names, recognitions, etc.

Tables and figures

The tables must be explained by themselves and do not duplicate what is stated in the text, but replace or complement it.

Within the text refer to the table as follows: (Table 1). Present the data in a real table without lines and columns, in single space, without vertical divisions or internal divisions. International System (SI) units must be used. Abbreviations and acronyms should be explained as footnotes in each table. In no case will tables be allowed in landscape format. An example of the presentation of a table is:

Table 1. Example of the presentation of a table

Number of the sample	Name	surname	Providence
M1	Milton	Rodríguez	Cundinamarca
M2	Alberto	Ruiz	Cundinamarca
M3	Ricardo	Cadena	Cundinamarca

Source: xxxxx

Within the category of figures include graphics, images, photos, and each one of them must have its corresponding legend and source, in case it is of its own authorship to mention it. The abbreviations and acronyms must be explained in the legend of the figure. The figures must be sent in .jpg .gif or .png format and must have the necessary quality for publication (more than 1024pixels).

Equations

All the equations are listed next to it in the equation form 1 cited in the text as (equation 1). The equations are suggested to be developed in the Microsoft Word equation editor or through the Mathtype application.

References and bibliographical citations

All those sources or authors that were cited in the body of the document should be included. An author who has not been cited must never be referenced and vice versa. Keep in mind that articles without references will not be accepted. 60% of citations must come from research published in the last 10 years.

This list is organized in alphabetical order and without enumeration, and each one must have French indentation. For the reference of numbers or volumes of some publication, use Arabic and non-Roman numerals.

Basic form:

Surname, A.A., Surname, B.B., and Surname, C. C. (Year). Article title. *Name of the journal, volume* (number), ##-##.

Only use electronic sources that correspond to publications with institutional support, whose content can not be modified or eliminated in the future. Do not use information from commercial pages or opinion sites.

Format of the cited literature must follow the APA standards, in terms of citation of scientific articles, books, book chapters, Web pages, doctoral, master and undergraduate theses, reports, reports, etc.

Annexes

If you have figures that occupy a full page or additional relevant information from the study, but due to their length it is not possible to place it in the main text, we recommend to place this information as an annex to the document (Annex 1, Annex 2, etc.). This information will be linked to the web space, where your article will be hosted and, in the case of the printed version, it is managed with code QR.

*** It is suggested that the authors use the template designed for the articles submitted to the magazine:

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about/submissions>