



Grupo de Investigación: Inyumacizo

Sistemas agroambientales: estrategias de manejo integral en condiciones del trópico





Sistemas agroambientales: estrategias de manejo integral en condiciones del trópico

Autores:

Nelly María Méndez Pedroza
Andrés Mauricio Munar Samboní
Mauro Albeiro Bravo Gaviria
Andrés David Vargas Guzmán
Oscar Eduardo Valbuena Calderón
Carlos Andrés Moreno Salguero
Ismael Dussán Huaca
Cristian David Plaza Pérez
Paola Andrea Tenorio Sánchez
Francisco José Montealegre Torres
Carlos Guillermo Mesa Mejía
Danilo Bonilla Trujillo
Lucerina Artunduaga-Pimentel
Ricardo Rusinque-Becerra

Héctor Fabián Cerquera Castañeda
Leonel Sterling Rojas
Martha Cecilia Vinasco Guzmán
Silvia Alejandra Trujillo Zapata
Jennifer Tovar Quintero
Catherine Johana Jaimes Silva
Jorge Enrique Arboleda Puerta
Marcelo Noreña Ceballos
Jairo Hernán Mosquera Guerrero
Johana Ximena Castro Trujillo
Yurany Bahamón Cebais
Liceth Yurany Ortiz
Daniela Alejandra Cabrera Chilito

Grupo de Investigación: Inyumacizo

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Martha Viviana Vargas Galindo

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Jordano Salamanca Bastidas

Decano de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz

Líder Sello Editorial UNAD

Ficha Bibliográfica Diligencia por Biblioteca

Sistemas agroambientales: estrategias de manejo integral en condiciones del trópico

Autores: Nelly María Méndez Pedroza, Andrés Mauricio Munar Samboní, Mauro Albeiro Bravo Gaviria, Andrés David Vargas Guzmán, Oscar Eduardo Valbuena Calderón, Carlos Andrés Moreno Salguero, Ismael Dussán Huaca, Cristian David Plaza Pérez, Paola Andrea Tenorio Sánchez, Francisco José Montealegre Torres, Carlos Guillermo Mesa Mejía, Danilo Bonilla Trujillo, Lucerina Artunduaga-Pimentel, Ricardo Rusinque-Becerra, Hector Fabián Cerquera Castañeda, Leonel Sterling Rojas, Martha Cecilia Vinasco Guzmán, Silvia Alejandra Trujillo Zapata, Jennifer Tovar Quintero, Catherine Johana Jaimes Silva, Jorge Enrique Arboleda Puerta, Marcelo Noreña Ceballos, Jairo Hernán Mosquera Guerrero, Johana Ximena Castro Trujillo, Yurany Bahamón Cebais, Liceth Yurany Ortiz y Daniela Alejandra Cabrera Chilito

Grupos de investigación: Inyumacizo

ISBN:

e-ISBN:

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

© Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

Calle 14 Sur No. 14-23

Bogotá, D.C.

Mes de 2026.

Corrección de textos: Daniela Pérez Escandón

Diagramación: Olga L. Pedraza R.

Edición integral: Hipertexto - Netizen

Cómo citar este libro: Méndez Pedroza, N. M., Munar Samboní, A. M., Bravo Gaviria, M. A., Vargas Guzmán, A. D., Valbuena Calderón, O. E., Moreno Salguero, C. A., Dussán Huaca, I., Plaza Pérez, C. D., Tenorio Sánchez, P. A., Montealegre Torres, F. J., Mesa Mejía, C. G., Bonilla Trujillo, D., Artunduaga-Pimentel, L., Rusinque-Becerra, R., Cerquera Castañeda, H. F., Sterling Rojas, L., Vinasco Guzmán, M. C., Trujillo Zapata, S. A., Tovar Quintero, J., ... Cabrera Chilito, D. A. (2026). *Sistemas agroambientales: Estrategias de manejo integral en condiciones del trópico*. Sello Editorial UNAD. DOI PENDIENTE.



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13



Reseña del libro

Sistemas agroambientales: estrategias de manejo integral en condiciones del trópico es una obra colectiva que reúne resultados de investigación orientados a comprender y enfrentar, desde una perspectiva integral, algunos de los principales desafíos que afectan la sostenibilidad de los sistemas productivos y socioambientales en contextos tropicales. El libro surge del trabajo académico e investigativo de docentes, estudiantes y egresados de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia en articulación con el grupo de investigación Inyumacizo y el Nodo de Conocimiento de los Espacios Rurales CIER de la UNAD.

La obra se organiza en tres capítulos temáticos que, aunque abordan objetos de estudio diferenciados, comparten un mismo horizonte analítico: aportar conocimiento aplicado para el manejo sostenible de los sistemas agroambientales del trópico. El primer capítulo, “Manejo integrado de suelos en sistemas agroforestales del trópico” reúne estudios centrados en fertilidad, restauración y uso sostenible del suelo, incluidos análisis sobre nanofertilizantes, biochar, fitotoxicidad y caracterización edafológica. El segundo capítulo, “Ganadería y nutrición animal con enfoques alternativos”, presenta investigaciones orientadas a la sostenibilidad productiva con énfasis en parámetros zootécnicos y en el aprovechamiento de recursos locales, como la pulpa de café. Por otra parte, el tercer capítulo, denominado “Educación ambiental y salud pública: estrategias de gobernanza hídrica y calidad del aire” amplía la mirada del libro hacia las dimensiones sociales, institucionales y de bienestar al integrar trabajos sobre educación ambiental en la gestión participativa del agua y riesgos respiratorios asociados a la inhalación de humo.



Uno de los principales aportes de esta publicación radica en su capacidad para articular dimensiones técnicas, productivas, ambientales y socioterritoriales en una misma propuesta editorial. En lugar de presentar estudios aislados, el libro construye una visión interdisciplinaria en la que el manejo del suelo, la producción animal, la gobernanza del agua y la salud pública se comprenden como componentes interdependientes de los sistemas agroambientales. Esta perspectiva fortalece la comprensión de los territorios rurales como espacios complejos en los que la sostenibilidad depende tanto de decisiones técnicas como de procesos sociales, institucionales y culturales.

Asimismo, la obra ofrece aportes relevantes para distintos públicos. Para la comunidad académica y científica, representa un compendio de experiencias investigativas tanto con base empírica como con pertinencia regional; para tomadores de decisiones, entidades territoriales, organizaciones sociales y actores del desarrollo rural constituye una fuente de insumos para la formulación de estrategias, políticas y acciones orientadas a la innovación productiva, la conservación de los recursos naturales, la educación ambiental y el fortalecimiento de la resiliencia territorial. En este sentido, la obra trasciende la divulgación de resultados y se proyecta como una contribución al diálogo entre conocimiento científico, gestión territorial y transformación socioambiental.

En conjunto, *Sistemas agroambientales: estrategias de manejo integral en condiciones del trópico* aporta una visión rigurosa y contextualizada sobre problemáticas prioritarias del sector agroambiental colombiano. Su valor reside no solo en la diversidad de los temas abordados, sino en la capacidad de integrarlos desde una perspectiva de sostenibilidad, manejo integral y compromiso con los territorios.



Reseña de los autores

Nelly María Méndez Pedroza

Ingeniera forestal de la Universidad del Tolima. Especialista en Gerencia Estratégica de Mercadeo. Magíster en Administración de Organizaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Doctora en Desarrollo Sostenible de la Universidad Católica de Ávila, España. Líder zona sur de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) y directora del grupo de investigación Inyumacizo (UNAD), Colombia. nelly.mendez@unad.edu.co

Andrés Mauricio Munar Samboní

Ingeniero ambiental de la Universidad del Cauca. Magíster en Ecología y Gestión de Ecosistemas Estratégicos de la Universidad Surcolombiana. Doctor en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, donde también cuenta con una estancia posdoctoral en Cambio Climático y Recursos Hídricos. Investigador Senior (I) de Minciencias. Docente investigador de la ECAPMA (UNAD), CCAV Pitalito, Colombia. andres.munar@unad.edu.co

Mauro Albeiro Bravo Gaviria

Ingeniero agroforestal. Especialista en Biotecnología Agraria de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y docente en la misma institución, Pasto, Colombia. mauro.bravo@unad.edu.co

Andrés David Vargas Guzmán

Ingeniero químico. Magíster en Agronegocios de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), donde también ejerce como docente, Pitalito, Colombia. andres.vargas@unad.edu.co



Oscar Eduardo Valbuena Calderón

Ingeniero agrónomo con licenciatura en Ciencias Agrícolas. Especialista en Ingeniería Ambiental, magíster en Sistemas Sostenibles de Producción y docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Pitalito, Colombia. oscar.valbuena@unad.edu.co

Carlos Andrés Moreno Salguero

Ingeniero agrónomo. Magíster en Ciencias Agrarias. Doctor (C) en Desarrollo Sostenible y docente en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Pitalito, Colombia. carlos.moreno@unad.edu.co

Ismael Dussán Huaca

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Sistemas Sostenibles de Producción de la Universidad de la Amazonía. Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) UNAD, CEAD Florencia, Colombia. Ismael.dussan@unad.edu.co

Cristian David Plaza Pérez

Biólogo. Doctor en Agronomía/Fitopatología. Doctor en Educación y Cultura Ambiental de la Universidad de la Amazonía, Florencia, Colombia. cristian.plaza@unad.edu.co

Paola Andrea Tenorio Sánchez

Ingeniera ambiental de la Universidad Central del Valle del Cauca. Especialista en Docencia Universitaria de la Corporación Universidad Piloto de Colombia. Magíster en Sistemas Integrados de Gestión de la Universidad Internacional de la Rioja. Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), CEAD Ibagué, Colombia. paola.tenorio@unad.edu.co



Francisco José Montealegre Torres

Ingeniero agrónomo de la Universidad del Tolima. Especialista en Gestión de Proyectos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), CEAD Ibagué, Colombia. francisco.montealegre@unad.edu.co

Carlos Guillermo Mesa Mejía

Ingeniero sanitario y ambiental de la Universidad de Boyacá. Especialista en Educación Superior a Distancia de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y magíster en Educación de la misma institución. Es docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), CEAD Ibagué, Colombia. carlos.mesa@unad.edu.co

Danilo Bonilla Trujillo

Médico veterinario zootecnista de la Universidad del Tolima. Especialista en Pedagogía para el Aprendizaje Autónomo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Magíster en Ciencias Pecuarias de la Universidad del Tolima. Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), CEAD Ibagué, Colombia. danilo.bonilla@unad.edu.co

Lucerina Artunduaga-Pimentel

Zootecnista de la Universidad de la Amazonía. Magíster en Educación con énfasis en educación superior de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y docente de la ECAPMA, CEAD Florencia, Colombia. lucerina.artunduaga@unad.edu.co

Ricardo Rusinque-Becerra

Médico veterinario zootecnista de la Universidad de la Amazonía. Especialista en Formulación y Evaluación de Proyectos, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Florencia, Colombia. ricardo.rusinque@unad.edu.co



Héctor Fabián Cerquera Castañeda

Especialista en Ciencia de Datos y Analítica, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Florencia, Colombia. hector.cerquera@unad.edu.co

Leonel Sterling Rojas

Médico veterinario zootecnista de la Universidad del Tolima. Magíster (C) en Seguridad alimentaria, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pitalito, Colombia. leonel.sterling@unad.edu.co

Martha Cecilia Vinasco Guzmán

Ingeniera química de la Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Administración de las Organizaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Doctora en Desarrollo Sostenible. Líder del Nodo Especializado de Conocimiento de los Espacios Rurales (CIER) de la UNAD y docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente de la misma universidad, CCAV Pitalito, Colombia. marta.vinasco@unad.edu.co

Silvia Alejandra Trujillo Zapata

Ingeniera ambiental de la Universidad del Cauca. Magíster en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad Ambiental, Responsabilidad Social y PRL. Docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, CCAV Pitalito, Colombia. silvia.trujillo@unad.edu.co

Jennifer Tovar Quintero

Ingeniera industrial de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Magíster en Gestión de Tecnología de Información. Estudiante del doctorado en Administración de la Universidad de Manizales y Universidad Cooperativa de Colombia, Neiva, Colombia. jennifer.tovar@unad.edu.co



Catherine Johana Jaimes Silva

Ingeniera ambiental de la Universidad de La Salle. Doctoranda en Gerencia y Política Educativa de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA). Neiva, Colombia. Catherine.jaimes@unad.edu.co

Jorge Enrique Arboleda Puerta

Ingeniero eléctrico, especialista en Educación Superior a Distancia, magíster en Educación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Dosquebradas, Colombia. jorge.arboleda@unad.edu.co

Marcelo Noreña Ceballos

Ingeniero electrónico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Manizales, Colombia. mnoerenac@unadvirtual.edu.co

Jairo Hernán Mosquera Guerrero

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Nariño. Especialista en Educación Ambiental de la Universidad El Bosque. Magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia con énfasis en suelos y aguas. Docente investigador de la ECAPMA, CEAD Pasto, Colombia. jairo.mosquera@unad.edu.co

Johana Ximena Castro Trujillo

Agrónoma, especialista en Pedagogía para el Desarrollo del Aprendizaje Autónomo, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pasto, Colombia. jxcastrot@unadvirtual.edu.co

Yurany Bahamón Cebais

Agrónoma, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Colombia). Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. ybahamonc@unadvirtual.edu.co



Liceth Yurany Ortiz

Estudiante de Agronomía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Colombia). Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. lyortizp@unadvirtual.edu.co

Daniela Alejandra Cabrera Chilito

Estudiante de Agronomía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. ybahamonc@unadvirtual.edu.co



Declaración uso de IA

Durante el proceso de construcción de esta obra se incorporaron de manera estratégica algunas herramientas de inteligencia artificial, empleadas exclusivamente como soporte complementario para optimizar aspectos técnicos y de estilo. Su utilización se limitó a fortalecer la claridad y coherencia en la presentación de los contenidos.

Entre ellas se destacan plataformas como ChatGPT (modelo GPT-4, desarrollado por OpenAI) y Elicit AI, las cuales fueron utilizadas bajo el criterio y control de los equipos investigadores responsables de cada producción.

Las ideas desarrolladas a lo largo del libro se construyeron a partir de una reflexión profunda y un ejercicio crítico asumido por los autores de manera autónoma. Si bien se recurrió a ciertas herramientas tecnológicas para mejorar la sintaxis de la narrativa del libro, su uso fue estrictamente instrumental. Las decisiones conceptuales, los argumentos y la estructura general del texto responden al criterio y compromiso intelectual de quienes lo escribieron, resguardando en todo momento la integridad de la autoría.





Contenido

Capítulo 1. Manejo integrado de suelos en sistemas agroforestales del trópico	21
Impacto del uso de nanofertilizantes NPK en el rendimiento y crecimiento del maracuyá (<i>Passiflora edulis fo. flavicarpa</i> O. Deg.) en sistema agroforestal con matarratón (<i>Gliricidia sepium</i> Kunth ex Steud.) en Colombia	23
Resumen	23
Introducción	25
Materiales y métodos	27
Resultados y discusión	31
Conclusiones	38
Agradecimientos	39
Referencias	40
Potencial del biochar de guadua (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth) en la biodisponibilidad de elementos menores en el cultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.)	43
Resumen	43
Introducción	45
Materiales y métodos	46
Resultados y discusión	50
Conclusiones	53
Agradecimientos	54
Referencias	55
Fitotoxicidad del glifosato sobre germinación y emergencia de seis especies agroforestales en Caquetá, Colombia.....	57
Resumen	57
Introducción	59
Materiales y métodos	60
Resultados y discusión	65
Conclusiones	86
Agradecimientos	87
Referencias	88



Caracterización edafológica y sistemas de manejo diferencial en el cultivo de plátano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) en los municipios de Casabianca y Herveo, departamento del Tolima, Colombia	91
Resumen	91
Introducción	93
Materiales y métodos	94
Resultados y discusión	98
Conclusiones	106
Recomendaciones	106
Agradecimientos	107
Referencias	109
 Capítulo 2. Ganadería y nutrición animal con enfoques alternativos.....	111
 Análisis comparativo de parámetros productivos y reproductivos en ganado criollo caqueteño puro y cruzado en un sistema de doble propósito en Morelia, Caquetá (Colombia)	113
Resumen	113
Introducción	114
Materiales y métodos	116
Resultados y discusión	119
Conclusiones	132
Agradecimientos	133
Referencias	135
 Anexos	137
Anexo 1: resultados de pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y significancia estadística para variables productivas y reproductivas (2018-2023)	137
 Potencial de la pulpa de café como suplemento nutricional en cerdos y gallinas ponedoras: un estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental en el municipio de Pitalito, Huila, Colombia.....	139
Resumen	139
Introducción	141
Materiales y métodos	142
Resultados y discusión	144
Conclusiones	150
Agradecimientos	151
Referencias	153



Anexos 156

Anexo 1. Resultados del análisis químico de la pulpa de café deshidratada y molida	156
Anexo 2. Resultados del análisis químico de la pulpa de café ensilada	157

CAPÍTULO 3. Educación ambiental y salud pública: estrategias de gobernanza hídrica y calidad del aire 159

Análisis comparativo de planes de educación ambiental en la gobernanza del agua en la cuenca del río Guachicos (Colombia): una propuesta alineada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 161

Resumen	161
Introducción	163
Materiales y métodos	164
Marco conceptual	172
Resultados y discusión	176
Conclusiones	190
Referencias	192

Riesgos respiratorios por inhalación de humo: un análisis bibliométrico con evidencias ambientales y clínicas 197

Resumen	197
Introducción	199
Materiales y métodos	200
Resultados y discusión	204
Conclusiones	226
Agradecimientos	229



Índice de figuras

CAPÍTULO 1. Manejo integrado de suelos en sistemas agroforestales del trópico

Impacto del uso de nanofertilizantes NPK en el rendimiento y crecimiento del maracuyá (*Passiflora edulis fo. flavicarpa O. Deg.*) en sistema agroforestal con matarratón (*Gliricidia sepium Kunth ex Steud.*) en Colombia

Figura 1. Localización del área de estudio28

Potencial del biochar de guadua (*Guadua angustifolia Kunth*) en la biodisponibilidad de elementos menores en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*)

Figura 1. Ubicación del lote experimental en el municipio de Pitalito, departamento de Huila, Colombia.....47

Figura 2. Metodología utilizada en el experimento49

Figura 3. Resultados de acumulación de biomasa aérea50

Figura 4. Resultados de análisis de suelos51

Fitotoxicidad del glifosato sobre germinación y emergencia de seis especies agroforestales en Caquetá, Colombia

Figura 1. Porcentaje de germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales69

Figura 2. Germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales69

Figura 3. Porcentaje de emergencia en arena de seis especies agroforestales70

Figura 4. Emergencia en arena de seis especies agroforestales70

Figura 5. Representación gráfica de IVG calculado para seis especies vegetales estudiadas.....72

Caracterización edafológica y sistemas de manejo diferencial en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca L.*) en los municipios de Casabianca y Herveo, departamento del Tolima, Colombia

Figura 1. Área de estudio mostrando los municipios de Herveo y Casabianca, departamento del Tolima dentro de la cuenca del río Gualí95

Figura 2. Identificación de suelos. Verificación del perfil del suelo.....101

Figura 3. Comparación de variables edáficas por municipio103

CAPÍTULO 2. Ganadería y nutrición animal con enfoques alternativos 111

Análisis comparativo de parámetros productivos y reproductivos en ganado criollo caqueteño puro y cruzado en un sistema de doble propósito en Morelia, Caquetá (Colombia)

Figura 1. Finca Villa Mery, Morelia, Caquetá116



Figura 2. Comparación del intervalo parto-concepción (IPC) entre los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	119
Figura 3. Comparación de los días promedio de gestación entre los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	120
Figura 4. Comparación del intervalo entre partos (IEP) entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	121
Figura 5. Medias de los indicadores reproductivos por grupo (CCC vs. CCP), 2018-2023	122
Figura 6. Matriz de correlación de Spearman entre variables reproductivas en el grupo CCC (2018-2023)	122
Figura 7. Matriz de correlación de Spearman entre variables reproductivas en el grupo CCP (2018-2023)	123
Figura 8. Comparación de la condición corporal (escala 1-5) en vacas paridas de los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	124
Figura 9. Comparación del número de días en lactancia en los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	124
Figura 10. Comparación de la ganancia diaria de peso predestete (GDP) entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	125
Figura 11. Comparación de la ganancia diaria de peso ajustada al intervalo entre partos (g/día/IEP) en criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	126
Figura 12. Comparación del peso al nacimiento (kg) entre crías de criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023	126
Figura 13. Comparación del peso al destete entre crías de (CCC) y (CCP), 2018-2023	127
Figura 14. Medias de los indicadores productivos por grupo (CCC vs. CCP), 2018-2023	128
Figura 15. Relación entre ganancia diaria predestete y peso al destete por grupo genético (CCC vs. CCP).....	128
Figura 16. Relación entre condición corporal e intervalo entre partos (IEP) por grupo genético	130
Anexos	
Figura 1. Resultados de pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y significancia estadística para variables productivas y reproductivas (2018-2023)	137



Potencial de la pulpa de café como suplemento nutricional en cerdos y gallinas ponedoras: un estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental en el municipio de Pitalito, Huila, Colombia

Figura 1. Nivel de significancia entre tratamiento para la variable producción de huevos.....	145
Figura 2. Nivel de significancia entre tratamientos para la variable peso de huevos.....	146
Figura 3. Nivel de significancia entre tratamientos para la variable peso de las aves.....	146
Figura 4. Consumo de alimento por tratamiento en aves por semana (semana 1 a 4)	147
Figura 5. Ganancia diaria promedio de peso (G) por tratamiento en cerdos.....	147

Anexos

Figura 1. Resultados del análisis químico de la pulpa de café deshidratada y molida.....	156
Figura 2. Resultados del análisis químico de la pulpa de café ensilada	157

CAPÍTULO 3. Educación ambiental y salud pública: estrategias de gobernanza hídrica y calidad del aire

Análisis comparativo de planes de educación ambiental en la gobernanza del agua en la cuenca del río Guachicos (Colombia): una propuesta alineada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Figura 1. Cuenca del río Guachicos, municipio de Pitalito, departamento del Huila, Colombia.....	165
Figura 2. Flujograma del marco metodológico establecido en el estudio	167

Riesgos respiratorios por inhalación de humo: un análisis bibliométrico con evidencias ambientales y clínicas

Figura 1. Flujograma empleado en este estudio.....	201
Figura 2. Revisión sistemática PRISMA.....	204
Figura 3. Revisión sistemática.....	205
Figura 4. Publicaciones por año	206
Figura 5. Autores de la búsqueda.....	207
Figura 6. Instituciones	207
Figura 7. Países o regiones a nivel global	208



Índice de tablas

CAPÍTULO 1. Manejo integrado de suelos en sistemas agroforestales del trópico

Impacto del uso de nanofertilizantes NPK en el rendimiento y crecimiento del maracuyá (*Passiflora edulis fo. flavicarpa O. Deg.*) en sistema agroforestal con matarratón (*Gliricidia sepium Kunth ex Steud.*) en Colombia

Tabla 1.	Análisis de la varianza incremento de altura (cm)	32
Tabla 2.	Análisis de la varianza incremento en diámetro de tallo (mm)	32
Tabla 3.	Análisis de la varianza incremento en área foliar (cm ²)	34
Tabla 4.	Prueba de Tukey Alfa = 0,05 incremento en área foliar (cm ²)	34
Tabla 5.	Análisis de la varianza para número de frutos/planta	35
Tabla 6.	Prueba de Tukey Alfa = 0,05 para número de frutos/planta	35

Potencial del biochar de guadua (*Guadua angustifolia Kunth*) en la biodisponibilidad de elementos menores en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*)

Tabla 1.	Contenido de elementos menores y microelementos en hojas de <i>Z. mays</i> luego de cuarenta y seis días de germinación	52
-----------------	---	----

Fitotoxicidad del glifosato sobre germinación y emergencia de seis especies agroforestales en Caquetá, Colombia

Tabla 1.	ANOVA de la variable germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales	66
Tabla 2.	Prueba de Tukey para la germinación y tratamientos con glifosato en seis especies agroforestales	67
Tabla 3.	Indicadores relacionados con la germinación de semillas de seis especies agroforestales estudiadas	71
Tabla 4.	Consolidado de indicadores para la emergencia en arena de seis especies agroforestales	78

Caracterización edafológica y sistemas de manejo diferencial en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca L.*) en los municipios de Casabianca y Herveo, departamento del Tolima, Colombia

Tabla 1.	Resumen de materiales utilizados en el estudio	96
Tabla 2.	Análisis de las características identificadas en suelos por predio	100
Tabla 3.	Promedios de propiedades fisicoquímicas del suelo según municipio y altitud en predios productores de plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) en Casabianca y Herveo, Tolima	102



CAPÍTULO 2. Ganadería y nutrición animal con enfoques alternativos

Análisis comparativo de parámetros productivos y reproductivos en ganado criollo caqueteño puro y cruzado en un sistema de doble propósito en Morelia, Caquetá (Colombia)

Tabla 1. Comparación de variables reproductivas entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP) 131

Tabla 2. Comparación de variables productivas entre Criollo Caqueteño Cruzado (CCC) y Criollo Caqueteño Puro (CCP)..... 132

Anexos

Tabla 1. Contenido de nutrientes hallados en las muestras de pulpa de café.....145

CAPÍTULO 3. Educación ambiental y salud pública: estrategias de gobernanza hídrica y calidad del aire

Análisis comparativo de planes de educación ambiental en la gobernanza del agua en la cuenca del río Guachicos (Colombia): una propuesta alineada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Tabla 1. Dimensiones de los ODS en los planes de educación ambiental.....188

Riesgos respiratorios por inhalación de humo: un análisis bibliométrico con evidencias ambientales y clínicas

Tabla 1. Lista de criterios de elección para la búsqueda202

Tabla 2. Fuentes de información de artículos.....203









CAPÍTULO 1

Manejo integrado de suelos en sistemas agroforestales del trópico

- Mauro Albeiro Bravo Gaviria
- Johana Ximena Castro Trujillo
- Andrés David Vargas Guzmán
- Oscar Eduardo Valbuena Calderón
- Carlos Andrés Moreno Salguero
- Ismael Dussán Huaca
- Cristian David Plaza Pérez
- Yurany Bahamón Cebais
- Liceth Yurany Ortiz
- Daniela Alejandra Cabrera Chilito
- Paola Andrea Tenorio Sánchez
- Francisco José Montealegre Torres
- Carlos Guillermo Mesa Mejía
- Danilo Bonilla Trujillo
- Andrés Mauricio Munar Samboní

En este capítulo se consolidan los resultados de investigaciones relacionadas con el impacto de los nanofertilizantes en cultivos como el maracuyá (*Passiflora edulis fo. flavicarpa* O. Deg.) en sistemas agroforestales; el potencial del biochar de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes en el maíz (*Zea mays* L.), los efectos de la fitotoxicidad del glifosato en especies agroforestales y la caracterización de suelos y estrategias de manejo diferencial en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en zonas del departamento del Tolima, Colombia.





Impacto del uso de nanofertilizantes NPK en el rendimiento y crecimiento del maracuyá (*Passiflora edulis* fo. *flavicarpa* O. Deg.) en sistema agroforestal con matarratón (*Gliricidia sepium* Kunth ex Steud.) en Colombia

Resumen

El cultivo del maracuyá (*Passiflora edulis* fo. *flavicarpa* O. Deg.) en el departamento de Nariño, Colombia ha venido posicionándose como una alternativa productiva y de diversificación, especialmente en el municipio de Sandoná, ante la disminución en la rentabilidad de monocultivos como la caña. Sin embargo, la producción del maracuyá es muy inferior al promedio nacional; inferioridad atribuida a la baja tecnología en el cultivo, deficiencias nutricionales y un margen estrecho en la relación costo/beneficio. Una de las alternativas es la incorporación de nuevas técnicas de cultivo, como la fertilización con nanopartículas, las cuales han mostrado resultados positivos en cultivos hortícolas a nivel global, junto con la implementación de sistemas agroforestales que favorecen la sostenibilidad en el largo plazo. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar la respuesta del maracuyá establecida con tutores vivos de matarratón y fertilizado con nanopartículas de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Se evaluaron atributos de crecimiento en maracuyá, como altura de planta, diámetro de tallo, área foliar y de producción hasta los ocho meses. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas con tres tratamientos: fertilización convencional granulada, nanofertilizantes NPK al 100 % y nanofertilizantes NPK al 80 % de la dosis recomendada. Los subtratamientos fueron el maracuyá en monocultivo y maracuyá en sistema agroforestal con matarratón. No se encontraron diferencias en las variables de altura ni en diámetro de tallo del maracuyá; sin embargo, en área foliar los mejores tratamientos fueron la fertilización convencional y los nanofertilizantes sin

diferencias entre sí. Para el número de frutos por planta los nanofertilizantes fueron estadísticamente mejores. Los resultados no mostraron diferencias estadísticas en el sistema agroforestal, ya que aún se encuentra en una edad temprana. Se concluyó que los nanofertilizantes son una alternativa de optimización en la producción del maracuyá bajo las condiciones de suelo en el municipio de Sandoná. Se sugiere evaluar los atributos de crecimiento mediante la aplicación de nanofertilizantes desde el momento de la siembra, así como analizar el impacto del sistema agroforestal a largo plazo.

Palabras clave: fertilización, innovación, nanopartículas, agroforestería.

Abstract

The cultivation of passion fruit in the department of Nariño, Colombia, has been establishing itself as a productive and diversification alternative, especially in the municipality of Sandoná due to the decreased profitability of monocultures such as sugarcane. However, passion fruit production is well below the national average, attributed to low farming technology, nutritional deficiencies, and a narrow cost/benefit ratio. One alternative is the incorporation of new cultivation techniques such as nanoparticle fertilization, which have shown positive results in horticultural crops worldwide, along with the implementation of agroforestry systems that promote long-term sustainability. Therefore, the objective was to evaluate the response of passion fruit established with living stakes of *Gliricidia sepium* and fertilized with NPK nanoparticles. Growth attributes of passion fruit such as plant height, stem diameter, leaf area, and production were evaluated up to 8 months. A randomized complete block design in a split-plot arrangement was used with three treatments: conventional granular fertilization, NPK nanofertilizers at 100%, and NPK nanofertilizers at 80 % of the recommended dose. The sub-treatments were passion fruit in monoculture and passion fruit in an agroforestry system with *Gliricidia*. No differences were found in plant height or stem diameter of passion fruit; however, for leaf area, the best results were with conventional fertilization and nanofertilizers, with no difference between them. For the number of fruits per plant, nanofertilizers were statistically superior. The results did not show statistical differences in the agroforestry system, as it is still at an early stage. It is concluded that nanofertilizers are an optimization alternative for passion fruit production under the soil conditions of Sandoná. It is suggested to evaluate growth attributes through the application of nanofertilizers from the time of planting, as well as to analyze the long-term impact of the agroforestry system.

Keywords: fertilization, innovation, nanoparticles, agroforestry.

Introducción

En la actualidad, la producción agrícola sustentable es uno de los principales retos a nivel mundial, impulsada por la necesidad de incrementar los rendimientos de los cultivos y optimizar el uso de recursos en condiciones de presión económica y ambiental. El maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa Degener*) destaca como cultivo estratégico en el departamento de Nariño, donde el área sembrada se ha incrementado un 295 % en la última década, posiblemente debido a las crisis económicas de cultivos tradicionales; no obstante, los rendimientos regionales son un 167 % inferiores al promedio nacional (Agronet, 2023), lo que compromete la competitividad y la calidad de vida.

Diversos estudios coinciden en que la baja eficiencia en la absorción de nutrientes y los altos costos de la fertilización convencional inciden negativamente en la rentabilidad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Kumar, 2021), situación que ha impulsado la búsqueda de innovaciones tecnológicas para mejorar la eficiencia de la fertilización. En este contexto, el desarrollo y aplicación de nanofertilizantes ha cobrado relevancia internacional: gracias a su tamaño nanométrico y sus propiedades fisicoquímicas especiales, estos materiales facilitan una liberación más controlada y directa de nutrientes, mejorando su aprovechamiento y reduciendo pérdidas por lixiviación y volatilización (Dimkpa y Bindraban, 2018; Liu y Lal, 2015).

La eficacia de los nanofertilizantes ha sido reportada en cultivos cerealistas, leguminosos, oleaginosos y hortícolas en diferentes regiones del mundo. Por ejemplo, tanto Dimkpa et al. (2017) como Liu y Lal (2015) documentan aumentos de rendimiento, eficiencia de uso del nitrógeno y reducciones sustanciales en la dosis de fertilizantes necesaria, con reducciones del 40 % al 90 % sin sacrificar productividad. En condiciones tropicales colombianas, Rosales (2022) evidenció mejoras significativas en el desarrollo y productividad de frijol mediante la aplicación de nanofertilizantes con nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), lo que sugiere su potencial para cultivos no explorados como el maracuyá.

Los nanofertilizantes presentan liberación lenta y dirigida de nutrientes, mejoran la tolerancia al estrés abiótico y reducen pérdidas, lo que incrementa el rendimiento y la calidad de los cultivos (Zahra et al., 2022). Sin embargo, sus riesgos ambien-

tales y de seguridad requieren mayor investigación antes de su uso generalizado. Los fertilizantes biogénicos basados en nanotecnología (NBF) muestran beneficios en producción y calidad, pero plantean desafíos para la salud del suelo y la contaminación, por lo que debe priorizarse el estudio de su toxicidad (Jha et al., 2023). Estas tecnologías facilitan la agricultura de precisión, optimizan el uso de nutrientes y disminuyen residuos químicos, apoyando la demanda de alimentos sin dañar el medio ambiente (Glotra et al., 2022; Pooja et al., 2024).

Formulaciones híbridas como la hidroxiapatita modificada con urea demuestran mayor eficiencia (48 % vs. 18 %), aunque su alto costo limita su viabilidad comercial (Shyamal Mondal, 2022). Se han registrado mejoras de hasta 30 % en eficiencia de nutrientes y 20 % en rendimiento, lo que sugiere la sustitución parcial de fertilizantes convencionales bajo un despliegue responsable (Saurabh et al., 2024). Nanopartículas metálicas de óxido de zinc (ZnO) y óxido férrico (Fe₂O₃) favorecen el crecimiento vegetal, aunque faltan estudios en leguminosas (Mathur et al., 2022). En agroforestería, *Gliricidia sepium* actúa como tutor vivo, mejora la fertilidad y apoya cultivos trepadores (Matos et al., 2023; Pereira Júnior et al., 2008). En maracuyá, la aplicación de nanoboro y nanozinc aumenta el crecimiento vegetativo, la supervivencia y la clorofila (Shingade et al., 2024), y mejora la calidad y vida útil de la fruta (Verma et al., 2024; Maity et al., 2024; Rodrigues et al., 2023).

El artículo analiza cómo los nanofertilizantes mejoran el crecimiento, la defensa antioxidante y la tolerancia al estrés en los cultivos hortícolas, incluido el maracuyá: los nanofertilizantes mejoran la absorción de nutrientes y activan las vías de respuesta al estrés, lo que puede aumentar la calidad y el rendimiento del maracuyá en situaciones de estrés abiótico. Se necesitan más investigaciones sobre los mecanismos moleculares y las consideraciones de seguridad (Manzoor et al., 2024).

En este contexto, el objetivo principal de la presente investigación fue evaluar la respuesta del maracuyá establecida con tutores vivos de matarratón y fertilizado con nanopartículas de NPK en suelos marginales del municipio de Sandoná, Nariño. Este estudio incorpora tecnologías nuevas en condiciones reales que se proyectan como promisorias en la optimización de recursos y generación de productos limpios.

Materiales y métodos

Localización

El experimento se desarrolló en el municipio de Sandoná, departamento de Nariño, Colombia, en suelos de origen volcánico característicos de la región circunvalar al volcán Galeras, a una altitud de 1100 m s. n. m., clima medio (18 °C de temperatura media anual) y precipitación promedio de 1200 mm, coordenadas 1.294510, -77.502745 (ver figura 1).

Material vegetal

Para la siembra se emplearon plantas de maracuyá (*Passiflora edulis f. flavicarpa Degener*) provenientes de lotes comerciales ubicados en la misma región y que presentan condiciones agroclimáticas semejantes a las del sitio de estudio. La distancia establecida entre plantas y entre surcos fue de 3 m, siguiendo un sistema de siembra en cuadro. El tutorado se realizó con un sistema en cortina. Se seleccionaron plantas homogéneas, todas de la misma edad para asegurar un establecimiento uniforme. En cuanto a la especie arbórea matarratón, se sembraron estacas de 2,5 m de longitud procedentes de la misma región.

Diseño experimental

Se realizó una investigación con enfoque cuantitativo. Se empleó un diseño en bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas. Los tratamientos principales correspondieron al tipo de fertilización aplicada:

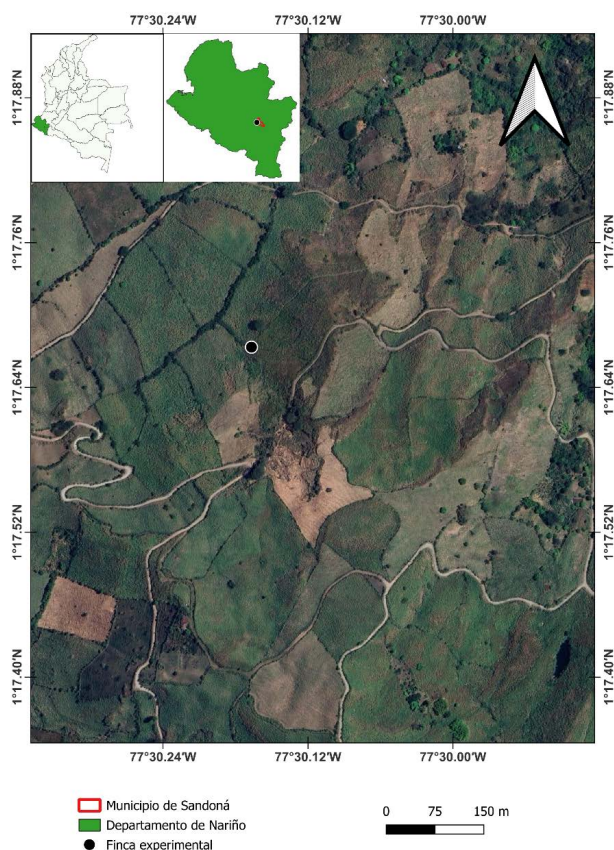
- Tratamiento 1 (T1): fertilización convencional granulada (formulación 13-26-6) al 100 % de la dosis recomendada según análisis de suelo.
- Tratamiento 2 (T2): fertilización con nanofertilizantes NPK (formulación 21-20-23) al 100 % de la dosis recomendada según análisis de suelo.

- Tratamiento 3 (T3): fertilización con nanofertilizantes NPK (formulación 21-20-23) al 80 % de la dosis recomendada según análisis de suelo.

Cada tratamiento principal se subdividió en dos subtratamientos:

- Subtratamiento 1: maracuyá en monocultivo.
- Subtratamiento 2: maracuyá en sistema agroforestal con matorratón (*Gliciridia sepium*).

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

El experimento contó con tres bloques, cada uno con las combinaciones de tratamientos y subtratamientos, con tres repeticiones por tratamiento. Cada tratamiento contó con doce plantas de maracuyá sembradas a 3 m entre surcos y 3 m entre plantas. La subparcela o subtratamiento contó con seis plantas. Las plantas evaluadas fueron las dos centrales contenidas en cada subtratamiento, excluyendo plantas de borde para evitar sesgos. En total, se aplicaron los tratamientos a ciento ocho plantas y se registraron los datos de treinta y seis plantas.

La aplicación de los tratamientos se realizó a los ciento veinte y ciento cincuenta días después de la siembra, mientras que los subtratamientos se establecieron durante la siembra del maracuyá.

Descripción de los tratamientos y subtratamientos

- Tratamiento 1 (T1): fertilización convencional granulada (formulación 13-26-6) al 100 % de la dosis recomendada según análisis de suelo. Antes de la siembra se realizó un análisis fisicoquímico del suelo, se realizó la interpretación de los resultados y, de acuerdo con las recomendaciones técnicas con base en los resultados, se realizaron mezclas físicas para completar el desbalance nutricional en tipo de elemento y dosis (100 g/planta). Este tratamiento correspondió al testigo o control y fue la base para interpretar los efectos de los tratamientos con nanofertilizantes.
- Tratamiento 2 (T2): fertilización con nanofertilizantes NPK (formulación 21-20-23) al 100 % de la dosis recomendada según análisis de suelo. Antes de la siembra, se realizó un análisis fisicoquímico de suelos y, según las recomendaciones a las que hubo lugar con base en el mismo análisis de suelos, se realizó la fertilización bajo las dosis y elementos faltantes al 100 % de acuerdo con el mismo análisis. La dosis fue de 10 g/planta para cada aplicación (se realizaron dos aplicaciones a los ciento veinte y ciento cincuenta días después de la siembra).
- Tratamiento 3 (T3): fertilización con nanofertilizantes NPK (formulación 21-20-23) al 80 % de la dosis recomendada según análisis de suelo. Para la instalación de este tratamiento, antes de la siembra se realizó un análisis fisicoquímico de suelos y, según las recomendaciones a las que hubo

lugar con base en el mismo análisis de suelos, se realizó la fertilización bajo las dosis y elementos faltantes al 80 % de acuerdo con el mismo análisis. La dosis fue de 8 g/planta para cada aplicación (se realizaron dos aplicaciones a los ciento veinte y ciento cincuenta días después de la siembra).

- Subtratamiento 1: maracuyá en monocultivo. Consistió en la siembra de maracuyá con tutores de madera (muertos) tipo cortina.
- Subtratamiento 2: maracuyá en sistema agroforestal con matarratón (*Gliricidia sepium*). Se utilizaron tutores vivos de la especie arbustiva conocida con el nombre de matarratón. Se emplearon estacas de 2,5 m con el fin de que sirvieran como tutores vivos y, al mismo tiempo, se convirtieran en sistema agroforestal.

Aplicación de los tratamientos

La fertilización convencional granulada (13-26-6) y la aplicación de nanofertilizantes NPK se hicieron de acuerdo con las etapas críticas de desarrollo: establecimiento, floración y fructificación. Los nanofertilizantes, formulados en suspensión acuosa, se suministraron por fertirrigación en *drench* para garantizar uniformidad de las dosis: 100 g/planta para el T1, 10 g/planta y 80 g/planta para los tratamientos T2 y T3.

Variables evaluadas

Durante los primeros ocho meses, se evaluaron las siguientes variables en las plantas útiles de cada subparcela:

- Incremento en altura de planta (cm),
- incremento en diámetro del tallo (mm),
- incremento en área foliar (cm²),
- producción, expresada como número de frutos por planta.

Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) para el arreglo de parcelas divididas. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de medias. El procesamiento estadístico se realizó con el *software* Infostat.

Manejo agronómico

El establecimiento, manejo agronómico, riego y control fitosanitario se realizaron siguiendo recomendaciones técnicas para el cultivo de maracuyá con el fin de garantizar uniformidad en todas las unidades experimentales. Las dosis de fertilización se ajustaron en función de los resultados del análisis químico del suelo y de acuerdo con las fases fenológicas del cultivo. Los productos fitosanitarios se aplicaron según las normas de seguridad recomendadas por la Cámara Procultivos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI).

Resultados y discusión

Incremento en altura de planta (cm)

La tabla 1 presenta el análisis de varianza para la altura del maracuyá bajo diferentes tipos de fertilización y sistema de cultivo:

Tabla 1. *Análisis de la varianza incremento de altura (cm)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4433,08	7	633,30	0,51	0,8197 Ns
Bloque	912,17	2	456,08	0,37	0,6963 Ns
Tratamiento	210,67	2	105,33	0,08	0,9190 Ns
Subtratamiento	536,69	1	536,69	0,43	0,5166 Ns
Tratamiento* Subtratamiento	2773,56	2	1386,78	1,12	0,3420 Ns
Error	34819,67	28	1243,56		

Nota. Ns no presenta diferencias significativas ($p > 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

Incremento en diámetro del tallo (mm)

La tabla 2 muestra el análisis de varianza para el diámetro de tallo del maracuyá bajo diferentes tipos de fertilización y sistema de cultivo:

Tabla 2. *Análisis de la varianza incremento en diámetro de tallo (mm)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,44	7	0,35	0,33	0,9326 Ns
Bloque	0,89	2	0,44	0,42	0,6594 Ns
Tratamiento	1,06	2	0,53	0,50	0,6107 Ns
Subtratamiento	0,44	1	0,44	0,42	0,5209 Ns
Tratamiento* Subtratamiento	0,06	2	0,03	0,03	0,9740 Ns
Error	29,44	28	1,05		

Nota. Ns no presenta diferencias significativas ($p > 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

Para las variables de crecimiento, como altura y diámetro del tallo (ver tablas 1 y 2) no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, aunque se evidenciaron tendencias favorables hacia los tratamientos con nanofertilizantes. Estos resultados coinciden con el comportamiento reportado en otros sistemas agrícolas con el uso de tecnologías de fertilización avanzada (Dimkpa y Bindraban, 2018; Rojas y Luque, 2020).

Los efectos sin diferencias estadísticas entre fuentes de fertilización (tratamientos) sobre las variables de crecimiento (altura, diámetro de tallo) son consecuentes con la demora en la aplicación de los nanofertilizantes, ya que se aplicaron a los cuatro y a los cinco meses después de la siembra. Además, la liberación de nutrientes en nanofertilizantes puede ser hasta doce veces más lenta (Zahra et al., 2022). Se sugiere entonces aplicar nanopartículas desde la siembra para próximas investigaciones.

Por otra parte, no se detectaron diferencias significativas entre el monocultivo y el sistema agroforestal para altura, diámetro de tallo ni para área foliar (ver tabla 2), lo que insinúa que el beneficio de los nanofertilizantes es igual en ambos subtratamientos (monocultivo y sistema agroforestal). Es posible que los efectos nulos se deban a que las estacas de matarratón de 2,5 m de alto a los cuatro y cinco meses después de la siembra no cuentan con raíces y hojas suficientes para generar efectos sobre las plantas del maracuyá; además, el crecimiento de este fruto es más rápido en comparación con la especie leñosa.

Incremento en área foliar (cm²)

En la tabla 3 se encuentra el análisis de varianza y prueba de medias para área foliar del maracuyá bajo diferentes tipos de fertilización y sistema de cultivo. En esta solo se encontraron diferencias estadísticas significativas para tratamientos; es decir, para tipos de fertilización.

Tabla 3. *Análisis de la varianza incremento en área foliar (cm²)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	45819,09	7	6545,58	3,58	0,0071 Ns
Bloque	14813,16	2	7406,58	4,05	0,0285 Ns
Tratamiento	26733,66	2	13366,83	7,31	0,0028*
Subtratamiento	4064,06	1	4064,06	2,22	0,1472 Ns
Tratamiento* Subtratamiento.	208,22	2	104,11	0,06	0,9448 Ns
Error	51190,78	28	1828,24		

Nota. Ns no presenta diferencias significativas ($p > 0,05$). * Diferencias estadísticas.

Fuente: elaboración propia.

Según la prueba de Tukey (ver tabla 4), las mayores áreas foliares se presentaron con el tratamiento T1 y T2, correspondientes a la aplicación de fertilizantes convencionales granulados y el nanofertilizante al 100 % de la dosis según análisis de suelo.

Tabla 4. *Prueba de Tukey Alfa = 0,05 incremento en área foliar (cm²)*

Tratamiento	Medias	N	E.E.		
3	44,19	12	12,34	A	
2	77,38	12	12,34	A	B
1	110,94	12	12,34		B

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

Producción (expresada como número de frutos por planta)

A continuación, se presenta el análisis estadístico (ver tabla 5) para el número de frutos por planta a los ocho meses después de la siembra y la aplicación de los tratamientos a los ciento veinte y ciento cincuenta días.

Tabla 5. Análisis de la varianza para número de frutos/planta

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	94,19	7	13,46	1,52	0,2017 Ns
Bloque	17,39	2	8,69	0,98	0,3874 Ns
Tratamiento	75,06	2	37,53	4,24	0,0247*
Subtratamiento	0,03	1	0,03	3,1E-03	0,9557 Ns
Tratamiento* Subtratamiento	1,72	2	0,86	0,10	0,9077 Ns
Error	248,11	28	8,86		

Nota. Ns no presenta diferencias significativas ($p > 0,05$). * Diferencias estadísticas.

Fuente: elaboración propia.

Según la prueba de Tukey (ver tabla 6), el mayor número de frutos a los ocho meses de establecido el cultivo lo presentaron el T2 y T3, sin diferencias estadísticas entre sí; es decir, los nanofertilizantes fueron mejor en esta variable.

Tabla 6. Prueba de Tukey Alfa = 0,05 para número de frutos/planta

Tratamiento	Medias	N	E.E.		
1	8,83	12	0,86	A	
3	11,67	12	0,86	A	B
2	12,08	12	0,86		B

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del presente estudio muestran que la aplicación de nanofertilizantes NPK al cultivo de maracuyá (a los ocho meses) incrementó el número de frutos por planta en comparación con la fertilización convencional o granulada.

Específicamente, el tratamiento con nanofertilizantes al 100 % de la dosis recomendada alcanzó en promedio 12,08 frutos por planta sin diferencias estadísticas con la aplicación de nanofertilizantes al 80 %, la cual alcanzó 11,67 frutos por planta, mientras que la fertilización convencional con fertilizantes granulados produjo 8,83 frutos por planta.

Este resultado está acorde con la afirmación de Zahra et al. (2022) según la cual los nanofertilizantes presentan ventajas sobre los fertilizantes convencionales. Tales ventajas son atribuidas a la mayor relación superficie-volumen y a la liberación controlada de nutrientes, hasta doce veces más lenta que aquella con fertilizantes sintéticos; además, pueden aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos.

Al respecto, Jha et al. (2023) confirman bondades de los nanofertilizantes, pero recomiendan priorizar investigaciones sobre la toxicidad. Otro estudio de referencia en el que se reportan buenos resultados de producción es el realizado por Pooja et al. (2024) en el que el nanonitrógeno puede mejorar el rendimiento y crecimiento de las plantas.

El incremento en la producción de frutos asociado al uso de nanofertilizantes es especialmente relevante para la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo en condiciones de suelos marginales de Sandoná.

Asimismo, la mejora observada en el número de frutos/planta con nanofertilizantes es coherente con investigaciones internacionales que reportan aumentos de rendimiento y eficiencia en el uso de nutrientes en cultivos como trigo, arroz, soya y frijol al emplear fertilización a escala nanométrica (Liu y Lal, 2015; Rosales, 2022). Es importante resaltar que en el presente estudio la reducción de la dosis de nanofertilizantes al 80 % no disminuyó significativamente la producción, lo que sugiere un potencial de ahorro en insumos y mayor eficiencia en el aprovechamiento de los nutrientes aplicados.

Posiblemente, estas bondades se deban al efecto de las nanopartículas en la mejora sobre el crecimiento vegetativo (Shingade et al., 2024), a la eficiencia en la absorción de nutrientes, al estímulo en el crecimiento (Verma et al., 2024), así como a la expresión génica y la resiliencia al estrés (Maity et al., 2024), la eficiencia del suministro de nutrientes (Rodrigues et al., 2023), la defensa antioxidante y la tolerancia al estrés (Manzoor et al., 2024). Sin embargo, también es importante considerar las diferencias en la concentración y formulación de los fertilizantes evaluados. En este sentido, algunos de los efectos observados podrían estar influenciados por las variaciones en el contenido de nutrientes entre las formulaciones, como ocurre con el nitrógeno (N) y el potasio (K), cuyos niveles son superiores en la formulación del fertilizante granulado convencional.

Este hallazgo es relevante para los productores de maracuyá, puesto que la fertilización representa el principal componente del costo de producción, por lo que la adopción de nanofertilizantes podría mejorar la rentabilidad y competitividad en la región (Rojas y Luque, 2020). De igual manera, los resultados son consistentes con investigaciones previas en donde se evidencia el impacto positivo de los nanofertilizantes en la agricultura, principalmente por su capacidad para reducir el volumen necesario de fertilizantes (Ávila Quezada et al., 2022), y podrían ser útiles al reducir la dosis de fertilizantes por ser más eficientes; no obstante, el comportamiento varía en función de la especie de planta (Zahra et al., 2022). Teniendo en cuenta que esta investigación se realizó en un sitio alejado de la ciudad capital y retirado del pueblo y que los costos de transporte influyeron de manera importante en el costo total, se debe considerar la afirmación de Jha et al. (2023), quienes recomiendan evaluar la viabilidad económica en otras condiciones. Del mismo modo, el uso de nanofertilizantes podría ser útil para disminuir la dosis de fertilizantes al administrar ingredientes activos de manera más eficiente.

Ahora bien, entre las principales limitaciones de este estudio se destacan la realización del ensayo en una única localidad y durante un solo ciclo de cultivo, lo que restringe la generalización de los resultados. Asimismo, la evaluación se centró únicamente en la fase fenológica temprana del cultivo con una duración de ocho meses, lo que impide analizar el desempeño a lo largo de todo el ciclo productivo. Por último, no se incluyeron análisis a largo plazo relacionados con la dinámica del suelo ni con la interacción de los diferentes componentes del agroecosistema, lo que limita la comprensión integral de los efectos de los tratamientos evaluados.

Finalmente, es de anotar que los resultados concuerdan con la literatura científica; sin embargo, se recomienda ampliar la investigación para incluir más ciclos agrícolas, diferentes condiciones edafoclimáticas y variables de calidad fisicoquímica del fruto con el fin de validar y ajustar la recomendación de uso de nanofertilizantes en el maracuyá (Dimkpa et al., 2017). Asimismo, es pertinente investigar posibles efectos ambientales y de salud del suelo relacionados con la aplicación continua de nanofertilizantes de macro y micronutrientes, tal como sugieren Liu y Lal (2015).

Conclusiones

- La aplicación de nanofertilizantes a base de NPK al 100 % y al 80 % de su formulación en el cultivo del maracuyá incrementa la producción de frutos por planta vs. fertilización convencional granulada. Este resultado muestra una alternativa tecnológica y económicamente viable para los productores del maracuyá en suelos de la circunvalar al volcán Galeras. Su uso puede ser recomendado como una estrategia innovadora y replicable orientada a optimizar los sistemas de fertilización, reducir costos y mejorar la calidad de vida de los agricultores en la región.
- No se encontraron diferencias estadísticas significativas para las variables de crecimiento en altura y diámetro de tallo entre fertilización convencional (granulada) y nanofertilizantes.
- La incorporación de la especie leñosa *Gliricidia sepium* como tutor vivo no generó diferencias estadísticas vs. los tutores de madera (muertos) sobre las variables evaluadas a los ocho meses de haber establecido el sistema, puesto que los tutores vivos necesitan más tiempo para el desarrollo de raíces y el crecimiento del follaje.
- Se sugiere evaluar los atributos de crecimiento mediante la aplicación de nanofertilizantes desde el momento de la siembra, así como analizar el impacto del sistema agroforestal a largo plazo y sus efectos en la toxicidad.

Agradecimientos

A los ingenieros agrónomos Luis Carlos Bravo Gaviria, por sus recomendaciones en el manejo agronómico, y a Libio Rosero, por su sugerencias respecto al laboreo del suelo, deshierbas y toma de resultados del crecimiento de las plantas.

Financiamiento

Proyecto financiado a través de convocatoria interna de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), institución que otorgó el apoyo económico a través del proyecto denominado *Respuesta del maracuyá (Passiflora edulis f. Flavicarpa Degener) a la aplicación de nanofertilizantes con NPK en el municipio de Sandoná, Nariño* con código PGI5702ECAPMA2024.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Avila Quezada, G. D., Ingle, A. P., Golińska, P. y Rai, M. (2022). Strategic applications of nano-fertilizers for sustainable agriculture: Benefits and bottlenecks. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 2123-2140. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0126>
- Biswal, D. (2023). Use of Nanofertilizers in Agriculture: Advantages, Disadvantages, and Future Implications. En R. Lone y A. Malik (Eds.), *Implications of Nanoecotoxicology on Environmental Sustainability* (pp. 102-133). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5533-3.ch006>
- Dimkpa, C. O. y Bindraban, P. S. (2018). Nanofertilizers: New Products for the Industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6462-6473. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02150>
- Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S., Fugice, J., Agyin-Birikorang, S., Singh, U. y Hellums, D. (2017). Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0412-8>
- Glotra, A. y Singh, M. (2022). Nanofertilizers: A Review on the Futuristic Technology of Nutrient Management in Agriculture. *Agricultural Reviews, Of*. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2469>
- Jha, A., Pathania, D., Sonu, Damathia, B., Raizada, P., Rustagi, S., Singh, P., Rani, G. M. y Chaudhary, V. (2023). Panorama of biogenic nano-fertilizers: A road to sustainable agriculture. *Environmental Research*, 235, 116456. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116456>
- Kumar, Y. (2021). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. *Annals of Plant and Soil Research*, 23(3), 238-255. <https://doi.org/10.47815/aprs.2021.10067>

- Liu, R. y Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic production. *Science of The Total Environment*, 514, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>
- Maity, D., Gupta, U., Ajith, S., Arora, S. y Saha, S. (2024). Nanofertilizers for sustainable fruit growing. En K. Abd-Elsalam (Ed.), *Nanofertilizer Delivery, Effects and Application Methods* (pp. 281-298). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13332-9.00003-4>
- Manzoor, M. A., Xu, Y., Lv, Z., Xu, J., Wang, Y., Sun, W., Liu, X., Wang, L., Usman, M., Wang, J., Liu, R., Whiting, M. D., Jiu, S. y Zhang, C. (2024). Nanotechnology-based approaches for promoting horticulture crop growth, antioxidant response and abiotic stresses tolerance. *Plant Stress*, 11, 100337. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100337>
- Mathur, S., Pareek, S. y Shrivastava, D. (2022). Nanofertilizers for Development of Sustainable Agriculture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(16), 1999-2016. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2070191>
- Matos, F. V., Pinheiro, G. M., Santana, R. da R., De Aviz, M. F. L. y Brito, E. A. (2023). Uso da gliricídia septium como tutor vivo no cultivo da pitaia. *Revista Contemporânea*, 3(3), 2542-2551. <https://doi.org/10.56083/RCV3N3-074>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K. H. y Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants*, 11(19), 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Pereira Júnior, L. R., Gama, J. S. N. y Resende, Í. R. (2008). Propagação vegetativa de Gliricidia sepium no curimataú paraibano. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 3(3), 17-20.
- Pooja, L. R., Singh, R., Darjee, S. y Shrivastava, M. (2024). Changes in Approach towards Nitrogen Management: Nanofertilizers for Sustainable Agriculture. *Annals of Agricultural & Crop Sciences*, 9(4). <https://doi.org/10.26420/annagricropsci.2024.1159>

- Rodrigues, S. M., Avellan, A., Salvador, D., Rodrigues, S., Miranda, M., Morais, B., Oliveira, M., Mano, J. y Lowry, G. V. (2023). Nanofertilizers—synthesis, advantages, and the current status. En P. Zhang, I. Lynch y R. Handy (Eds.), *Nano-Enabled Sustainable and Precision Agriculture* (pp. 43-77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91233-4.00004-1>
- Rosales, H. (2022). *Evaluación agronómica de frijol biofortificado bio102 (phaseolus vulgaris l.) con diferentes niveles de nanofertilizante en el valle de sibundoy*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A. K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P. K., Jeet, P., Sarkar, B., Upadhyaya, A., Das, A., Kumar, S., Makarana, G., Kumar, U., Kumar, A. y Singh, R. R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 559. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>
- Shingade, D., Topno, S. E. y Bahadur, V. (2024). Effect of Different Levels of Nano Boron and Nano Zinc on Plant Growth and Establishment of Passion Fruit (*Passiflora edulis Sims*) under Prayagraj Agro-climatic Condition. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(6), 581-587. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i6918>
- Shyamal, M. (2022). A Review: Nanofertilizers for the Biofortification and Sustainable Agriculture. *Vidyodaya Journal of Science*, 25(02). <https://doi.org/10.31357/vjs.v25i02.6172>
- Verma, R., Chettri, N., Kumar, R., Roshan, R. K., Kumari, P., Sonkar, S., Kumari, S. y Rongpi, A. (2024). Nanotechnology Interventions in Fruit Production: Enhancing Production and Quality. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(11), 575-586. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i115171>
- Zahra, Z., Habib, Z., Hyun, H. y Shahzad, H. M. A. (2022). Overview on Recent Developments in the Design, Application, and Impacts of Nanofertilizers in Agriculture. *Sustainability*, 14(15), 9397. <https://doi.org/10.3390/su14159397>



Potencial del biochar de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) en la biodisponibilidad de elementos menores en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

Resumen

El uso excesivo de fertilizantes en cultivos a nivel mundial genera impactos ambientales negativos por la bioacumulación de nutrientes en fuentes hídricas. El biochar es una alternativa sostenible que aumenta la capacidad de retención de nutrientes; no obstante, su aporte en función de elementos menores no ha sido caracterizado en cultivos importantes como el maíz (*Zea mays* L.). La literatura presenta resultados sobre beneficios fisicoquímicos en el suelo al aplicar biochar, pero no estudian su efecto como fuente de elementos menores, principalmente para materias primas sostenibles como la *Guadua angustifolia* Kunth. El objetivo de este estudio consistió en evaluar el potencial del biochar de *G. angustifolia* como una fuente de elementos menores en la fertilización de un cultivo de *Z. mays*. El biochar fue preparado por pirólisis (500 °C por cuatro horas) y se mezcló con pollinaza en relación 1:1. Se implementó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cinco tratamientos y un testigo, cada uno con tres repeticiones. Se realizaron análisis de biomasa aérea y radicular, análisis foliar y de suelo a los cuarenta y seis días de la germinación. Los datos se trataron mediante ANOVA y Tukey para diferencia de medias. Se encontró un mayor contenido de calcio en el suelo al aumentar la dosis de biochar (T_3 y $T_5 > T_1$ y $T_3 > T_1$), así como una reducción de Al^{3+} ($p < 0,05$) en todos los tratamientos con biochar. El análisis foliar muestra un aumento en el contenido de hierro y manganeso de T_2 frente a T_4 y T_5 . El tratamiento T_2 mostró un aumento significativo en la biomasa aérea de 10,05 % (IC 95 % 3,60-16,51 %, $p < 0,05$) y radicular 8,16 % (IC 95 %

5,14-10,90 %, $p < 0,05$) frente al tratamiento convencional (T1). Se concluye que existe influencia significativa entre tratamientos en función de variables de desarrollo, contenido de nutrientes de suelo y asimilación foliar.

Palabras clave: agricultura sostenible, fertilización balanceada, enmiendas para suelos.

Abstract

The excessive use of fertilizers in crops worldwide generates negative environmental impacts due to the bioaccumulation of nutrients in water sources. Biochar is a sustainable alternative that increases nutrient retention capacity; however, its contribution in terms of minor elements has not been characterized by important crops such as corn (*Zea mays L.*). The literature presents results on the physicochemical benefits of applying biochar to soil; however, it does not study its effect as a source of minor elements, mainly for sustainable raw materials such as *Guadua angustifolia* Kunth. To evaluate the potential of *G. angustifolia* biochar as a source of minor elements in the fertilization of a *Z. mays* crop. Biochar was prepared by pyrolysis (500 °C for 4 hours) and mixed with chicken manure in a 1:1 ratio. A Randomized Complete Block Design (RCBD) was implemented with five treatments and a control, each with three replicates. Above-ground and root biomass, foliar, and soil analyses were performed 46 days after germination. The data were analyzed using ANOVA and Tukey's test for mean differences. Higher calcium content was found in the soil when the biochar dose was increased ($T3 > T1$ and $T5 > T1$), as well as a reduction in Al^{3+} ($p < 0,05$) in all biochar treatments. Leaf analysis shows an increase in iron and manganese content in (T2) compared to (T4) and (T5). Treatment (T2) showed a significant increase in above-ground biomass of 10,05 % (95 % CI 3,60-16,51 %, $p < 0,05$) and root biomass of 8,16 % (95 % CI 5,14-10,90 %, $p < 0,05$) compared to the conventional treatment (T1). It is concluded that there is a significant influence between treatments in terms of development variables, soil nutrient content, and foliar assimilation.

Keywords: Sustainable agriculture, Balanced fertilization, Soil amendments.

Introducción

En las últimas décadas, se ha visto un crecimiento en la producción y aplicación de fertilizantes debido a un aumento en la demanda de alimentos a nivel mundial (Verma et al., 2022). Dado que el uso de los fertilizantes contribuye aproximadamente al 40 % de la producción, se puede decir que no es factible limitar su uso; sin embargo, y pese a los beneficios que ofrecen, también son causantes de impactos ambientales negativos, como la contaminación de fuentes hídricas y la degradación de suelos debido a la lixiviación de los nutrientes presentada por la baja eficiencia en absorción nutricional de las plantas, además de su alta solubilidad y la baja retención de nutrientes y agua en suelos de uso agrícola intensivo (Peñuelaset al., 2023; Bartóg, 2023). Lo anterior da cuenta de un panorama en el que resulta necesario aumentar la eficiencia de los fertilizantes a la vez que se mejora la salud del suelo.

A pesar de los avances en formulación de fertilizantes, los esquemas tradicionales se centran únicamente en el aporte de macronutrientes, dejando de lado el papel de los micronutrientes en la productividad. Además, los enfoques convencionales suelen presentar una baja eficiencia de absorción, lo que incrementa las pérdidas por lixiviación y contribuye a la contaminación de fuentes hídricas y degradación del suelo.

Una alternativa que se ha estudiado para reducir la cantidad de fertilizantes que se deben aplicar en los cultivos y aumentar la biodisponibilidad de los minerales aplicados es la implementación de biochar, el cual es una enmienda para suelos producida a partir de pirólisis de biomasa vegetal. Se ha demostrado que el biochar puede aumentar la retención de nutrientes y agua, así como promover la actividad microbiana benéfica (Deshoux et al., 2023).

Entretanto, los impactos físicos y biológicos del biochar en cultivos de maíz (*Zea mays L.*) han sido analizados ampliamente en estudios como los de Shakoore et al. (2021) y Virú Vásquez et al. (2025). No obstante, se evidencia una laguna significativa en la investigación enfocada en evaluar el potencial y la eficiencia del biochar frente al aporte de micronutrientes. Al respecto, los trabajos presentados por Rodríguez Vila et al. (2022) y Skrzypczak et al. (2022) fueron los únicos estudios hallados que

evalúan el efecto generado por aplicación de biochar en la biodisponibilidad e impacto de los micronutrientes en plantas, los cuales en el cultivo de *Z. mays* son de vital importancia en la síntesis de enzimas para la fijación de macronutrientes y el proceso de fotosíntesis (Kumar et al., 2021). Esto, en conjunto con los beneficios más conocidos del biochar puede reducir aún más la cantidad de fertilizantes requeridos para obtener una alta productividad.

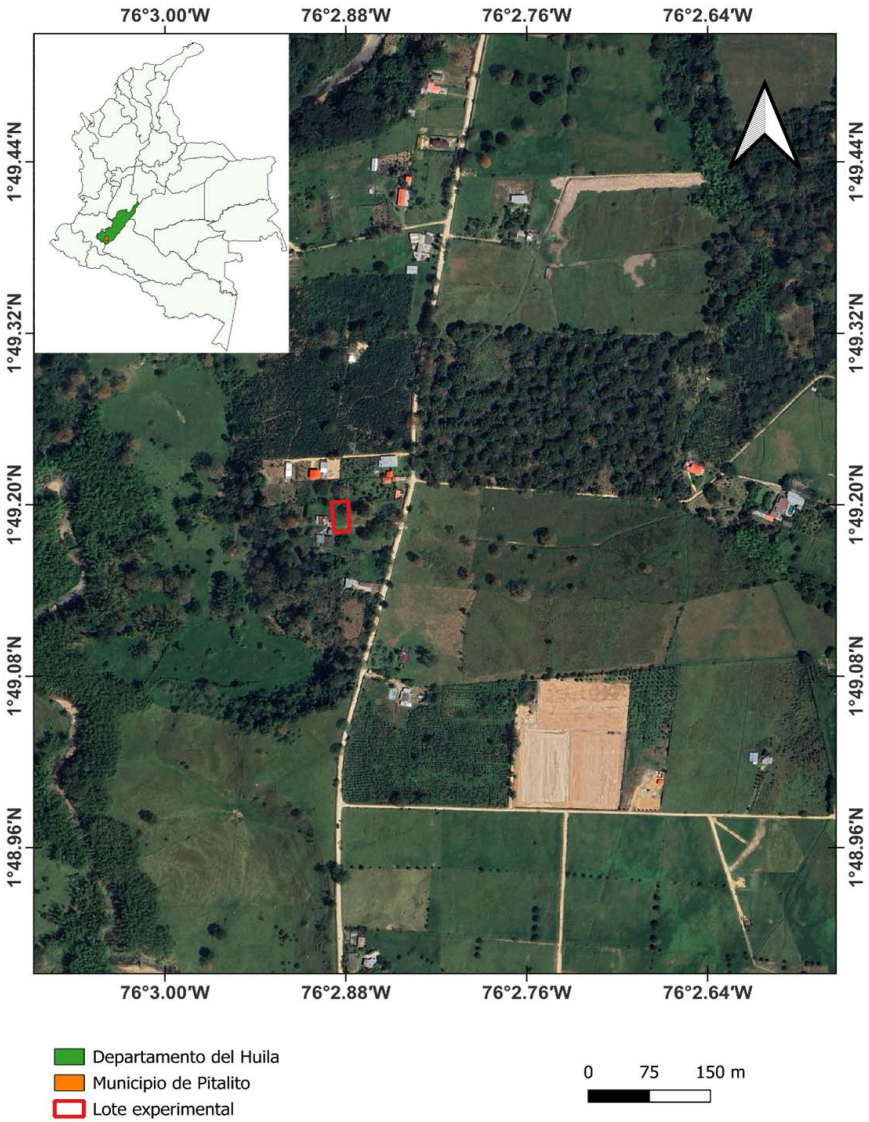
En el contexto presentado, es necesario evaluar materias primas que presenten un potencial adecuado para la producción de biochar, por lo que la *Guadua angustifolia Kunth* se identifica como una alternativa que tiene una abundancia y disponibilidad elevadas en la región del sur del Huila (Ramírez et al., 2024) y que cuenta con propiedades a nivel celular y fisicoquímico que permiten producir biochar de excelente calidad (Alves et al., 2025). Así mismo, se estudia su efecto en el cultivo de *Z. mays* debido a su elevada importancia a nivel regional, dado que es fundamental para la seguridad alimentaria y requiere un manejo nutricional eficiente que permita evidenciar claramente los cambios en su rendimiento (Carpio et al., 2024; Ghaffari et al., 2024).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial del biochar de *G. angustifolia* frente a su aporte de elementos menores en la fertilización del cultivo de *Zea mays L.* al definir la mezcla óptima de biochar con fertilizante a partir de la cuantificación y análisis de acumulación de biomasa aérea y radicular, cuantificando los cambios fisicoquímicos en el suelo y realizando un análisis nutricional foliar.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló a partir de un enfoque experimental cuantitativo que emplea un diseño de bloques en un lote de 200 m² en el municipio de Pitalito, Huila, a una altitud de 1288 m s. n. m., latitud de 1°49'11.67"N y una longitud de 76° 2'53.18"O (ver figura 1).

Figura 1. Ubicación del lote experimental en el municipio de Pitalito, departamento de Huila, Colombia



Fuente: elaboración propia.

Se establecieron cinco tratamientos y un testigo con tres repeticiones cada uno (quinientos ochenta individuos en total) usando *Z. mays* como cultivo indicador, siguiendo la metodología propuesta por Ramírez (2023). A continuación, se detallan los tratamientos:

- Test: testigo sin fertilizante.
- T1: fertilizante NPK (15 g).
- T2: NPK (15 g) + biochar (80 g).
- T3: NPK (15 g) + biochar (160 g).
- T4: biochar (80 g).
- T5: biochar (160 g).

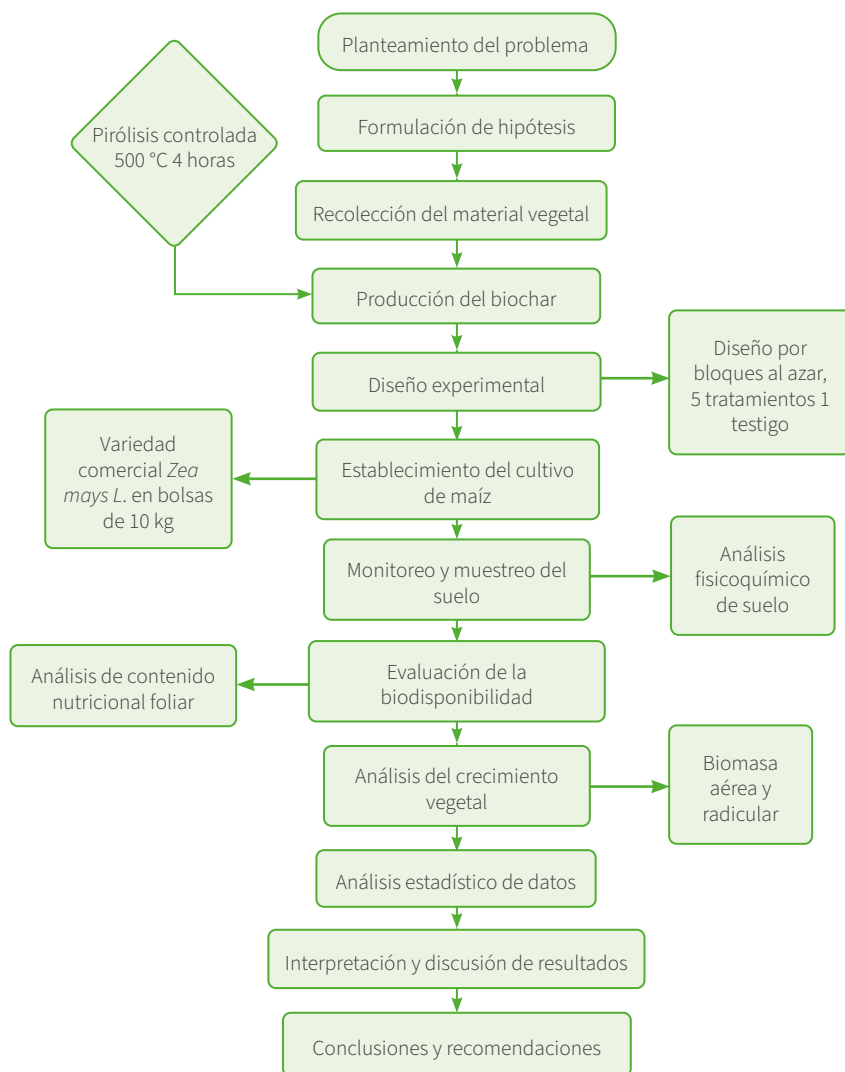
El biochar se obtuvo mediante pirólisis controlada de tallos secos de *G. angustifolia* manteniendo una temperatura de 500 °C durante cuatro horas (ver figura 2). Luego, se mezcló en proporción 1:1 con pollinaza, se agregó agua y se permitió el crecimiento de microorganismos y la mineralización de nutrientes durante quince días. Durante este período, la temperatura se mantuvo por debajo de 70 °C y la humedad se controló diariamente mediante la prueba del puño.

La siembra se realizó en macetas con 10 kg de suelo agrícola homogéneo de textura franca (38,46 % arena; 46,77 % limo; 14,77 % arcilla), con pH 4,62 (relación 1:1), materia orgánica 2,46 %, conductividad eléctrica 30,95 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, capacidad de intercambio catiónico 19,68 meq·100 g⁻¹ y contenidos de fósforo disponible 62,17 ppm y potasio intercambiable 0,42 meq·100 g⁻¹, incorporando las enmiendas según el tratamiento. Se sembraron dos semillas de *Zea mays* por maceta y se realizó un riego cada dos días durante todo el estudio.

El experimento tuvo una duración total de cuarenta y seis días después de la germinación, período correspondiente a la fase vegetativa del cultivo. Durante este tiempo se registraron variables de crecimiento vegetativo (altura de planta, número de hojas y diámetro del tallo) cada tres días. Al finalizar el ensayo, se realizó la cosecha destructiva para determinar biomasa aérea y radicular, así como el análisis foliar de nutrientes —nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca),

magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), boro (B), sodio (Na) y cloro (Cl)— y el análisis químico del sustrato. El cultivo no se llevó hasta la etapa reproductiva ni a producción de grano. Los datos fueron evaluados mediante ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0,05$) para establecer diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Figura 2. Metodología utilizada en el experimento

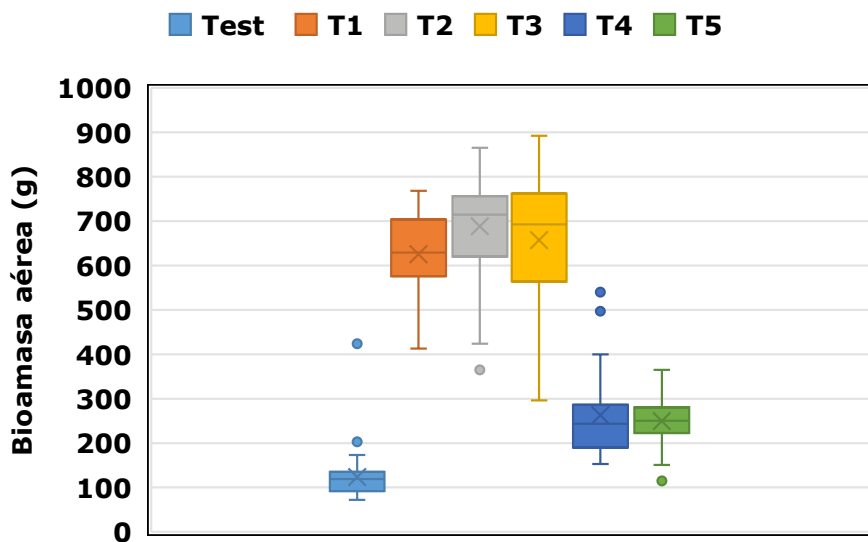


Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Los resultados muestran que el tratamiento combinado con biochar y fertilizante (T2) fue el más efectivo por cuanto generó el mayor rendimiento en biomasa aérea (688,26 g SE = 14,5) y radicular (53 g SE = 5,4). Por su parte, T3 no presentó mejores resultados que T2 y se evidenció una mayor dispersión en los datos. El tratamiento con fertilizantes convencional (T1) tuvo rendimientos menores (625 g SE = 12,8) y (49 g SE = 5,8) frente a biomasa aérea y radicular respectivamente. En contraste, las dosis exclusivas de biochar aplicadas en T4 y T5 tuvieron un impacto bajo frente a los demás tratamientos, como se evidencia en la figura 3.

Figura 3. Resultados de acumulación de biomasa aérea



Fuente: elaboración propia.

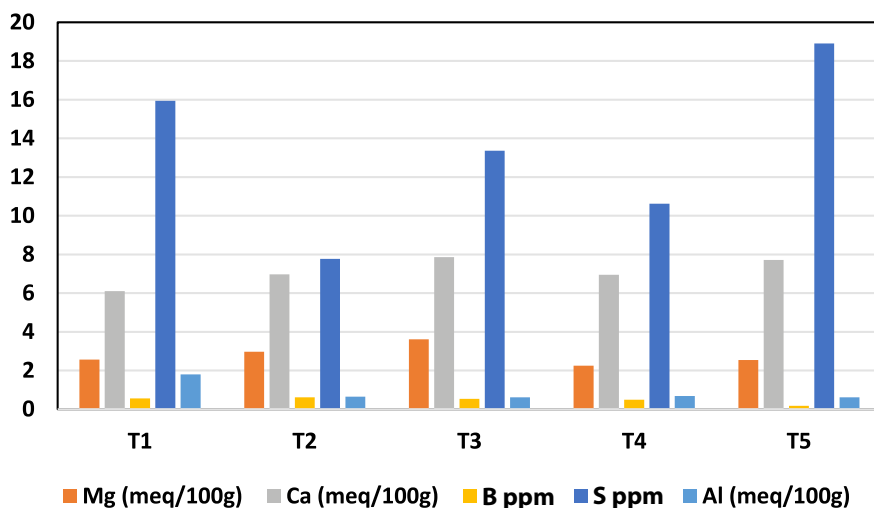
En el análisis de suelos, el ANOVA evidenció que no existieron diferencias significativas entre tratamientos en sodio, hierro, cobre, manganeso y zinc ($p > 0,05$). Sin embargo, se observaron diferencias significativas en magnesio, calcio, boro, azufre y aluminio intercambiable ($p < 0,05$) (ver figura 4).

El contenido de calcio mostró variaciones entre tratamientos, con valores más altos en T3 (7,86 meq/100 g) y T5 (7,71 meq/100 g) respecto al tratamiento convencional T1 (6,10 meq/100 g), mientras que el testigo (7,19 meq/100 g) presentó valores intermedios. En el caso del magnesio, el mayor contenido se registró en T3 (3,62 meq/100 g), superando tanto al testigo (2,60 meq/100 g) como a T1 (2,56 meq/100 g).

El boro presentó su valor máximo en T2 (0,61 ppm), mientras que el azufre fue mayor en T5 (18,90 ppm), seguido de T1 (15,94 ppm) y T3 (13,36 ppm).

En cuanto al aluminio intercambiable, se evidenció una reducción marcada en todos los tratamientos que incluyeron biochar (T2, T3, T4 y T5), con valores entre 0,62 y 0,69 meq/100 g en comparación con el testigo (1,85 meq/100 g) y el tratamiento convencional T1 (1,80 meq/100 g), lo que confirma un efecto significativo del biochar en la disminución de Al^{3+} ($p < 0,05$).

Figura 4. Resultados de análisis de suelos



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, al implementar ANOVA en el análisis nutricional foliar se determinó que no hay cambio significativo entre tratamientos en contenido de potasio, calcio, azufre, cobre, zinc, boro, sodio y cloro ($p > 0,05$) y que sí se presentó un cambio

en los contenidos de nitrógeno, fósforo, magnesio, hierro y manganeso ($p < 0,05$). La prueba de Tukey muestra que para elementos menores y microelementos, el contenido de magnesio fue mayor en T1 frente a los tratamientos que no tuvieron fertilización (T4 y T5). En cuanto al hierro y el manganeso, la prueba de Tukey mostró que únicamente T2 presentó diferencias frente los tratamientos sin fertilización (T4 y T5). Adicionalmente, los contenidos de nitrógeno y fósforo también presentaron diferencias significativas entre tratamiento sin fertilización (T4 y T5) en relación con los demás tratamientos ($p < 0,05$) (ver tabla 1).

Tabla 1. *Contenido de elementos menores y microelementos en hojas de Z. mays luego de cuarenta y seis días de germinación*

Elemento	TEST	T1	T2	T3	T4	T5
		Mean + SD (Min - Max)	Mean + SD (Min - Max)	Mean + SD (Min - Max)	Mean + SD (Min - Max)	Mean + SD (Min - Max)
Magnesio (%)	0,13	0,18±0,03 (0,14-0,24)	0,16±0,01((0,14-0,18)	0,13±0 (0,12-0,14)	0,09±0 (0,08-0,09)	0,09±0 (0,08-0,1)
Hierro (PPM)	60	113±6,81 (106-124)	121±16,71 (99-146)	98±20,23 (80-131)	64,33±7,75 (58-77)	60±3,24 (56-65)
Manganeso (PPM)	43	59±3,24 (54-63)	67,67±11,27 (57-86)	54,67±6,37 (46-64)	39±2,54 (36-43)	36,33±1,77 (34-39)

Fuente: elaboración propia.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que destacan el papel del biochar como enmienda más que como fertilizante directo (Puentes Escobar et al., 2021), pues su efectividad está directamente relacionada con la dosis empleada y la combinación con otras fuentes de nutrientes. Khan et al. (2024) evaluaron ciento catorce publicaciones relacionadas con el aumento de la productividad en diversos cultivos por la aplicación de biochar y reportaron un incremento promedio del 20 %, resultados que corroboran los obtenidos en el experimento, donde T2 tuvo un incremento de masa aérea del 10,05 % (IC 95 % 3,60-16,51 %, $p < 0,01$) y radicular del 8,16 % (IC 95 % 5,14-10,90 %, $p < 0,01$).

Conclusiones

El biochar de *G. angustifolia* Kunth, aplicado en combinación con fertilizantes NPK mostró potencial como fuente complementaria de elementos menores en el cultivo de *Zea mays* L. La dosis óptima identificada (T2) favoreció la absorción de nutrientes como el nitrógeno, magnesio, hierro y manganeso y, asimismo, tuvo un impacto favorable en el crecimiento de la planta. Lo anterior, sumado a la mejora en las propiedades fisicoquímicas del suelo, permiten evidenciar que el biochar es una alternativa sostenible para la reducción en la necesidad de uso de fertilizantes en el cultivo.

No obstante, la aplicación exclusiva de biochar (T4 y T5) tiene un efecto contraproducente que limita la disponibilidad de nutrientes, lo que afecta de manera negativa al crecimiento de la planta; por lo tanto, no es recomendable utilizar el biochar como reemplazo de la fertilización convencional. Por otra parte, la aplicación de dosis elevadas (T3) no genera beneficios significativos, y en algunos casos presentan impactos negativos, por lo que una dosis no controlada puede considerarse un desperdicio del insumo. Se recomienda entonces el uso de cantidades específicas, que para este estudio resultaron en aproximadamente 5 t/ha de biochar junto con fertilización convencional tipo NPK.

Por último, futuras investigaciones deben enfocarse en el estudio de la viabilidad económica y la validación en cultivos que lleguen hasta la cosecha con el fin de evidenciar el impacto final del biochar y, de esta manera, evaluar su potencial comercial y productivo, permitiendo un acercamiento a la agricultura sostenible en la región.

Agradecimientos

A las personas que de alguna manera hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

Financiamiento

Este estudio fue financiado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, bajo el código de proyecto PGI6602ECAPMA2024, el cual pertenece al banco de proyectos de la convocatoria interna No. 12, cohorte 2 de 2023.

Uso de inteligencia artificial

Se utilizó la inteligencia artificial, específicamente el LLM ChatGPT para revisión de coherencia gramatical en algunos párrafos del resumen, introducción y resultados. Cabe aclarar que estos párrafos se reescribieron nuevamente luego de haberlos revisado con la IA. Se utilizó también para la revisión de la estructura de citación de la literatura en la sección final de este documento. Las citas fueron revisadas posteriormente una a una para asegurar la correcta aplicación de las normas APA séptima edición.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Alves, K. S., Guimarães, T., de Carvalho Bittencout, R., Gonçalves, P. A., de Cássia, A., Carneiro, O., Ladeira Carvalho, A. M. y Moreira da Costa, M. (2025). Bamboo-derived biochars: physicochemical properties and implications for soil fertility and sustainability. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 21085-21105. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06702-6>
- Barłóg, P. (2023). Improving fertilizer use efficiency—Methods and strategies for the future. *Plants*, 12(20), 3658. <https://doi.org/10.3390/plants12203658>
- Carpio Valencia, L., García Vásquez, G., Coello Miele, A., Franco Morante, F. y Brunis Velásquez, O. (2024). Evaluación de programas de fertilización sobre el comportamiento agronómico de híbridos de maíz (*zea mays l.*). *Conocimiento Global*, 9(3), 243-262. <https://doi.org/10.70165/cglobal.v9i3.464>
- Deshoux, M., Sadet-Bourgeteau, S., Gentil, S. y Chemidlin Prévost-Bouré, N. (2023). Effects of biochar on soil microbial communities: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 902, 166079. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166079>
- Ghaffari, S. M. N., Shokuhfar, A., Mojaddam, M., Lak, S. y Afrinesh, A. (2024). Cycocel and micronutrients on yield of *Zea mays L.* *Journal of the Selva Andina Research Society*, 15(1), 14-28. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2024.150100014>
- Kumar, S. y Mohapatra, T. (2021). Interaction between macro and micronutrients in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 665583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>
- OpenAI. (2025). *ChatGPT* (versión GPT-4.5) [Modelo de lenguaje]. <https://chat.openai.com>
- Peñuelas, J., Coello, F. y Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture & Food Security*, 12, 5. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- Puentes Escobar, T. C. y Rodríguez Carlosama, A. (2021). Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. *Avances Investigación en Ingeniería*, 18(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7540>

- Ramírez Palomino, J. R. (2023). *Influencia del biochar en suelos agrícolas degradados de la provincia de La Mar – Ayacucho, 2021* [tesis de grado en Ingeniería Ambiental]. Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13147>
- Ramírez, G. A., Molina, D. S., Montealegre, W. S., Méndez, N. M. y Munar, A. M. (2024). Cuantificación de biomasa aérea de *Guadua angustifolia Kunth* en la cuenca hidrográfica del río Guarapas, en Pitalito (Huila), Colombia. En N. Méndez y A. Munar (Comps.), *Biodiversidad y servicios ecosistémicos de bosques secundarios andino-amazónicos* (pp. 60-74). Sello Editorial UNAD. <https://doi.org/10.22490/UNAD.9789586519878>
- Rodríguez Vila, A., Atuah, L., Abubakari, A. H., Atorqui, D. W., AbdulKarim, A., Coole, S., Hammond, J., Robinson, S. y Sizmur, T. (2022). Effect of biochar on micro-nutrient availability and uptake into leafy greens in two urban tropical soils with contrasting soil pH. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 821397. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.821397>
- Shakoor, M. B., Iqbal, M., Ali, S. y Nawaz, M. (2021). Heavy metals immobilization and improvement in maize (*Zea mays* L.) growth amended with biochar and compost. *Scientific Reports*, 11(1), 18416. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97525-8>
- Skrzypczak, D., Szopa, D., Mikula, K., Izydorczyk, G., Baśladyńska, S., Hoppe, V., Pstrowska, K., Wzorek, Z., Kominko, H. y Kuźażyński, M. (2022). Tannery waste-derived biochar as a carrier of micronutrients essential to plants. *Chemosphere*, 294, 133720. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133720>
- Verma, K. K., Song, X. P., Joshi, A., Tian, D. D., Rajput, V. D., Singh, M., Arora, J., Minkina, T. y Li, Y. R. (2022). Recent trends in nanofertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials*, 12(1), 173. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
- Virú Vásquez, P., Pilco Núñez, A., Tineo Córdova, F., Madueño Sulca, C. T., Quispe Ojeda, T. C., Arroyo Paz, A., Álvarez Arteaga, R., Velásquez Zúñiga, Y., Oscanoa Gamarra, L. L., Saldívar Villarroel, J., Césare Coral, M. F. y Núñez Bustamante, E. (2025). Integrated biochar–compost amendment for *Zea mays* L. phytoremediation in soils contaminated with mining tailings of Quiulacocha, Perú. *Plants*, 14(10), 1448. <https://doi.org/10.3390/plants14101448>



Fitotoxicidad del glifosato sobre germinación y emergencia de seis especies agroforestales en Caquetá, Colombia

Resumen

El uso masivo de glifosato como herbicida en sistemas agrícolas tropicales ha despertado preocupación por los posibles efectos fitotóxicos sobre especies vegetales nativas. En regiones como Caquetá, donde la agricultura coexiste con ecosistemas de alta biodiversidad, resulta crucial evaluar el impacto de este herbicida sobre la germinación y emergencia de semillas de especies agroforestales clave para la sostenibilidad del bosque húmedo tropical. Aunque se han reportado efectos fitotóxicos del glifosato sobre la calidad de semillas en diversas especies agrícolas y forestales, no se han documentado estudios que evalúen indicadores como el índice de velocidad de germinación (IVG) y el tiempo medio de germinación (TMG) en especies agroforestales nativas del bosque húmedo tropical de Caquetá. Este vacío limita la comprensión del impacto del herbicida en procesos germinativos críticos para la restauración y sostenibilidad de estos ecosistemas. El presente estudio evaluó el efecto fitotóxico del ingrediente activo glifosato en la calidad de las semillas de seis especies agroforestales del bosque húmedo tropical de Florencia, departamento del Caquetá, Colombia, para lo cual se evaluaron variables como la germinación, la emergencia y la conductividad eléctrica. Se realizaron experimentos con bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron cinco (correspondientes a concentraciones de glifosato). La germinación se evaluó en rollos de papel y la emergencia en bandejas con arena. El estudio concluye que el glifosato reduce significativamente la germinación y la emergencia de semillas de seis

especies agroforestales estudiadas (del 57-100 %). En ausencia de glifosato, la germinación encontrada es del 75-100 %. Los frutales amazónicos camu camu, copoazú, cocona y guamo se comportaron como las especies más resilientes al efecto tóxico del producto. Todas las dosis evaluadas del herbicida resultaron en una reducción de las variables estudiadas IVE, TME, N7G y N25G, especialmente en semillas sembradas en arena. Aunque no se observó un efecto en la conductividad eléctrica, los resultados sugieren que el glifosato genera una serie de desórdenes fisiológicos que afectan las variables germinación y emergencia, afectando su viabilidad. Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar los efectos no intencionados del glifosato en especies vegetales no objetivo, especialmente en contextos de conservación forestal.

Palabras clave: glifosato, calidad fisiológica de semillas, especies agroforestales, bosque húmedo tropical.

Abstract

The widespread use of glyphosate as an herbicide in tropical agricultural systems has raised concerns about its potential phytotoxic effects on native plant species. In regions such as Caquetá, where agriculture coexists with ecosystems of high biodiversity, it is crucial to assess the impact of this herbicide on the germination and emergence of seeds from agroforestry species essential to the sustainability of the tropical rainforest. Although phytotoxic effects of glyphosate on seed quality have been reported in various agricultural and forest species, studies evaluating indicators such as Germination Speed Index (GSI) and Mean Germination Time (MGT) in native agroforestry species of the Caquetá tropical rainforest have not been documented. This gap limits the understanding of herbicide's impact on critical germination processes necessary for ecosystem restoration and sustainability. This study evaluated the phytotoxic effect of the active ingredient glyphosate on seed quality, including germination, emergence, and electrical conductivity, in six agroforestry species of the tropical rainforest in Florencia, Caquetá, Colombia. Experiments were conducted using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with four replications. Treatments included five glyphosate concentration levels. Germination was assessed using paper rolls, and emergence in sand-filled trays. The study concluded that glyphosate significantly reduces germination and emergence rates of the six agroforestry species examined (from 57-100 %). In the absence of glyphosate, germination rates ranged between 75-100 %. Amazonian fruit species camu camu, copoazú, cocona, and guamo showed the highest resilience to the herbicide's toxic effects. All tested doses of the herbicide led to reduced values in the evaluat-

ed variables —GSI, MGT, N7G, and N25G—, particularly in seeds germinated in sand. Although no effect was observed on electrical conductivity, the results suggest that glyphosate induces a series of physiological disorders that compromise germination and emergence, ultimately affecting seed viability. These findings highlight the need to consider the unintended effects of glyphosate on non-target plant species, especially in forest conservation contexts.

Keywords: glyphosate, physiological seed quality, agroforestry species, tropical rainforest.

Introducción

El glifosato es actualmente el herbicida más utilizado en la agricultura moderna debido a su eficacia, amplio espectro y acción sistémica (Bruggen et al., 2021). Sin embargo, su uso masivo ha generado controversias globales por los efectos adversos sobre la salud humana, la biodiversidad y los organismos no objetivo. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ([IARC], 2015) lo clasificó en el 2015 como “probablemente cancerígeno para los humanos”, alimentando debates sobre su seguridad, regulación y persistencia ambiental.

Diversos estudios han documentado efectos negativos del glifosato sobre la germinación, el vigor y el microbiota del suelo en sistemas agrícolas (Ávila et al., 2020; Bonfleur et al., 2015). No obstante, existe una limitada evidencia sobre sus impactos en especies vegetales nativas de ecosistemas tropicales, especialmente en contextos agroforestales. En Colombia, el uso intensivo de glifosato se extiende incluso a la erradicación aérea de cultivos de uso ilícito, aplicando dosis superiores a las recomendadas para la agronomía (Ministerio de Justicia y del Derecho, 2024). Esta práctica puede generar deriva sobre especies no objetivo, lo que podría alterar procesos ecológicos sensibles en regiones de alta biodiversidad como Florencia, Caquetá.

A pesar de que se ha estudiado el efecto del glifosato sobre cultivos comerciales, se desconoce su influencia sobre parámetros fisiológicos clave de semillas agroforestales nativas del bosque húmedo tropical. En particular, no existen reportes sobre indicadores como el índice de velocidad de germinación (IVG), el tiempo

medio de germinación (TMG) ni la emergencia en condiciones contrastantes de sustrato. Las seis especies analizadas en este estudio tienen un alto valor ecológico y socioeconómico en el norte amazónico colombiano y son fundamentales para programas de restauración, reforestación y sistemas agroforestales sostenibles.

Por lo anterior, este trabajo busca evaluar el efecto fitotóxico de diferentes concentraciones de glifosato sobre la calidad fisiológica de semillas de seis especies agroforestales del bosque húmedo tropical en Florencia, Caquetá, Colombia. Específicamente, se propone: (1) analizar la tasa de germinación, emergencia y conductividad eléctrica como indicadores fisiológicos, (2) comparar la respuesta de semillas bajo dos condiciones de evaluación: germinación en papel y emergencia en arena y (3) determinar la respuesta de cada especie ante la exposición al herbicida con base en su comportamiento en parámetros clave (IVG, TMG, N7G, N25G). Los resultados permiten delimitar los efectos no intencionados del glifosato sobre especies vegetales nativas y, de esta manera, proporcionar evidencia científica para fortalecer estrategias agroforestales y de conservación en la región del Caquetá.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio de Florencia, departamento de Caquetá, Colombia, una zona representativa del bosque húmedo tropical amazónico. La región se caracteriza por un clima cálido-húmedo, con una altitud de 242 m s. n. m., una temperatura media anual de 25 °C y una precipitación promedio cercana a los 4000 mm (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2023). Las coordenadas geográficas del sitio de estudio son 1°36'51"N y 75°36'42"W.

Especies analizadas

Las semillas de las seis especies agroforestales seleccionadas —carbón (o carbonero) (*Zygia longifolia*), bilibil (*Guarea guidonia*), guamo (*Inga sp*), camu camu (*Myrciaria dubia*), copoazú (*Teobroma grandiflorum* Schum) y cocona (*Solanum sessiliflorum*)— se recolectaron de individuos sanos y vigorosos elegidos de forma aleatoria en áreas donde no se había aplicado glifosato. Esto con el fin de evitar la exposición previa al ingrediente activo. Posteriormente, las semillas fueron procesadas en el laboratorio, eliminando aquellas malformadas y desinfectándolas con una solución de hipoclorito de sodio al 1 % según los protocolos estandarizados para garantizar su calidad fisiológica.

Carbonero (*Zygia longifolia*): es un árbol que puede alcanzar de 6 a 25 m de altura y crece en altitudes entre los 0 y los 1000 m s. n. m. Adicionalmente, crece en terrenos arenosos, francoarenosos o limosos, hallándose por lo general en bosques húmedos tropicales. Se caracteriza por ser una variedad arbórea cilíndrica y longeva. Sus ramas se despliegan desde baja altura. Las flores que produce son de color rosa o púrpura, mientras que sus legumbres son aplanadas, curvadas, con semillas negras, lisas y sin arilos. En materia de producción agrícola, este puede cumplir la función como cerca viva o sombra; además, es útil en cultivos mixtos. De igual forma, contribuye a la restauración de los cauces fluviales y a la recuperación de los suelos (Weaver, 1998).

Bilibil (*Guarea guidonia*): árbol maderable ampliamente distribuido en el bosque húmedo tropical, de hasta 30 m de alto, con corteza fisurada café con tintes rojizos, grandes hojas compuestas por cuatro a catorce pares de folíolos opuestos y elípticos, florecitas blancas o amarillentas dispuestas en racimos piramidales que nacen entre las hojas, y frutos globosos rojizos con tintes cafés, que se abren en cuatro valvas cuando están maduros. Cada valva contiene una semilla rodeada por una pulpa naranja. La madera de color rojo oscuro se usa para hacer pilones y tallas (Bernal, 2012). Tiene importancia ecológica debido a sus frutos, los cuales sirven como alimento para las aves. Asimismo, es promotor de corredores ecológicos, y por su porte y potencial es determinante para procesos de restauración, protección de márgenes hídricos y empleado para la sombra (Bernal et al., 2014).

Guamo (*Inga sp*): especie de porte arbóreo que en condiciones óptimas puede alcanzar hasta los 30 m de altura. Posee hojas compuestas, paripinnadas, de color

verde oscuro, ausentes de brillo. El raquis de la hoja es alado y en cada inserción presenta glándulas en forma de cráter. Sus flores blancas están dispuestas en inflorescencias de espiga. Su fruto en legumbre es de gran longitud y contiene varias semillas cubiertas por una pulpa carnosa de color blanca que es comestible. De acuerdo con Bernal et al. (2018), es una especie muy importante en procesos de restauración, siendo también muy atractiva para la fauna dispersora y polinizadora, un aspecto de gran importancia en todo proceso de restauración. Sus raíces estabilizan el suelo y mejoran las características edáficas para facilitar la adaptación de las demás especies.

Camu camu (*Myrciaria dubia*): es un frutal amazónico que crece de forma silvestre en las zonas inundables de los arroyos y en las orillas de los ríos, lagos o pantanos de la región amazónica (Perú, Brasil, Colombia, Ecuador y Venezuela). En su ambiente nativo, el árbol puede alcanzar de 4 a 8 m de altura y puede permanecer hasta seis meses sumergido en agua; además, crece naturalmente en la zona de la planicie de inundación. La especie también se halla en los estados de Pará y Rondônia (Brasil) (Peters y Vásquez, 1987). La gran importancia del camu camu como alimento se debe a su alto contenido de vitamina C (ácido ascórbico – 2880 mg/100 g de pulpa), muy superior a la mayoría de las plantas cultivadas. La cantidad de ácido ascórbico en el camu camu es 1,5 veces superior a la de la acerola (1790 mg/100 g); trece veces mayor que el anacardo (219,7 mg/100 g) y sesenta y cinco veces mayor que el limón (44,2 mg/100 g) (Pinedo et al., 2007).

Copoazú (*Teobroma grandiflorum* Schum): el copoazú es una planta perenne de la familia del cacao común. En condiciones naturales, los ejemplares alcanzan entre 15 y 25 cm de altura, con un tronco recto de 25 a 30 cm de diámetro. En áreas cultivadas, la altura varía de 6 m a 10 m y el dosel varía en forma y diámetro según el manejo. Es un árbol típico de la región amazónica, considerado uno de los frutales prometedores en el Amazonas. Su valor económico se basa principalmente en la industrialización y comercialización de pulpa, disfrutada en forma de jugo, crema o dulces. La semilla se considera valiosa, porque tiene una similitud botánica y química con la semilla de cacao, lo que permite su uso en la fabricación de chocolate (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas [Sinchi], 2011). El proceso de la industrialización de las semillas de copoazú es similar al de los granos de cacao, que incluye las etapas de fermentación, secado y tostado.

Cocona (*Solanum sessiliflorum*): la cocona o lulo amazónico es una solanácea arbustiva originaria de la región del alto Orinoco de la cuenca amazónica. Actualmente, se puede encontrar en toda la Amazonía brasileña, peruana, ecuatoriana, colombiana y venezolana tanto en forma cultivada como en condiciones subespontáneas. Esta planta es una especie nativa de la América tropical, de las vertientes orientales de los Andes (León, 1987). Según Barrera et al. (2017), las partes comestibles son la pulpa y el mucilago que rodea las semillas del fruto maduro. Estas pueden ser utilizadas para la preparación de refrescos, jarabes, helados, jugos, encurtidos, caramelos y ensaladas. En la industria, se utiliza para la elaboración de jaleas, néctares y mermeladas. También tiene usos en la medicina tradicional, tales como el tratamiento de quemaduras, escabificada, antidiabético, antihipertensivo y antiofídico.

Tratamientos y procedimientos experimentales

Se llevaron a cabo tres experimentos independientes para evaluar el efecto fitotóxico del glifosato sobre semillas de seis especies agroforestales. Se utilizó un diseño completamente al azar (DBCA) con cinco tratamientos correspondientes a dosis de glifosato: 0, 18, 36, 54 y 72 g L⁻¹ del equivalente ácido, para lo cual se empleó el producto comercial formulado Stop West® (contenido de glifosato ácido: 480 g L⁻¹). Cada tratamiento incluyó cuatro repeticiones biológicas (n = 4) con veinticinco semillas por repetición, asignadas aleatoriamente mediante el *software* estadístico Infostat.

El estudio empleó un bioensayo controlado mediante imbibición de semillas durante treinta minutos en soluciones con distintas dosis de glifosato, seguido de pruebas de germinación, emergencia y conductividad eléctrica. Este enfoque representa una condición experimental controlada para evaluar fitotoxicidad potencial y no una simulación exacta de todos los mecanismos de exposición en campo, como deriva o escorrentía. Las soluciones fueron preparadas con agua destilada y se ajustó el pH a 6.5 ± 0.2 utilizando ácido fosfórico para evitar sesgos por reacciones ácido-base, dado que el pH puede influir en la absorción y toxicidad del herbicida (Bonfleur et al., 2015).

Los ensayos de germinación se realizaron en rollos de papel tipo germitest de gramaje 120 g/m² marca Anchor Paper®, previamente humedecidos con agua destilada. Las semillas fueron colocadas en una cámara de germinación a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 70 % HR, con fotoperíodo controlado de doce horas con luz y doce horas con oscuridad. La germinación se monitoreó diariamente, considerando como germinada la semilla que presentaba emisión de la radícula ($>2\text{mm}$). El estudio incluyó tres tipos de prueba: prueba de germinación en rollos de papel germitest, prueba de emergencia en bandejas con arena lavada y esterilizada y prueba de conductividad eléctrica posterior a la imbibición. Asimismo, las variables fueron analizadas mediante ANOVA y comparaciones múltiples de Tukey HSD. Con ello, se atiende la necesidad de claridad sobre el tipo de ensayo implementado.

Para las pruebas de emergencia, las semillas fueron sembradas de forma manual en bandejas plásticas con arena lavada y esterilizada, mantenida a humedad constante mediante riego manual con agua destilada dos veces al día. La emergencia se registró cada veinticuatro horas hasta el día veinticinco, contabilizando la aparición del brote en la superficie como criterio de emergencia.

La prueba de conductividad eléctrica se llevó a cabo posterior a la imbibición mediante la inmersión de veinticinco semillas en 75 ml de agua destilada, en tubos de ensayo a 20°C durante veinticuatro horas. Se utilizó un conductímetro digital (HANNA® HI98303).

Análisis de datos

Los datos obtenidos incluyeron variables fisiológicas de germinación y emergencia analizadas a través de indicadores cuantitativos ampliamente utilizados en estudios de calidad de semillas. Para la germinación, se registró el porcentaje final de germinación (%G), el índice de velocidad de germinación (IVG), el tiempo medio de germinación (TMG) y la velocidad media de germinación (VMG), siguiendo las metodologías propuestas por Maguire (1962) y Ranal y Santana (2006). Para la emergencia, se determinaron el índice de velocidad de emergencia (IVE), el tiempo medio de emergencia (TME) y el porcentaje de emergencia a los siete y veinticinco días (N7D y N25D) de acuerdo con protocolos establecidos en estudios de vigor en ambientes simulados (Matthews et al., 2014).

Además, los datos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) para cada especie y tipo de ensayo, y se verificaron previamente los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Levene respectivamente (Zar, 1999). Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD para identificar diferencias entre tratamientos (Tukey, 1977). Este análisis permite establecer rangos estadísticamente distintos entre dosis de glifosato en cada variable medida, conservando el error tipo I mediante el ajuste simultáneo de comparaciones. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el *software* InfoStat® v2020 (di Rienzo et al., 2020), ampliamente validado en investigaciones agronómicas y biológicas en América Latina.

Resultados y discusión

Comprobación de supuestos estadísticos

Antes de realizar los análisis de varianza (ANOVA), se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas:

- **Normalidad:** prueba de Shapiro-Wilk para cada variable y especie ($p > 0,05$).
- **Homocedasticidad:** prueba de Levene para igualdad de varianzas entre tratamientos ($p > 0,05$).

Los resultados permitieron la aplicación del ANOVA paramétrico y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (HSD).

Efectos del glifosato sobre la germinación

Los análisis estadísticos realizados se condensan en las tablas 1 y 2. El porcentaje de germinación (%G), el índice de velocidad de germinación (IVG) y el tiempo me-

dio de germinación (TMG) fueron afectados de forma significativa por la dosis de glifosato (ANOVA; $p < 0,0001$). Se observó un patrón dosis-respuesta en el cual el aumento en la concentración del herbicida indujo una reducción progresiva en todas las variables fisiológicas.

Las especies guamo, carbón y copoazú presentaron inhibición total de la germinación a partir de $1,8 \text{ g L}^{-1}$. En contraste, camu camu mantuvo niveles de germinación superiores al 7 % incluso en la dosis más alta ($7,2 \text{ g L}^{-1}$), mostrando una tolerancia diferencial.

Tabla 1. ANOVA de la variable germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales

Especie	Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	p-valor (Pr(>F))
Bilibil (<i>Guarea guidonia</i>)	Tratamiento	4	555,0	138,75	18,02	**
	Residuales (Error)	15	115,5	7,70		
	Total	19	670,5			
Guamo (<i>Inga sp</i>)	Tratamiento	4	1936,0	484,0	1613,3	**
	Residuales (Error)	15	4,5	0,3		
	Total	19	1940,5			
Carbón (<i>Zygia longifolia</i>)	Tratamiento	4	1414,5	353,6	104,0	**
	Residuales (Error)	15	51,0	3,4		
	Total	19	1465,5			
Camu camu (<i>Myrciaria dubia</i>):	Tratamiento	4	1944,5	486,1	141,7	**
	Residuales (Error)	15	51,5	3,4		
	Total	19	1996,0			

Especie	Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Estadístico F	p-valor (Pr(>F))
Copoazú (<i>Teobroma grandiflorum</i> Schum)	Tratamiento	4	1629,3	407,3	203,6	**
	Residuales (Error)	15	30,0	2,0		
	Total	19	1659,3			
Cocona (<i>Solanum sessiliflorum</i>)	Tratamiento	4	1888,5	472,1	50,76	**
	Residuales (Error)	15	139,5	9,3		
	Total	19	2028,0			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Prueba de Tukey para la germinación y tratamientos con glifosato en seis especies agroforestales

Especie	Tratamiento	Media de germinación	Prueba de Tukey HSD
Bibilil (<i>Guarea guidonia</i>)	0 (g/L-1)	12,5	a
	1,8 (g/L-1)	6,0	b
	3,6 (g/L-1)	5,0	b
	5,4 (g/L-1)	0,0	c
	7,2 (g/L-1)	0,0	c
Guamo (<i>Inga sp</i>)	0 (g/L-1)	22,0	a
	1,8 (g/L-1)	0,0	b
	3,6 (g/L-1)	0,0	b
	5,4 (g/L-1)	0,0	b
	7,2 (g/L-1)	0,0	b

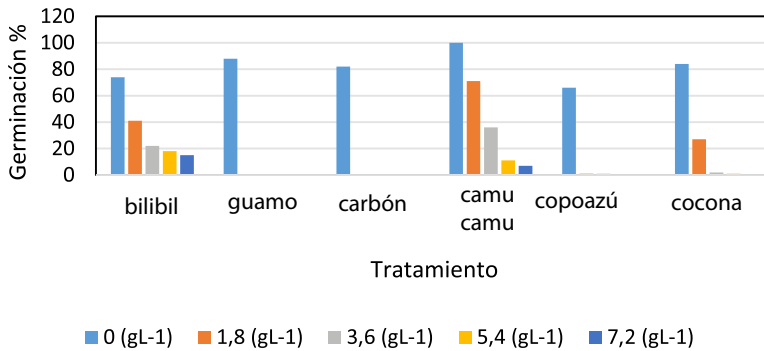
Especie	Tratamiento	Media de germinación	Prueba de Tukey HSD
Carbón (<i>Zygia longifolia</i>)	0 (g/L-1)	18,75	a
	1,8 (g/L-1)	0,5	b
	3,6 (g/L-1)	0,0	b
	5,4 (g/L-1)	0,0	b
	7,2 (g/L-1)	0,0	b
Camu camu (<i>Myrciaria dubia</i>):	0 (g/L-1)	23,50	a
	1,8 (g/L-1)	13,75	b
	3,6 (g/L-1)	8,50	c
	5,4 (g/L-1)	2,00	d
	7,2 (g/L-1)	1,75	d
Copoazú (<i>Teobroma grandiflorum</i> Schum)	0 (g/L-1)	20,50	a
	1,8 (g/L-1)	3,50	b
	3,6 (g/L-1)	2,75	b
	5,4 (g/L-1)	0,0	c
	7,2 (g/L-1)	0,0	c
Cocona (<i>Solanum sessiliflorum</i>)	0 (g/L-1)	21,75	a
	1,8 (g/L-1)	6,75	b
	3,6 (g/L-1)	1,00	c
	5,4 (g/L-1)	0,50	c
	7,2 (g/L-1)	0,00	c

Nota. La prueba de Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*) compara todas las medias de los tratamientos entre sí para identificar cuáles son diferentes. Los tratamientos que comparten una letra no son significativamente diferentes entre sí.

Fuente: elaboración propia.

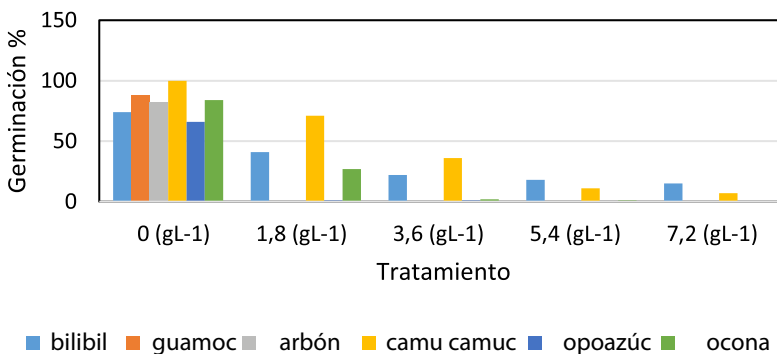
Las semillas de las seis especies estudiadas mostraron ser muy susceptibles al glifosato, observándose una reducción en la germinación con dosis crecientes del herbicida. De acuerdo con lo encontrado, las especies más sensibles en su orden son guamo, carbón y copoazú (sin germinación en dosis de 1,8-7,2 gL⁻¹); cocona, camu camu y bilibil se vieron menos afectadas, pero aun así la germinación se redujo de 0-75 % en la medida que las dosis del producto se incrementaron (ver figuras 1 y 2).

Figura 1. Porcentaje de germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Germinación en rollo de papel de seis especies agroforestales



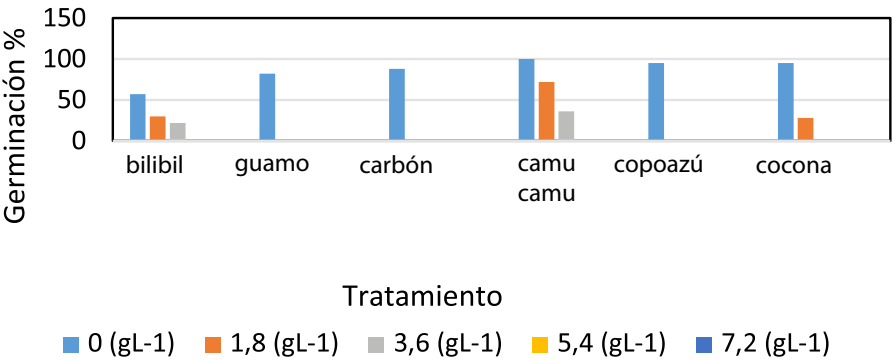
Fuente: elaboración propia.

Se encontraron valores de germinación entre el 57-100 %, siendo el menor valor en la especie bilibil y los mayores en las otras cinco especies, alcanzando el 100 % de

germinación las especies camu camu, copoazú y cocona, correspondientes a los tres frutales amazónicos.

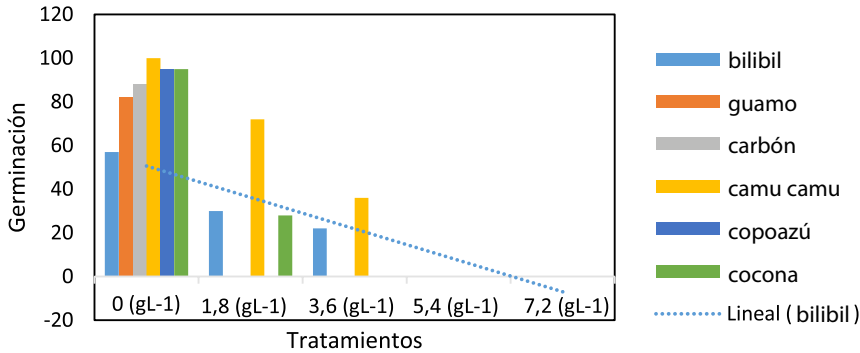
Las especies más rápidas en germinar en ausencia del glifosato fueron copoazú y el guamo (ver figura 3): a los dieciséis días ya habían germinado el 75 % y 88 % de las semillas respectivamente. Por el contrario, la más demorada fue la de bilibil.

Figura 3. Porcentaje de emergencia en arena de seis especies agroforestales



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Emergencia en arena de seis especies agroforestales



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Indicadores relacionados con la germinación de semillas de seis especies agroforestales estudiadas

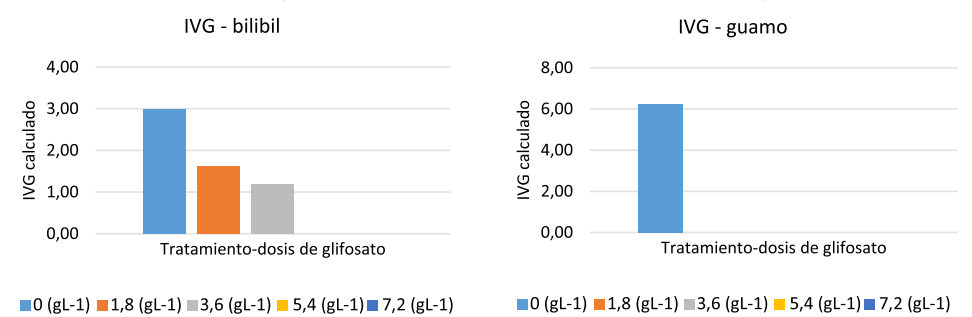
Especie	Tratamiento	% Germinación	% No germinación	IVG	N7D	N14D	N25D	TMG
Bilibil (<i>Guarea guidonia</i>)	0 (g/L-1)	57	43	2,99	0	3	57	10,95
	1,8 (g/L-1)	30	70	1,62	0	0	30	5,65
	3,6 (g/L-1)	22	22	1,20	0	0	22	4,09
	5,4 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	7,2 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
Guamo (<i>Inga sp</i>)	0 (g/L-1)	88	22	6,25	0	44	88	12,59
	1,8 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	3,6 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	5,4 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	7,2 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
Carbón (<i>Zygia longifolia</i>)	0 (g/L-1)	80	20	7,01	0	73	80	9,36
	1,8 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	3,6 (g/L-1)	0	100	2,00	0	0	0	0,02
	5,4 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
	7,2 (g/L-1)	0	100	0,00	0	0	0	0
Camu camu (<i>Myrciaria dubia</i>)	0 g/L-1	100	27	3,71	0	0	43	26,63
	1,8 g/L-1	71	40	2,70	0	0	26	19,05
	3,6 g/L-1	36	34	1,40	0	0	16	2,62
	5,4 g/L-1	11	89	0,51	0	0	8	2,62
	7,2 g/L-1	8	92	3,84	0	0	8	1,86

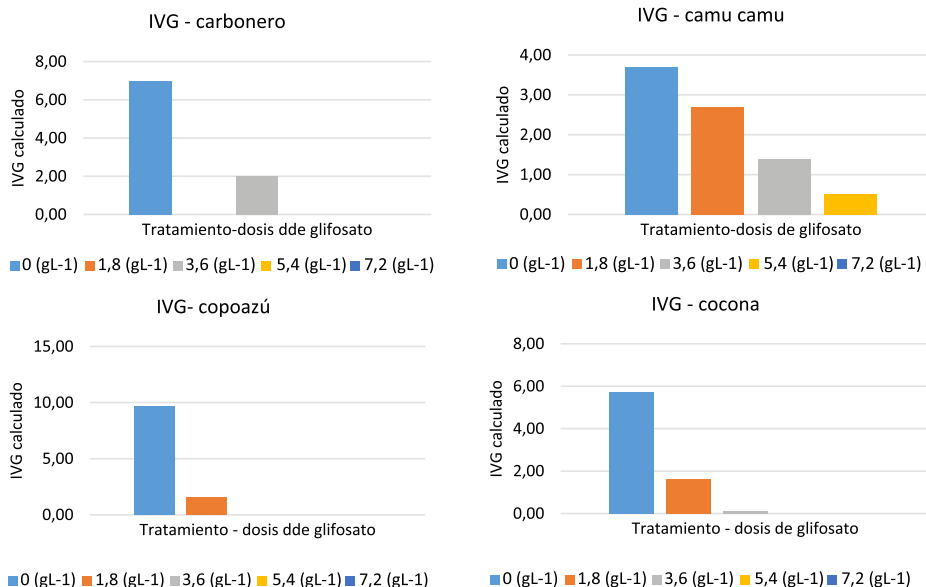
Especie	Tratamiento	% Germinación	% No germinación	IVG	N7D	N14D	N25D	TMG
Copoazú (<i>Teobroma grandiflorum</i> Schum)	0 g/L-1	100	24	9,67	20	76	100	12,34
	1,8 g/L-1	16	84	1,59	0	16	16	1,63
	3,6 g/L-1	10	90	0,00	0	10	10	0,98
	5,4 g/L-1	0	100	0,00	0	0	0	0
	7,2 g/L-1	0	100	0,00	0	0	0	0
Cocona (<i>Solanum sessiliflorum</i>)	1 g/L-1	92	8	5,72	0	29	92	15,18
	1,8 g/L-2	27	73	1,65	0	0	27	4,45
	3,6 g/L-2	2	98	0,11	0	0	2	0,38
	5,4 g/L-2	0	100	0,00	0	0	0	0
	7,2 g/L-2	0	100	0,00	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Índice de velocidad de germinación (IVG): de acuerdo con Maguire (1962), el índice de velocidad de germinación (IVG) evalúa la rapidez con la que las semillas de una determinada especie germinan a lo largo del tiempo. Un valor más alto en este índice indica una germinación más rápida y vigorosa (ver figura 5).

Figura 5. Representación gráfica de IVG calculado para seis especies vegetales estudiadas





Nota. Las figuras muestran la velocidad de germinación calculada para las seis especies estudiadas.

Sin tener en cuenta el efecto del glifosato, el orden de IVG encontrado son, en su orden, copoazú (9,67), carbón (7,1), guamo (6,25), cocona (5,72), camu camu (3,71) y bilibil (2,99). En conclusión, la más rápida para germinar es el copoazú y la más demorada es el bilibil. Las diferentes dosis estudiadas afectaron significativamente la velocidad de germinación.

Fuente: elaboración propia.

Tiempo medio de germinación (TMG): de acuerdo con Ellis y Roberts (1980), corresponde al tiempo promedio requerido para que las semillas germinen. Este indicador es muy utilizado en estudios de fisiología de semillas por cuanto permite comparar la velocidad de germinación entre diferentes especies, tratamientos pregerminativos o condiciones ambientales. Se usa como indicador del vigor germinativo de una semilla. Un valor bajo de TMG indica una germinación más rápida y agrupada en el tiempo (ver tabla 3).

Al respecto, el bilibil muestra una respuesta de estímulo a dosis bajas de glifosato. El tiempo que tardan las semillas en germinar se reduce a más de la mitad (de 10,95 a 5,65 días) con la primera dosis y continúa disminuyendo con la segunda. Este comportamiento sugiere que el estrés leve inducido por el herbicida desencadena una respuesta fisiológica que acelera la germinación. Sin embargo, este efecto positivo es de corta duración: a dosis más altas, el glifosato se vuelve completamente

tóxico, lo que inhibe la germinación por completo (TMG = 0). La especie es susceptible al glifosato, pero presenta una clara respuesta de hormesis que acelera la germinación a concentraciones bajas del herbicida.

Asimismo, existe una diferencia altamente significativa en el número de semillas de bilibil germinadas entre los diferentes tratamientos con glifosato (ver tabla 1).

De acuerdo con la prueba de Tukey (ver tabla 2):

Grupo a: el tratamiento control (T1) es significativamente superior a todos los demás.

Grupo b: los tratamientos T2 y T3 no son significativamente diferentes entre sí, pero ambos tuvieron una germinación sensiblemente menor que el control (T1) y especialmente mayor que las dosis más altas (T4 y T5).

Grupo c: los tratamientos T4 y T5 inhibieron por completo la germinación y no son diferentes entre sí. Su efecto es significativamente más fuerte que el de T2 y T3.

Esta especie demuestra ser extremadamente sensible al glifosato. Mientras que el testigo germina en un promedio de 12,59 días, la aplicación de la dosis más baja de glifosato fue suficiente para impedir totalmente la germinación (TMG = 0). No hay indicios de estimulación; por el contrario, el efecto es directamente letal. Esta especie no tolera el glifosato en ninguna de las concentraciones probadas más allá del control. En suma, es la especie más sensible al herbicida respecto a este estudio. Por lo demás, existe una clara relación dosis-respuesta: a medida que aumenta la concentración de glifosato, el número de plantas germinadas disminuye drásticamente.

En cuanto al guamo, existe una diferencia altamente significativa entre los tratamientos. El glifosato tiene un efecto drástico en la germinación del guamo. La prueba de Tukey muestra:

Grupo a: el tratamiento control (T1) es estadísticamente diferente y superior a todos los demás tratamientos que contenían glifosato.

Grupo b: los tratamientos T2, T3, T4 y T5 son estadísticamente indistinguibles entre sí, ya que todos resultaron en cero germinaciones.

En síntesis, la especie guamo es extremadamente susceptible al glifosato. El herbicida tiene un efecto inhibitorio total sobre la germinación de sus semillas ($p < 0,0001$). Mientras que el grupo control germinó con éxito (~88 % de germinación), la dosis más baja de glifosato probada (T2) fue suficiente para impedir por completo la germinación.

Debido a esta inhibición total, no es posible establecer diferencias entre las dosis de T2, T3, T4 y T5, ya que todas fueron igualmente letales para las semillas en las condiciones de este experimento (ver tabla 2).

De forma similar al guamo, el carbón también es muy sensible al glifosato. El testigo (T1) tardó 9,36 días en germinar. La primera dosis inhibió casi por completo la germinación (TMG = 0). El valor de 0,02 en el tercer tratamiento es interesante, pues sugiere que una semilla pudo haber germinado de manera extremadamente rápida, aunque es un valor tan bajo que podría considerarse casi nulo. En general, el comportamiento presentado es de una fuerte susceptibilidad al agroquímico desde la primera dosis.

Además, existe una diferencia estadísticamente muy significativa en la germinación de las semillas de carbón entre los tratamientos aplicados. La prueba de Tukey presenta dos grupos:

Grupo a: el tratamiento control (T1) es significativamente diferente y superior a todos los demás tratamientos con herbicida.

Grupo b: no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos T2, T3, T4 y T5. Aunque en el T3 hubo una germinación mínima (media de 0,5), esta no fue estadísticamente distinta del cero absoluto de los otros tratamientos. Todos ellos inhibieron la germinación de manera drástica. La especie carbón es altamente susceptible al glifosato: el herbicida causa una reducción drástica y estadísticamente significativa de la germinación ($p < 0,0001$). El tratamiento control (T1) permitió una germinación promedio de 18,75 plantas. Todos los tratamientos con glifosato (T2, T3, T4, T5) inhibieron la germinación casi por completo. La dosis más baja (T2) fue suficiente para reducir la germinación a cero, y las demás dosis mantuvieron este efecto. No hay diferencias prácticas ni estadísticas entre las distintas dosis de herbicida probadas, ya que todas fueron extremadamente efectivas.

Por su parte, el camu camu presenta la respuesta más compleja y única del grupo, conocida como hormesis. Este fenómeno se explica de la siguiente manera: con dosis bajas, la sustancia o el estrés tienen un efecto beneficioso o estimulante, pero con dosis altas tiene un efecto inhibitor o tóxico (Southam y Ehrlich, 1943). El control tiene un TMG muy alto (de 26,63 días). La primera dosis (19,05 días) parece acelerar ligeramente la germinación; sin embargo, el cambio drástico sucede en las siguientes dosis, donde el TMG disminuye a valores muy bajos (2,62 y 1,86 días). A diferencia de otras especies, ninguna de las dosis probadas logró inhibir por completo la germinación. Esta especie no solo tolera las dosis de glifosato aplicadas, sino que estas parecen romper barreras fisiológicas, acelerando drásticamente la germinación a concentraciones más altas. Es la especie más tolerante del estudio.

Por otro lado, los tratamientos con glifosato tienen un efecto estadísticamente muy significativo sobre el número de semillas de camu camu que germinan. El glifosato tiene un efecto inhibitor muy significativo en la germinación de esta especie ($p < 0,0001$).

La prueba de Tukey: el tratamiento control (T1) tuvo la mayor germinación y es significativamente diferente de todos los demás (grupo a). El tratamiento T2 es sustancialmente distinto tanto del control (T1) como de los tratamientos con dosis más altas (T3, T4, T5) (grupo b). El tratamiento T3 también es bastante diferente de todos los demás, ya que muestra un nivel de germinación intermedio (grupo c). Los tratamientos T4 y T5 no son estadísticamente diferentes entre sí (grupo d). Ambos representan el nivel más alto de inhibición, aunque no fue total.

La especie camu camu muestra una clara relación dosis-respuesta: a mayor concentración de herbicida, menor es el número de plantas germinadas. A diferencia de otras especies, como el guamo o el carbón, camu camu muestra una mayor tolerancia relativa, pues incluso las dosis más altas (T4 y T5) no lograron inhibir por completo la germinación.

La prueba de Tukey revela que casi cada nivel de tratamiento produjo un efecto significativamente diferente del anterior, lo que subraya la respuesta gradual de esta especie. Los tratamientos T4 y T5 fueron estadísticamente iguales en su efecto inhibitor.

El copoazú muestra una respuesta de hormesis muy marcada. El tiempo de germinación del testigo (12,34 días) se redujo drásticamente a solo 1,63 días con la primera dosis de glifosato, y aún más (0,98 días) con la segunda. Esto indica un fuerte efecto estimulante. Sin embargo, al igual que con el bilibil, este efecto se revierte a dosis más altas, las cuales finalmente resultan letales e impiden la germinación.

Según la prueba de Tukey, el tratamiento control (T1) es significativamente superior a todos los demás (grupo a). Los tratamientos T2 y T3 no son estadísticamente diferentes entre sí (grupo b). Ambos redujeron drásticamente la germinación en comparación con el control, pero aún permitieron que algunas semillas germinaran. Los tratamientos T4 y T5 son estadísticamente indistinguibles (grupo c). Ambos inhibieron por completo la germinación y son significativamente diferentes del grupo b.

Existe una clara relación dosis-respuesta, donde el aumento de la concentración del herbicida disminuye la viabilidad de las semillas. Las dosis correspondientes a los tratamientos T4 y T5 fueron letales, inhibiendo completamente la germinación. Las dosis más bajas (T2 y T3) redujeron severamente la germinación, pero no fueron estadísticamente diferentes entre sí. Esto sugiere que para copoazú, una vez que se supera un umbral mínimo, el efecto inhibitor es fuerte, culminando en la letalidad total en dosis más altas.

La cocona sigue un patrón de comportamiento similar al del copoazú y al bilibil. El TMG se reduce drásticamente de 15,18 días en el testigo a 4,45 días y luego a 0,38 días con las dosis crecientes de glifosato. Este es uno de los efectos de aceleración más pronunciados del estudio. Finalmente, las dosis más altas prueban ser letales al detener la germinación por completo. La especie presenta una fuerte aceleración en la velocidad de germinación bajo estrés generado por dosis bajas de glifosato, pero no sobrevive a concentraciones más elevadas del herbicida.

El efecto de los tratamientos con glifosato sobre la germinación de cocona es altamente significativo. El glifosato tiene un efecto inhibitor muy significativo en la germinación de las semillas de cocona ($p < 0,0001$).

La prueba de Tukey muestra que el tratamiento control (T1) es significativamente superior a todos los demás con la mayor tasa de germinación (grupo a). El tratamiento T2 tuvo una germinación significativamente menor que el control, pero

sustancialmente mayor que los tratamientos con dosis más altas (grupo b). Los tratamientos T3, T4 y T5 no son estadísticamente diferentes entre sí. Todos ellos inhibieron la germinación de forma drástica y casi total (grupo c).

Esta especie presenta una clara relación dosis-respuesta en la que el aumento de la concentración del herbicida resulta en una disminución progresiva y significativa de la germinación. El tratamiento T2 redujo la germinación a aproximadamente un tercio de la del control. A partir de la dosis del tratamiento T3, el efecto inhibitor es casi total. No se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos T3, T4 y T5, ya que todos fueron extremadamente efectivos en detener la germinación.

Efecto del glifosato en la emergencia

En la tabla 4 se presenta un consolidado de las variables estudiadas para la emergencia de plantas en sustrato de arena.

Tabla 4. Consolidado de indicadores para la emergencia en arena de seis especies agroforestales

Especie	Tratamiento	IVE	N7d	N25D	TME
Bilibil (<i>Guarea guidonia</i>)	0 (g/L-1)	2,98	0	82	11,18
	1,8 (g/L-1)	1,63	0	0	5,60
	3,6 (g/L-1)	1,21	0	0	4,04
	5,4 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
	7,2 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
Guamo (<i>Inga sp</i>)	0 (g/L-1)	7,07	0	88	9,79
	1,8 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
	3,6 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
	5,4 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
	7,2 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00

Especie	Tratamiento	IVE	N7d	N25D	TME
Carbón (<i>Zygia longifolia</i>)	0 (g/L-1)	6,15	0	45	12,83
	1,8 (g/L-1)	0,00	0	30	0,00
	3,6 (g/L-1)	0,00	0	15	0,00
	5,4 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
	7,2 (g/L-1)	0,00	0	0	0,00
Camu camu (<i>Myrciaria dubia</i>):	0 g/L-1	3,85	17	95	26,65
	1,8 g/L-1	2,83	0	0	18,64
	3,6 g/L-1	1,46	0	0	10,58
	5,4 g/L-1	0,00	0	0	0,00
	7,2 g/L-1	0,00	0	0	0,00
Copoazú (<i>Teobroma grandiflorum</i> Schum)	0 g/L-1	9,03	0	98	11,71
	1,8 g/L-1	0,00	0	28	0,00
	3,6 g/L-1	0,00	0	0	0,00
	5,4 g/L-1	0,00	0	0	0,00
	7,2 g/L-1	0,00	0	0	0,00
Cocona (<i>Solanum sessiliflorum</i>)	0 g/L-1	5,81	0	0	15,86
	1 g/L-1	1,77	0	0	4,44
	1,8 g/L-2	0,00	0	0	0,00
	3,6 g/L-2	0,00	0	0	0,00
	5,4 g/L-2	0,00	0	0	0,00
	7,2 g/L-2	0,00	0	0	0,00

Fuente: elaboración propia.

Cuando no está bajo el efecto del glifosato, la especie bilibil presenta un nivel de emergencia moderada, con un IVE de 2,98 y un tiempo medio de 11,18 días. Ninguna semilla germinó en los primeros siete días ($N7D = 0$), pero al final del ensayo habían germinado ochenta y dos ($N25D = 82$). El glifosato causa diversos efectos en esta especie: a dosis bajas ($1,8$ y $3,6 \text{ gL}^{-1}$), se observa un fenómeno de hormesis. El TME se reduce drásticamente (a $5,60$ y luego a $4,04$ días), lo que indica que la emergencia se vuelve mucho más rápida. Sin embargo, los valores de $N25D$ son 0 para estas mismas dosis, lo que crea una contradicción. Esto podría significar que, aunque algunas semillas iniciaron la emergencia rápidamente (lo que se refleja en el TME), no lograron desarrollarse en plántulas viables al día veinticinco. A partir de $5,4 \text{ gL}^{-1}$, la toxicidad es total. Todas las variables (IVE, $N25D$, TME) son 0 , indicando una inhibición completa de la emergencia de plantas.

Esta especie presenta una respuesta de hormesis (emergencia más rápida) a dosis bajas de glifosato, pero el herbicida impide el establecimiento final de las plántulas. Las dosis de $5,4 \text{ gL}^{-1}$ o superiores son completamente letales.

Por su parte, la especie guamo presenta la emergencia más vigorosa de todas las especies en condiciones normales con el IVE más alto ($7,07$). La emergencia es tardía ($N7D = 0$), pero alcanza un número muy alto de ochenta y ocho semillas al final sin la influencia del glifosato; sin embargo, bajo la influencia de este la respuesta es drástica e inmediata. La dosis más baja aplicada ($1,8 \text{ gL}^{-1}$) es suficiente para anular por completo la emergencia. Todos los indicadores (IVE, $N25D$, TME) caen a 0 y permanecen así en todas las dosis superiores. El guamo se comporta como una especie muy sensible al glifosato, pues no muestra ninguna tolerancia: la dosis más baja probada fue suficiente para inhibir totalmente la emergencia.

Entretanto, sin influencia del glifosato, las semillas de carbón presentan una buena vitalidad inicial, con un IVE de $6,15$, aunque es más lento para germinar (TME de $12,83$ días). Al final del ensayo lograron germinar cuarenta y cinco semillas. Con dosis de $1,8$ y $3,6 \text{ gL}^{-1}$ del herbicida, el IVE y el TME son 0 , lo que sugiere una inhibición del vigor. Sin embargo, el $N25D$ muestra que algunas semillas sí logran germinar (treinta y quince respectivamente). Esto indica que la emergencia que ocurre es tan pobre, tardía o desuniforme que no se registra como vigorosa en el cálculo del IVE y TME. A partir de dosis de glifosato de $5,4 \text{ gL}^{-1}$, la inhibición es total y definitiva, con cero semillas germinadas. En definitiva, las semillas de esta especie son muy sensibles al glifosato. Aunque no se inhibe totalmente con la primera dosis, el vigor

de la emergencia disminuye a cero. La capacidad de emergencia decrece de forma gradual hasta ser eliminada por completo con dosis de $5,4 \text{ g/L}^{-1}$.

Ahora, el camu camu presenta las semillas más resilientes de las estudiadas. Sin glifosato, la especie presenta una emergencia muy lenta (TME de 26,65 días), pero es la única especie que muestra emergencia temprana ($N7D = 17$). Al final, germinaron noventa y cinco semillas. Bajo la influencia del glifosato presenta una clara respuesta de hormesis que acelera la emergencia. Con $1,8$ y $3,6 \text{ g/L}^{-1}$, el TME se reduce significativamente (a 18,64 y luego a 10,58 días). El glifosato parece romper la latencia y acelerar el proceso. Al igual que con el bilibil, el valor de $N25D = 0$ contradice los otros indicadores, lo que da pie para afirmar que las plántulas no sobrevivieron hasta el final del conteo. A partir de $5,4 \text{ g/L}^{-1}$, la toxicidad del herbicida supera el efecto estimulante y la emergencia es afectada por completo. Es una especie de emergencia lenta estimulada por dosis bajas de glifosato; no obstante, esta estimulación no garantiza la supervivencia de las plántulas. Dosis altas ($\geq 5,4 \text{ g/L}^{-1}$) son letales.

En condiciones sin glifosato, el copoazú demuestra un potencial germinativo sobresaliente, registrando el índice de velocidad de emergencia (IVE) más alto del estudio (9,03) y un elevado número de semillas germinadas ($N25D = 98$). Aun así, la especie exhibe una pronunciada sensibilidad al herbicida, con una respuesta similar a la del carbón. La aplicación de la dosis más baja ($1,8 \text{ g/L}^{-1}$) es suficiente para anular completamente el vigor germinativo (IVE y TME caen a cero). A pesar de esta drástica pérdida de vigor, un número residual de veintiocho semillas logra germinar, lo que indica que la inhibición no es absoluta, pero sí severa en términos de calidad y velocidad. A partir de una concentración de $3,6 \text{ g/L}^{-1}$, la toxicidad es total, de manera que la germinación se impide por completo. Pese a su excelente viabilidad inicial, el copoazú resulta ser muy vulnerable al glifosato, ya que dosis bajas suprimen el vigor de la emergencia y dosis medias la inhiben por completo.

Sin el efecto del glifosato, la cocona presenta una muy buena viabilidad inicial. La presencia de glifosato desde el tratamiento inicial permite una emergencia con un IVE de 5,81, pero un TME lento de 15,86 días. Asimismo, se observa un fuerte efecto de hormesis. Al pasar de 1 a $1,8 \text{ g/L}^{-1}$, el TME se reduce drásticamente a 4,44 días. En esta concentración, el glifosato acelera fuertemente la emergencia; a partir de $3,6 \text{ g/L}^{-1}$, la toxicidad es total y la emergencia se detiene por completo, pero muestra una fuerte aceleración de la emergencia al aumentar la dosis de 1 a $1,8 \text{ g/L}^{-1}$. Es una

especie que responde positivamente a un nivel de estrés bajo, pero que es inhibida completamente por dosis de 3,6 g/L-1 o superiores.

Los resultados demuestran que el glifosato ejerce una influencia significativa y dosis-dependiente sobre la germinación y emergencia de semillas en especies agroforestales del bosque húmedo tropical de Caquetá, Colombia. Este hallazgo coincide con investigaciones previas que reportan efectos fitotóxicos del herbicida sobre procesos fisiológicos clave en especies agrícolas y forestales (Ávila et al., 2020; Bonfleur et al., 2015; Zobiole et al., 2012).

La disminución observada en la germinación y emergencia podría estar relacionada con la capacidad del glifosato para interferir con la absorción de agua necesaria para estos procesos (Ávila et al., 2020). Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar los efectos no intencionados del glifosato en especies vegetales no objetivo, especialmente en contextos de conservación forestal (Brüggen et al., 2021).

De igual forma, el glifosato altera fisiológicamente la germinación y viabilidad de las semillas. El efecto de este herbicida sobre la germinación y emergencia (viabilidad) de las semillas no es un evento único, sino el resultado de una cascada de fallos fisiológicos.

Como explicaron Duke (2018) y Dayan et al. (2015), dentro de las células de las semillas ocurre la inhibición de la ruta del siquimato, provocando un colapso metabólico general.

Por otro lado, Cakmak et al. (2009) demostraron que, por su efecto quelante, el glifosato inmoviliza micronutrientes vitales como el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), siendo un efecto devastador para la viabilidad de la semilla, incluso en plantas resistentes. El manganeso es crucial para la germinación, ya que las enzimas clave para la respiración inicial y la defensa contra el estrés oxidativo durante la germinación no funcionarán correctamente, lo que se traduce en una menor tasa de germinación y plántulas más débiles. El hierro es esencial para la respiración, puesto que es un componente de los citocromos en la cadena de transporte de electrones. La germinación es un proceso que consume una enorme cantidad de energía, la cual se obtiene a través de la respiración; por lo tanto, una semilla con deficiencia de Fe no podrá sostener la tasa respiratoria necesaria para emerger y establecerse. El trabajo de Cakmak et al. (2009) demostró que esta deficiencia

se concentra en los órganos reproductivos, lo que significa que el glifosato ataca directamente la calidad nutricional y la viabilidad de la semilla.

De acuerdo con los reportes de Ahsan et al. (2008) y Yarmolinsky et al. (2014), se sabe que el glifosato induce daño por estrés oxidativo al embrión, representado por una producción masiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) y activa la muerte celular programada (MCP). Este ambiente tóxico promueve la muerte del embrión en desarrollo. Las ROS son moléculas altamente reactivas que pueden difundirse y dañar el ADN, los lípidos y las proteínas del embrión y el endospermo. Un embrión con su material genético dañado o con sus reservas lipídicas oxidadas (enranciamiento) simplemente no será viable.

El glifosato promueve la activación prematura de MCP, por lo que es posible que las señales de estrés sistémico alcancen los tejidos de la semilla y, en consecuencia, puede inducir procesos de MCP en el embrión, llevándolo a la muerte antes de que la semilla alcance la madurez.

Además, este herbicida compromete la viabilidad de las semillas a través de una triple amenaza fisiológica: (1) “mata” de hambre a la semilla al cortar el suministro de proteínas, carbohidratos y hormonas desde una planta madre metabólicamente colapsada (Duke et al., 2018); (2) causa una deficiencia nutricional crítica al secuestrar micronutrientes metálicos esenciales para la germinación y el vigor, como el manganeso (Cakmak et al., 2009) y (3) envenena al embrión a través de un ambiente de estrés oxidativo sistémico que daña sus componentes celulares vitales (Ahsan y Yarmolinsky, 2018).

La inhibición de la germinación observada puede explicarse por la interrupción de la vía del siquimato, una ruta metabólica esencial para la síntesis de aminoácidos aromáticos como fenilalanina, tirosina y triptófano (Steinrücken y Amrhein, 1980). Esta interrupción compromete la formación de proteínas estructurales, hormonas vegetales (auxinas) y compuestos fenólicos de defensa, lo que reduce el vigor de la semilla y su capacidad de establecerse en campo (Dayan et al., 2015; Cakmak et al., 2009).

Adicionalmente, el glifosato que permanece en los tejidos de la planta actúa como un quelante al inmovilizar micronutrientes como el manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn). La planta madre no puede translocar estos nutrientes esenciales a la

semilla en desarrollo y, en consecuencia, produce semillas con deficiencia congénita de magnesio y de zinc. Así mismo, la deficiencia de zinc (Zn) genera baja síntesis de auxinas, por lo que una semilla deficiente en Zn producirá una plántula con problemas de crecimiento en la raíz y el tallo (Cakmak et al., 2009).

Ahora, Ahsan et al. (2008) sugieren que la planta afectada (incluyendo las semillas) por glifosato padece un estrés oxidativo crónico con altos niveles de ROS (especies reactivas de oxígeno). El principal peligro es la oxidación de ácidos grasos de la semilla: los aceites de reserva de la semilla se enrancian, perdiendo su valor energético y volviéndose tóxicos para el embrión. Como resultado, la semilla se vuelve inviable desde adentro.

La presencia de efectos estimulantes con dosis bajas en especies como camu camu, cocona y bilibil sugiere una respuesta de tipo hormética (Southam y Ehrlich, 1943), donde el estrés subletal puede activar mecanismos fisiológicos que aceleran la germinación. Sin embargo, este efecto es transitorio y no garantiza la viabilidad final de la plántula, como lo evidencian los resultados en emergencia.

Las semillas afectadas por dosis subletales de glifosato parecen normales; no obstante, aunque logren germinar, la plántula termina por morir. Cuando inician la germinación, la falta de energía, las escasas reservas de lípidos y almidones se agotan antes de que la plántula pueda establecerse y hacer fotosíntesis. Las células no funcionan bien, la falta de Mn y Fe impide que las enzimas de la respiración y el metabolismo funcionen eficientemente. Son vulnerables, no tienen las reservas adecuadas y con un sistema de crecimiento debilitado, incluso si logran germinar, están programadas para morir.

A mayor dosis, mayor es la afectación fisiológica de la semilla, hasta el punto de que la viabilidad es nula. Yarmolinsky et al. (2014) describen que, a altas dosis de glifosato, el estrés oxidativo es tan masivo que activa la muerte celular programada (MCP) en toda la planta, y el embrión se vuelve extremadamente sensible a estas señales de muerte. El programa de autodestrucción celular se activa también en el embrión, matándolo directamente dentro de la semilla aún en formación.

Sobre esto, Yarmolinsky et al. (2014) demuestran que la muerte de la planta no es simplemente por carencia de aminoácidos o por un daño caótico, sino que el desequilibrio metabólico inducido por el glifosato genera una señal de estrés oxi-

dativo tan intensa que activa un programa de autodestrucción latente al interior de la propia célula, que es ejecutado ordenadamente por su propia maquinaria enzimática.

Especies como el guamo y el carbón exhibieron una alta sensibilidad al herbicida con inhibición total desde concentraciones mínimas. Este comportamiento indica una baja tolerancia metabólica al glifosato y podría atribuirse a diferencias en la permeabilidad tegumentaria, composición de reservas internas o capacidad antioxidante inherente.

Efectos sobre la conductividad eléctrica

A pesar de que no se observaron cambios en la conductividad eléctrica, esta variable podría no reflejar los daños internos sufridos por las semillas. La ausencia de efecto aparente sugiere que el glifosato afecta funciones metabólicas sin alterar inmediatamente la permeabilidad celular, lo cual ha sido documentado en estudios similares (Bonfleur et al., 2015).

Aunque el glifosato no afectó la conductividad eléctrica de las soluciones con semillas tratadas, sí se observó una disminución en la viabilidad y el vigor de estas, lo que sugiere un efecto tóxico acumulativo dentro de las semillas (Bonfleur et al., 2015).

Por lo tanto, una semilla afectada por glifosato es, fisiológicamente, una semilla malformada, desnutrida y potencialmente dañada con una probabilidad mucho menor de germinar y producir una plántula sana.

Estos hallazgos tienen implicaciones técnicas, ecológicas y socioeconómicas relevantes para la región amazónica. Desde el punto de vista técnico, permiten identificar especies con mayor resiliencia para ser utilizadas en programas de restauración ecológica y sistemas agroforestales sostenibles. En el plano económico, contribuyen a la selección eficiente de especies aptas para viveros, reduciendo pérdidas por germinación deficiente. Desde una perspectiva ambiental, enfatizan la necesidad de regular el uso de herbicidas en zonas de alta biodiversidad para evitar la deriva de productos químicos hacia vegetación no objetivo.

Por último, el estudio aporta evidencia original sobre especies poco investigadas en el contexto de la Amazonía colombiana y destaca la importancia de continuar la exploración de los efectos subletales del glifosato, incluido su metabolito AMPA, que prolonga la toxicidad en sistemas vegetales (Gomes et al., 2014). La diferenciación entre respuestas específicas por especie debe considerarse en futuros protocolos de manejo agroecológico y conservación.

Conclusiones

- El glifosato genera efectos fitotóxicos significativos sobre la calidad fisiológica de semillas agroforestales nativas del bosque húmedo tropical de Caquetá, evidenciando una respuesta dosis-dependiente. A medida que aumenta la concentración del herbicida ($1,8\text{--}7,2\text{ g/L}^{-1}$), se observa una reducción progresiva en la germinación y emergencia, lo que compromete la viabilidad de las plántulas.
- Entre las especies evaluadas, el guamo, el carbón, el copoazú y la cocona mostraron elevada sensibilidad al herbicida con inhibición casi total de la germinación desde las primeras dosis. En contraste, especies frutales amazónicas como camu camu y bilibil presentaron mayor tolerancia relativa, manteniendo niveles de germinación y emergencia aún en concentraciones elevadas.
- Las variables fisiológicas más afectadas fueron el índice de velocidad de emergencia (IVE), el tiempo medio de emergencia (TME) y las tasas acumuladas de emergencia a 7 y 25 días (N7D y N25D), especialmente bajo condiciones de siembra en sustrato de arena.
- Si bien no se detectaron alteraciones en la conductividad eléctrica, los resultados sugieren que el glifosato provoca desórdenes internos que interfieren con los procesos metabólicos de establecimiento inicial.
- Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar los efectos no intencionados del glifosato sobre especies vegetales no objetivo, particularmente en regiones de alta biodiversidad como la Amazonia colombiana.

La identificación de especies con mayor resiliencia constituye un aporte estratégico para programas de restauración, conservación y diseño de sistemas agroforestales sostenibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a la Escuela ECAPMA y al programa de Agronomía.

Financiamiento

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por la financiación del presente trabajo a través de la convocatoria 11 cohorte 2 para la conformación del banco de proyectos de investigación formulados por los semilleros de investigación, avalados por la UNAD 2022, código del proyecto PS14102ECAPMA 2023.

Uso de inteligencia artificial

Se utilizó Google IA Store para afinar la redacción de términos y algunos párrafos del presente trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Referencias

- Ahsan, N., Lee, D. G., Lee, S. H., Kang, K. Y., Lee, J. J. y Lee, B. H. (2008). Glyphosate-induced oxidative stress in rice leaves revealed by proteomic analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(12), 1062-1070. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.09.005>
- Alvarado, V., Bermúdez, T., Romero, M. y Piedra, L. (2011). Selección de plantas para el control de la erosión hídrica en Costa Rica mediante la metodología de criterio de expertos. *Recursos Naturales y Ambiente*, 63(63), 41-46.
- Ávila, J., de Cardoso, F. B., de Lima, S. F., Barzotto, G. R. y Zanella, M. S. (2020). The presence of glyphosate can harm the germination of bean seeds treated with biostimulant. *Bioscience Journal*, 36(1), 122-132. <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n1a2020-42441>.
- Barrera, J. A., Hernández, M. S. y Melgarejo, L. M. (2011). *Estudios ecofisiológicos en la Amazonia colombiana 2. Cocona (Solanum sessiliflorum Dunal)*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi).
- Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, Á., Sarmiento, H. y Gutiérrez, M. (2017). *Nombres Comunes de las Plantas de Colombia*. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/>
- Bonfleur, E. J., Valdemar, L. T., Borges, B., Regitano, J. y Lavorenti, A. (2015). The effects of glyphosate and atrazine mixture on soil microbial population and subsequent impacts on their fate in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2482-1>
- Brüggen, A. H. C., Finckh, M. R., Ritsema, C. J., Harkes, P., Knuth, D. y Geissen, V. (2021). Indirect effects of the herbicide glyphosate on plant, animal, and human health through its effects on microbial communities. *Frontiers in Environmental Science*, 9.

- Cakmak, I., Yazici, A., Tutus, Y. y Ozturk, L. (2009). Glyphosate inhibited seed and pollen viability in glyphosate-resistant soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(11), 4821-4826.
- Dayan, F. E., Duke, S. O., Grossmann, J. y Lermer, U. (2015). Are plants losing the battle against glyphosate? *Outlooks on Pest Management*, 26(5), 227-232. https://doi.org/10.1564/v26_oct_02
- Duke, S. O. (2018). The history and current status of glyphosate. *Pest Management Science*, 74(5), 1032-1039. <https://doi.org/10.1002/ps.4652>
- Duke, S. O. y Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319-325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- Ellis, R. H. y Roberts, E. H. (1980). Towards a rational basis for testing seed quality. En P. D. Hebblethwaite (Ed.), *Seed Production* (pp. 605-635). Butterworths.
- Gomes, M. P., Smedbol, É., Chalifour, A., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lepage, L. y Juneau, P. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: An overview. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 37(3), 1141-1150. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.02.010>
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas [Sinchi]. (2008). *Herbario Amazónico Colombiano (COAH): Registro de especies en Colombia*. <https://sinchi.org.co/coah>
- León, J. (1987). *Botánica de los cultivos tropicales*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Orcaray, L., Igal, M., Zabalza, A. y Royuela, M. (2010). Physiological and biochemical effects of glyphosate on two contrasted *Lolium* spp. biotypes. *Pest Management Science*, 66(3), 314-323.
- Peters, C. M. y Vásquez, A. (1987). Estudios ecológicos de camu-camu (*Myrciaria dubia*): I. Producción de frutos en poblaciones naturales. *Acta Amazónica*, 16(17), 161-171. <https://www.scielo.br/j/aa/a/FxMSdwNNDjNd54cQsLnLGXn/?format=pdf>

- Pinedo, M. P. y Armas, R. M. (2007). El camu-camu y sus usos populares como planta medicinal. *LEISA Revista de Agroecología*, 23(3), 22-29. https://www.iiap.gob.pe/Archivos/Publicaciones/Publicacion_1626.pdf
- Ranal, M. A. y Santana, D. G. (2006). How and why to measure the germination process? *Revista Brasileira de Botânica*, 29(1), 1-11. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100001>
- Romero Hernández, C. (2018). El género *Zygia* P. Browne (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) en Colombia: análisis de distribución y clave actualizada para su identificación. *Biota Colombiana*, 18(2), 89-111. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n02a06>
- Southam, C. M. y Ehrlich, J. (1943). Effects of extracts of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. *Phytopathology*, 33(6), 517-524.
- Steinrücken, H. C. y Amrhein, N. (1980). The herbicide glyphosate is a potent inhibitor of 5-enolpyruvylshikimic acid-3-phosphate synthase. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 94(4), 1207-1212. [https://doi.org/10.1016/0006-291X\(80\)90639-0](https://doi.org/10.1016/0006-291X(80)90639-0)
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Yarmolinsky, D., Shtein, I. y Gepstein, S. (2014). Glyphosate-induced cell death in the tobacco BY-2 cell culture requires ROS and is stress-responsive and caspase-like-dependent. *Planta*, 239.
- Zar, J. H. (1999). *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall.
- Zobiole, L. H. S., Kremer, R. J., Oliveira, R. S. y Constantin, J. (2012). Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and iron-deficiency-like symptoms in glyphosate-resistant soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(35), 8815-8822.
-



Caracterización edafológica y sistemas de manejo diferencial en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en los municipios de Casabianca y Herveo, departamento del Tolima, Colombia

Resumen

La caracterización de suelos es una herramienta fundamental para entender las condiciones agroecológicas que inciden en la productividad agrícola. En lo que respecta al cultivo del plátano, su respuesta agronómica depende en gran parte de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Sin embargo, existen vacíos de conocimiento sobre las diferencias de las variables edafológicas en zonas productoras de diferentes alturas y condiciones de manejo de municipios andinos del centro de Colombia. En esta investigación se estudiaron las características edafológicas de quince fincas productoras de plátano ubicadas en los municipios de Casabianca y Herveo, Tolima, con el propósito de reconocer patrones y proponer estrategias de manejo individualizadas para contribuir con la sostenibilidad productiva. Se empleó un método de estudio mixto que consistió en trabajo de terreno, análisis morfológico del perfil del suelo, toma y procesamiento de muestras mediante técnicas de laboratorio normalizadas y análisis estadístico comparativo. Cada una de las variables —pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico y compactación del suelo— fueron evaluadas. Los análisis dieron cuenta de suelos con acidez media, media fertilidad y fluctuaciones importantes en fósforo y materia orgánica entre y dentro de los municipios y con el nivel de altitud. Se determinaron distintos patrones, como mayor contenido de materia orgánica en Casabianca y mejores condiciones de capacidad de intercambio catiónico en Herveo. Estas discrepancias permiten la recomendación de soluciones para el manejo ajustadas al ámbito local; p. ej., la aplicación de enmiendas orgánicas, prácticas agroecoló-

gicas y ajustes en el uso de nutrientes. La discusión técnica permitió poner en paralelo los resultados con estudios anteriores en los suelos andino-volcánicos de la región y los resultados detallan la importancia de una planificación territorial basada en el conocimiento edafológico. Se concluye que la descripción integral del suelo facilita la toma de decisiones bien fundamentadas para la práctica de la producción de plátano de manera óptima y el fomento de prácticas sostenibles acordes con el medio ambiente edafoclimático local.

Palabras clave: agricultura sostenible, compactación, fertilidad, georreferenciación, nitrógeno, plaguicidas, tipología de suelos.

Abstract

Soil characterization is a fundamental tool for understanding the agroecological conditions that affect agricultural productivity. In plantain cultivation, its agronomic response largely depends on the physical and chemical properties of the soil. There are also knowledge gaps regarding the differences in edaphological variables in production areas located at different altitudes and under various management conditions in Andean municipalities in central Colombia. This research investigated the edaphological characteristics of 15 plantain-producing farms located in the municipalities of Casabianca and Herveo, Tolima, with the purpose of identifying patterns and proposing individualized management strategies to support sustainable productivity. A mixed-method approach was used, which included fieldwork, morphological analysis of the soil profile, sampling and processing through standardized laboratory techniques, and comparative statistical analysis. Each variable —such as pH, organic matter, total nitrogen, phosphorus, potassium, cation exchange capacity, and soil compaction— was evaluated. The analysis revealed soils with moderate acidity, medium fertility, and significant fluctuations in phosphorus and organic matter both between and within the municipalities and across altitudinal levels. Distinct patterns were identified, such as higher organic matter content in Casabianca and better cation exchange capacity conditions in Herveo. These discrepancies suggest management solutions tailored to the local context, such as the application of organic amendments, agroecological practices, and nutrient use adjustments. The technical discussion compared the results with previous studies on the Andean-volcanic soils of the region and highlighted the importance of territorial planning based on edaphological knowledge. It is concluded that comprehensive soil description facilitates well-informed decision-making for optimal plantain production and the promotion of sustainable practices aligned with the local edaphoclimatic environment.

Keywords: compaction, fertility, georeferencing, nitrogen, pesticides, soil classification, sustainable agriculture.

Introducción

Entre el 2021 y el 2023 el cultivo del plátano (*Musa paradisiaca*) fue muy importante para la agricultura colombiana; en el 2021, el área cultivada fue de 853 860 ha, mientras que para el 2023 fue de 438 052 ha, con una producción en toneladas de 8 390 864 y 4 614 186 respectivamente (Observatorio de Información Rural y Agropecuaria [Agronet], 2025). Según la descripción de la cadena del plátano, elaborada por la Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales del Ministerio de Agricultura, en marzo del 2020 el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca*) en Colombia se produjo en los treinta y dos departamentos y en setecientos ochenta y seis municipios, promovido por doscientas trece mil novecientas cincuenta familias, con un promedio de 3,5 ha por productor, lo que creó novecientos sesenta mil puestos de trabajo directos e indirectos, siendo este el producto agrícola más cultivado en la nación. De igual manera, se proyecta que tanto la producción como las zonas plantadas de plátano excedan las 4 805 629 t producidas en 536 443 ha cosechadas de este cultivo, con un rendimiento de 10,71 t/ha.

Asimismo, la producción de plátano es una industria agrícola importante a escala global: naciones como Ecuador, Colombia, Costa Rica y Filipinas son destacados exportadores, al tiempo que regiones de Asia y África también poseen una producción significativa, siendo esta industria de gran relevancia para garantizar la seguridad alimentaria en varias regiones (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023; López et al., 2019).

La edafología y fertilidad de los suelos en los cultivos de plátano presentan gran importancia en cuanto a su estudio y manejo. Uno de los principales motivos de la baja productividad de los terrenos dedicados al cultivo del plátano es el uso indebido, gestión y preparación inadecuada de los suelos, lo que genera un rápido deterioro en las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos que, a su vez, ocasiona pérdidas de tipo financiero en los agricultores debido a la baja productividad, además de la degradación del entorno natural (Romero y Gutiérrez, 2010; Barreto y Montenegro, 2017).

En el departamento del Tolima existen diversas áreas de cultivo del plátano. En este documento se detallan los resultados puntuales de predios cultivados; así

mismo, se establece que la producción agrícola se relaciona con elementos bióticos y abióticos, siendo la fertilización uno de los factores más determinantes, pues las plantas necesitan de elementos nutritivos necesarios para finalizar su ciclo biológico (Cortés y Rodríguez, 2022).

En los municipios de Casabianca y Herveo de este departamento, los suelos tienen un origen volcánico debido a la presencia del volcán Cerro Bravo, cercano a la región. Estos suelos se forman a partir de materiales volcánicos, entre los que se encuentran cenizas y rocas volcánicas que, al pasar por los procesos de meteorización, liberan nutrientes esenciales para la fertilidad (FAO, 2020; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2021).

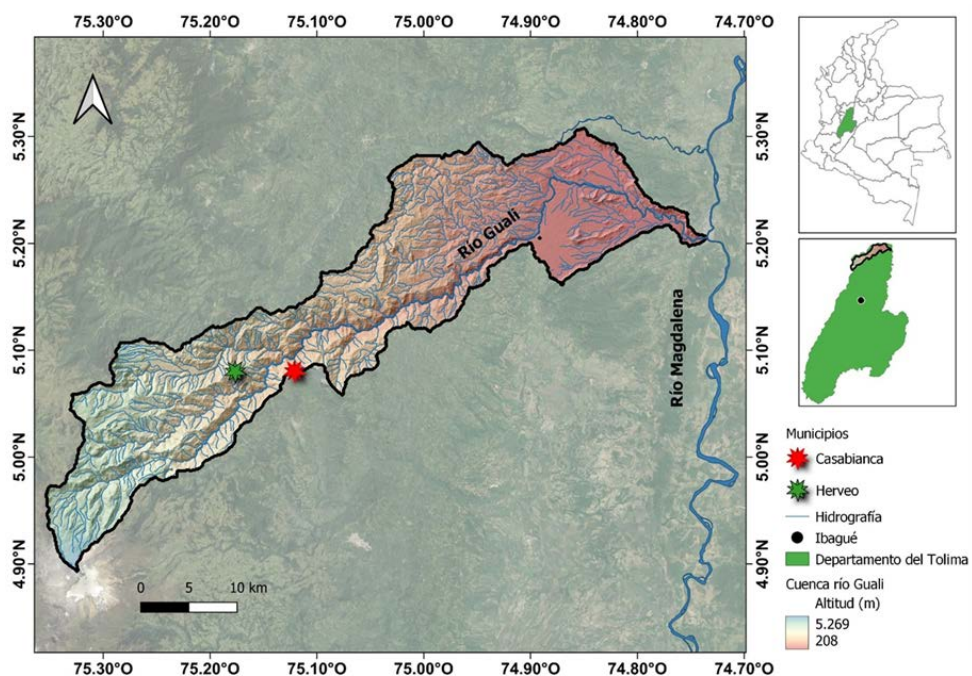
Por ende, la finalidad de esta investigación consistió en realizar la caracterización edafológica y de fertilidad en los suelos dedicados al cultivo del plátano en quince predios muestreados de los municipios de Casabianca y Herveo en el norte del departamento del Tolima.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en los municipios de Herveo y Casabianca, departamento del Tolima, Colombia, en la cuenca hidrográfica del río Gualí (ver figura 1).

Figura 1. Área de estudio mostrando los municipios de Herveo y Casabianca, departamento del Tolima dentro de la cuenca del río Gualí



Fuente: elaboración propia.

Para desarrollar la caracterización de los suelos de forma sistemática y científica, se emplearon materiales y herramientas para cada etapa del proceso. Los materiales fueron muy necesarios para ejecutar correctamente las actividades, como selección de predios, determinación de perfil de suelo, medidas de pendiente, toma de muestras, georreferenciación y medición de compactación de suelo (ver tabla 1).

Tabla 1. *Resumen de materiales utilizados en el estudio*

Actividad	Material
Selección de predios	• Formato establecido para consignar la información. • Tabla. • Lápiz – lapicero.
Excavación de la calicata	• Pala o palín. • Balde. • Guantes de carnaza. • Botas de caucho.
Medición de pendiente	• Agronivel o Nivel “A”.
Toma de muestras	• Pala o palín. • Balde. • Guantes de carnaza. • Guantes de látex. • Bolsas plásticas con cierre. • Etiquetas.
Georreferenciación	• GPS Mobile Mapper 50 con <i>software</i> Spectra Precision.
Medición de la compactación	• Penetrómetro digital (<i>Penetrologger Eijkelkamp</i>) con GPS y sonda de humedad de suelos).

Fuente: elaboración propia.

La caracterización de suelos es un proceso técnico-científico que permite comprender las propiedades físicas, químicas y morfológicas del recurso edáfico, fundamentales para el uso adecuado y sostenible del cultivo de plátano, la planificación agrícola y la toma de decisiones informadas en proyectos productivos o de conservación. En este estudio, se aplicó una metodología integrada basada en estándares internacionales (FAO, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos —USDA—) y lineamientos nacionales (IGAC) con el fin de garantizar resultados confiables, reproducibles y contextualizados al área de estudio.

El enfoque metodológico se fundamentó en la observación directa del perfil del suelo mediante calicatas estratégicamente distribuidas, complementado con muestreo para análisis de laboratorio y medición de la compactación.

En los procesos se incluyeron las siguientes etapas clave:

- Selección de quince predios productores de plátano por municipio.
- Excavación de una calicata, en la cual se hizo el reconocimiento fisiográfico y la descripción morfológica de horizontes (tamaño, color, textura, profundidad, entre otros) y serie de suelos.
- Medición de la pendiente.
- Toma de muestras representativas haciendo uso de un barreno, tomando de quince a veinte submuestras a una profundidad entre 0 y 20 cm. Las submuestras individuales de un área fueron mezcladas y se obtuvo una muestra compuesta de 500 g debidamente etiquetada, así como su respectiva evaluación analítica en laboratorio certificado (Agrosoli Lab).
- Incorporación de herramientas de georreferenciación mediante el uso de un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) (GPS Mobile Mapper 50 con *software* Spectra Precision).
- Clasificación textural y química para interpretar los resultados de los análisis de suelos. Se determinaron parámetros con sus correspondientes métodos analíticos: pH por suspensión. Ac. 1:1 - potenciométrico, materia orgánica por Walkley-Black; CIC por NH_4OAc - pH 7, conductividad eléctrica (CE) por pasta saturación - electrométrico, fósforo (P) por Bray-Kurtz II - espectrofotométrico, calcio (Ca) por NH_4OAc -absorción atómica; magnesio (Mg) por NH_4OAc -absorción atómica, sodio (Na) por NH_4OAc -absorción atómica, potasio (K) por NH_4OAc -absorción atómica, hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) por método doble ácido - absorción atómica, boro (B) y azufre (S) por fosfato monocálcico - turbidimétrico y aluminio (Al) por KCl - volumétrico.

- Recopilación de información correspondiente al histórico de manejo de suelos.
- Medición de la compactación del suelo mediante un penetrómetro digital (*Penetrologger Eijkelkamp* con GPS y sonda de humedad de suelos).

La metodología aplicada no solo buscó identificar limitaciones y potencialidades del suelo, sino también brindar soporte técnico para formular recomendaciones agronómicas, ambientales o de manejo integral. En este sentido, el análisis del suelo se convirtió en un insumo estratégico para idear un adecuado proceso de fertilización y nutrición, fortalecimiento de la productividad, mitigación de riesgos, promoción del uso racional de los recursos naturales del territorio, obras de mitigación de la erosión construidas con materiales de la zona, entre otros.

Resultados y discusión

Los estudios de suelos se desarrollaron en el marco del proyecto de investigación *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano* con el propósito de caracterizar las condiciones edafológicas de predios dedicados al cultivo de plátano (*Musa paradisiaca*) en los municipios de Casabianca y Herveo, Tolima, Colombia. El análisis se orientó a evaluar atributos físicos, químicos y de compactación del suelo con énfasis en variables como altitud, pendiente, pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y compactación superficial por ser determinantes en la productividad del cultivo y en la sostenibilidad del sistema agrícola.

La caracterización se realizó mediante una estrategia integrada de trabajo de campo, análisis de laboratorio y procesamiento técnico de la información. En campo, se efectuó la georreferenciación de los predios mediante GPS Mobile Mapper 50 con *software* Spectra Precision; la determinación de pendiente con agronivel artesanal y la observación del perfil del suelo a través de calicatas con profundidades entre 0,6 y 1,0 m. El muestreo se desarrolló en *zigzag*, recolectando submuestras entre 0 y 20 cm de profundidad, las cuales fueron posteriormente homogenizadas y

remitidas a laboratorio. Las determinaciones analíticas se efectuaron conforme a métodos estandarizados del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y a normas técnicas vigentes con el fin de garantizar consistencia en la evaluación de las propiedades del suelo.

De esta forma, la integración de la información obtenida permitió construir una base técnica robusta para interpretar las condiciones edáficas de los predios evaluados y establecer relaciones entre fertilidad, compactación, manejo y aptitud productiva. Este abordaje propició el reconocimiento de diferencias entre los sistemas de producción de ambos municipios, identificación de limitaciones asociadas al estado físico y químico del suelo y, al mismo tiempo, evidenció oportunidades de intervención orientadas al mejoramiento del manejo agronómico. En este sentido, los resultados no solo aportan al diagnóstico de la calidad del suelo en sistemas plataneros del norte del Tolima, sino que también constituyen un insumo técnico relevante para la formulación de recomendaciones enfocadas en la sostenibilidad productiva, la conservación del recurso suelo y la toma de decisiones en procesos de innovación rural.

La tabla 2 presenta el resumen comparativo de las propiedades edáficas más relevantes para el cultivo de plátano en los municipios de Casabianca y Herveo, así como por rango altitudinal. Los resultados evidencian que los valores de pH oscilan entre 5,68 y 5,75 en Casabianca y alrededor de 5,7 en Herveo, lo que indica una condición de acidez moderada en todos los casos. Este comportamiento sugiere un ambiente químico compatible con el cultivo en la medida en que puede favorecer la disponibilidad de macro y micronutrientes esenciales, tal como ha sido reportado en estudios previos (Vargas et al., 2015; Gómez et al., 2021). De manera complementaria, el contenido de materia orgánica (MO) se mantuvo cercano al 4 % en ambos municipios y altitudes, al igual que el nitrógeno total, con valores próximos a 0,16 %, lo que en conjunto sugiere una condición de fertilidad intermedia. Estos hallazgos indican que, aunque los suelos presentan cierta acidez, mantienen atributos químicos favorables para el desarrollo del cultivo, constituyéndose en una base productiva funcional que puede optimizarse mediante estrategias de manejo agronómico ajustadas a las condiciones locales.

Tabla 2. *Análisis de las características identificadas en suelos por predio*

No. de predio	Municipio	Altitud (m s. n. m.)	pH	MO (%)	N-Total (%)	P-Disp (mg/kg)	K (cmol/kg)
p1	Casabianca	1560	5,2	7,2	0,38	18,3	0,32
p2	Casabianca	1610	5,4	6,5	0,35	15,6	0,28
p3	Casabianca	1585	5,3	6,8	0,36	22,1	0,4
p4	Casabianca	1507	5,6	6,1	0,33	20,4	0,3
p5	Casabianca	1324	5	12,6	0,28	12,4	0,45
p6	Casabianca	1460	5,1	11,2	0,26	9,8	0,38
p7	Casabianca	1596	4,9	10,4	0,25	11,1	0,41
p8	Casabianca	1245	5	12,1	0,27	10,2	0,43
p9	Herveo	1772	5,32	7,16	0,36	19,1	0,29
p10	Herveo	1809	5,66	6,6	0,33	14,45	0,5
p11	Herveo	1792	5,64	7,01	0,35	13,74	0,41
p12	Herveo	1793	5,53	6,36	0,32	28,47	0,11
p13	Herveo	1736	5,61	5,15	0,3	11,38	0,42
p14	Herveo	1400	5,74	7,01	0,28	17,8	0,45
p15	Herveo	1411	5,49	4,11	0,21	32,41	0,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. *Identificación de suelos. Verificación del perfil del suelo*



Fuente: elaboración propia.

En términos de reacción del suelo, los resultados evidenciaron un comportamiento ácido en la totalidad de los predios evaluados, con valores de pH más bajos en Herveo que en Casabianca (ver tabla 2). Esta diferencia confirma una mayor acidez relativa en los suelos de Herveo y sugiere contrastes edafológicos que pueden modificar tanto la disponibilidad de nutrientes como la dinámica de absorción por parte del cultivo. Sin embargo, la interpretación agronómica de esta condición debe sustentarse en los valores específicos registrados, ya que la acidez puede generar tanto efectos favorables en la solubilidad de algunos elementos como limitaciones por toxicidad o baja disponibilidad de otros nutrientes esenciales.

En relación con la materia orgánica (MO), se observó una diferencia marcada entre municipios, con contenidos superiores en Casabianca (ver tabla 2). Este resultado es técnicamente relevante, dado que una mayor acumulación de materia orgánica suele asociarse con mejor estructura del suelo, mayor capacidad de retención de agua, incremento en la actividad biológica y mayor disponibilidad paulatina de nutrientes. En consecuencia, este comportamiento podría reflejar mejores condiciones de fertilidad natural y mayor resiliencia del sistema edáfico frente al manejo agrícola.

Por su parte, los contenidos de nitrógeno (N) presentaron un comportamiento relativamente homogéneo entre Casabianca y Herveo, con registros ubicados en rangos comparables según los criterios de referencia adoptados (ver tabla 3).

En contraste, el fósforo (P) mostró una diferenciación espacial más evidente, con mayores contenidos en Herveo, donde se registraron valores correspondientes a clases entre 15 y 19 mg/kg (ver tabla 3). Este hallazgo es especialmente relevante desde el punto de vista productivo, dado que el fósforo cumple un papel central en el desarrollo radicular, la floración y la formación de frutos. En conjunto, estos resultados permiten inferir que, aunque ambos municipios presentan condiciones químicas funcionales para el cultivo de plátano, existen diferencias significativas en la fertilidad y en la oferta de nutrientes que deben incorporarse en las recomendaciones de manejo y en la discusión agronómica comparativa.

Tabla 3. Promedios de propiedades fisicoquímicas del suelo según municipio y altitud en predios productores de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en Casabianca y Herveo, Tolima

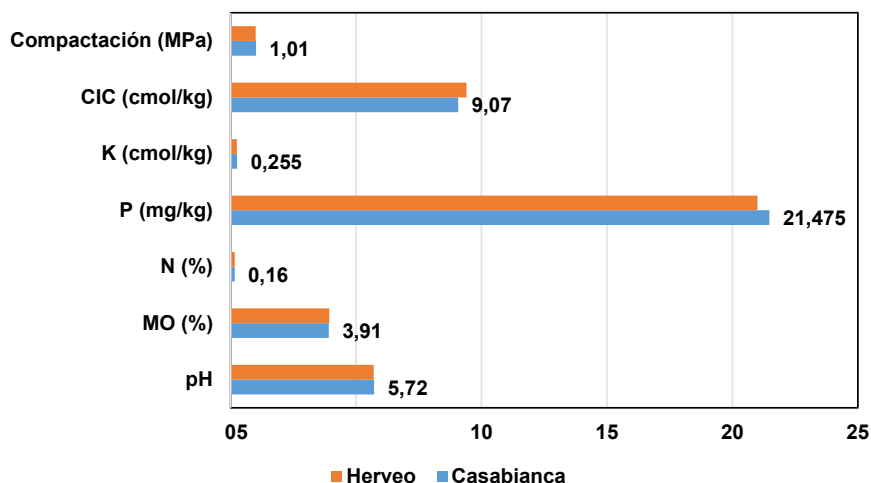
Municipio	Altitud (m s. n. m.)	pH	MO (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (cmol/kg)	CIC (cmol/kg)	Compactación (MPa)	N predios
Casabianca	1400-1600	5,68	3,88	0,16	20,45	0,25	9,14	0,98	5
	>1600	5,75	3,95	0,16	22,5	0,26	9	1,05	2
Herveo	>1600	5,7	3,93	0,16	21	0,25	9,4	1	8

Fuente: elaboración propia.

Al verificar los nutrientes disponibles, se observa que el fósforo (P) exhibe mayor cantidad en altitudes elevadas (hasta 22,5 mg/kg), lo que resulta en un desarrollo radicular y floración en el plátano que prospera (García y Rodríguez, 2018) y verificada a través estudios de la FAO (2020) en suelos volcánicos tropicales. Entretanto, el potasio (K) presenta valor estable en todos los grupos (0,25-0,26 cmol/kg). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) oscila entre 9,0 y 9,4 cmol/kg sin presentar diferencias significativas a nivel de altitud o municipio. Estos niveles indican una capacidad media de retención de nutrientes compatibles con sistemas de producción en transición agroecológica (Ramírez et al., 2019; Cortés y Rodríguez, 2022).

En cuanto a la compactación del suelo, se observaron en promedio valores entre 0,98 y 1,05 MPa, siendo mayor en parajes de Casabianca superiores a los 1600 m s. n. m. Aunque estos valores se encuentran todavía por debajo del umbral crítico de 1,2 MPa (a partir del cual puede afectar el crecimiento radicular), hay que tomarlo muy en cuenta para zonas de gran pendiente de la superficie donde se produce movimiento de maquinaria y sobrepastoreo que incrementa la densidad de suelo (Mendoza et al., 2016; Gómez et al., 2021). Estos resultados ayudan a definir con mayor precisión las condiciones edáficas más comunes y proporcionan insumos clave para la interpretación agroecológica y sugerencia de manejo diferenciado.

Figura 3. Comparación de variables edáficas por municipio



Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra un análisis comparativo de siete variables fisicoquímicas del suelo entre los municipios de Herveo y Casabianca, Tolima. Las variables analizadas incluyen pH, materia orgánica (MO), nitrógeno total (N), fósforo disponible (P), potasio intercambiable (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y compactación.

Los resultados reflejan valores promedio, donde destacan las siguientes observaciones:

- pH: similar en ambos municipios ($\approx 5,72$), indicando suelos moderadamente ácidos.

- Materia orgánica (MO): ligeramente superior en Herveo (3,91 %) frente a Casabianca.
- Nitrógeno total (N): constante en ambas localidades (0,16 %), lo que sugiere uniformidad en el contenido de este nutriente esencial.
- Fósforo disponible (P): leve ventaja en Casabianca (21,475 mg/kg), importante para procesos de floración y desarrollo radicular.
- Potasio (K): valores similares en torno a 0,255 cmol/kg.
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Casabianca presenta una leve mayor capacidad (9,07 cmol/kg), lo que implica mejor retención de nutrientes.
- Compactación: Herveo reporta mayor resistencia mecánica del suelo (1,01 MPa), lo cual podría afectar el desarrollo radicular si supera ciertos umbrales.

Comparación por zonas agroecológicas

Los predios estudiados tienen altitudes entre los 1245 y 1809 m s. n. m., lo que evidencia grandes variaciones agroecológicas. Se encontraron suelos con pH moderadamente ácidos (5,68-5,75), una condición favorable para el cultivo del plátano. Casabianca presentó mayores contenidos de materia orgánica (MO promedio de 3,9 %) y su pH fue ligeramente más bajo. Herveo presentó MO menor y un pH cercano a la neutralidad. Estos contrastes indican variación en la dinámica de nutrientes condicionados por altitud, manejo del suelo y cobertura vegetal.

Patrones edafológicos y correlaciones

El análisis por altitud reveló que los predios por encima de 1600 m s. n. m. presentaron mayor compactación superficial (hasta 1,05 MPa) y niveles estables de CIC (~9 cmol/kg). En los rangos entre 1400 y 1600 m s. n. m. se encontraron condiciones más equilibradas de nitrógeno y potasio. La compactación más alta se observó

en zonas con uso intensivo del suelo, lo que podría afectar el desarrollo radicular. La MO tiende a ser más alta en altitudes medias y bajas, debido posiblemente a una mayor acumulación de residuos vegetales y menor oxidación. Las diferencias edáficas por altitud coinciden con estudios en los Andes tropicales, donde se evidencian cambios en MO y CIC con la altura influenciados por cobertura vegetal, humedad y procesos de oxidación (FAO, 2020; Guerrero y Restrepo, 2017).

Los resultados coinciden con lo señalado por Ramírez et al. (2019) y Cortés y Rodríguez (2022), quienes argumentaron que la retención de agua alta, la acidez media y con poca disponibilidad de fósforo de los suelos volcánicos del norte del Tolima se deben a la retención por óxidos de hierro y aluminio. Por otro lado, el CIC promedio de los predios evaluados refleja situaciones transicionales de sistemas convencionales y prácticas agroecológicas incipientes, como ya ha sido destacado por Gómez et al. (2021).

Implicaciones agronómicas

Desde el punto de vista agronómico, los suelos caracterizados tienen un potencial productivo apropiado para el cultivo del plátano, pero con necesidades específicas por zona. En Casabianca, por ejemplo, se aconseja manejo de acidez con enmiendas cálcicas; en Herveo, disponibilidad de fósforo mediante biofertilizantes o fuentes de fósforo solubles. Las prácticas de labranza mínima, incorporación de materia orgánica y coberturas vivas pueden ayudar a reducir la compactación y mejorar la estructura del suelo. Por otro lado, las diferencias altitudinales abren oportunidades para formular estrategias de diversificación, como sistemas agroforestales.

Visualización y análisis multivariable

Mediante las representaciones gráficas (*box plots*, histogramas, gráficos) se confirmaron las tendencias observadas: alta variabilidad de pH y fósforo en Casabianca, así como mayor uniformidad edáfica en Herveo. Las fincas con mayor contenido de MO se concentraron en altitudes medias de Casabianca, mientras que Herveo destacó en valores de CIC. Estas visualizaciones hacen posible la creación de estrategias de manejo específicas con gran validez para la ordenación territorial e implantación tecnológica en la región rural de montaña.

Conclusiones

Los suelos evaluados en Herveo y Casabianca presentan condiciones edafológicas en general favorables para el cultivo de plátano, aunque con diferencias relevantes en acidez, materia orgánica, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y compactación. Estas variaciones confirman que la fertilidad del suelo y su comportamiento agronómico no son homogéneos entre municipios ni entre rangos altitudinales, por lo que su interpretación debe realizarse desde un enfoque territorial.

Casabianca mostró mayores contenidos de materia orgánica, lo que sugiere mejores condiciones de fertilidad natural y retención de humedad, mientras que en varios predios de Herveo se presentaron mayores contenidos de fósforo disponible y mejor capacidad de intercambio catiónico. En contraste, la presencia de compactación en algunos suelos constituye una limitante física que puede afectar tanto el desarrollo radicular como la eficiencia del aprovechamiento hídrico y nutricional.

En conjunto, los resultados evidencian que la caracterización edafológica constituye un insumo estratégico para orientar decisiones de manejo, fortalecer la sostenibilidad del cultivo y apoyar procesos de planificación productiva en sistemas plataneros de montaña. Además, el enfoque aplicado ofrece una base técnica replicable en otros territorios con condiciones agroecológicas similares.

Recomendaciones

Se recomienda implementar estrategias de manejo del suelo diferenciadas según municipio y rango altitudinal, evitando prácticas uniformes de fertilización y manejo agronómico. La variabilidad observada exige ajustar las decisiones técnicas a las condiciones específicas de cada predio y zona agroecológica.

En los suelos con menor contenido de materia orgánica, se sugiere priorizar la incorporación de enmiendas orgánicas, mientras que en los predios con compactación deben adoptarse prácticas que mejoren la condición física del suelo, como cobertura vegetal, labranza controlada y adición de materia orgánica. Asimismo, el uso de biofertilizantes y fuentes eficientes de fósforo puede contribuir a mejorar la nutrición del cultivo y reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

Finalmente, se recomienda fortalecer el monitoreo periódico de las propiedades edáficas y ampliar este tipo de estudios a otras zonas productoras, incorporando variables complementarias como biología del suelo, disponibilidad hídrica y respuesta del cultivo con el fin de consolidar modelos de manejo más sostenibles y territorialmente ajustados.

Agradecimientos

A las personas que de alguna manera hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

Financiamiento

El proyecto de investigación fue financiado por el Sistema General de Regalías (SGR) a través de la convocatoria para proyectos de ciencia, tecnología e innovación bajo la coordinación del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias). Los recursos fueron asignados al proyecto titulado *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo del plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima*, con código BPIN 2021000100302, ejecutado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

El proyecto tuvo una inversión total de \$2 191 381 996. La presente investigación se enmarca en los productos derivados del objetivo específico orientado a evaluar las condiciones edafológicas para el aprovechamiento sostenible del cultivo de plátano en los municipios de Casabianca y Herveo, Tolima.

Uso de inteligencia artificial

Para la elaboración de este documento se recurrió al uso de inteligencia artificial, mediante el modelo de lenguaje ChatGPT, con el fin de revisar la coherencia gramatical en ciertos párrafos del resumen y los resultados. Posteriormente, dichos párrafos fueron revisados con el fin de garantizar un estilo propio. La herramienta también se utilizó para verificar la estructura de citación de la literatura en la sección final; todas las referencias fueron revisadas manualmente una por una para asegurar su conformidad con las normas APA en su séptima edición.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Agronet. (2025). Estadísticas del sector agropecuario colombiano. *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. <https://www.agronet.gov.co>
- Gómez, J. D., Hernández, L. A. y Paredes, R. M. (2021). Efectos de la compactación del suelo sobre el crecimiento radicular en cultivos tropicales. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), 204-213. <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i2.13051>
- Guerrero, C. A. y Restrepo, H. A. (2017). Propiedades de los suelos volcánicos y su relación con el uso agropecuario en zonas de ladera. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 47(1), 12-24. <https://doi.org/10.26806/rese.v47i1.1120>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción de plátano*. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2020). *Guía técnica para el uso de biofertilizantes en cultivos transitorios y permanentes*. <https://www.ica.gov.co/documentos/biofertilizantes.aspx>
- Mendoza, A., Pérez, J. y León, F. (2016). Compactación del suelo y su impacto en la productividad agrícola. *Agro Ciencia*, 50(3), 215-224. <https://doi.org/10.31039/j.agroc.2016.50.3.12>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020). *Evaluación de la fertilidad de suelos en ecosistemas tropicales*. <https://www.fao.org/soils-portal>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). *Banana market review and banana statistics 2022*. <https://www.fao.org/3/cc4435en/cc4435en.pdf>
- Romero, D. F. y Gutiérrez, A. L. (2010). Degradación del suelo en cultivos de plátano en zonas andinas. *Revista Colombiana de Ciencias Agrícolas*, 38(1), 91-98. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v28n1.13252>





CAPÍTULO 2

Ganadería y nutrición animal con enfoques alternativos

- Lucerina Artunduaga – Pimentel
- Ricardo Rusinque-Becerra
- Hector Fabián Cerquera Castañeda
- Leonel Sterling Rojas

Este capítulo reúne investigaciones orientadas a fortalecer la producción pecuaria sostenible en el sur de Colombia. El apartado incluye los resultados de investigaciones relacionadas con el análisis comparativo de parámetros productivos y reproductivos en ganado criollo caqueteño, puro y cruzado bajo sistemas de doble propósito en Morelia (Caquetá), destacando su adaptación y potencial productivo. Asimismo, se explora la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de pulpa de café como suplemento nutricional en la alimentación de cerdos y gallinas ponedoras en el municipio de Pitalito (Huila). Estos estudios aportan estrategias innovadoras para diversificar la alimentación animal y mejorar la productividad con un enfoque sostenible.





Análisis comparativo de parámetros productivos y reproductivos en ganado criollo caqueteño puro y cruzado en un sistema de doble propósito en Morelia, Caquetá (Colombia)

Resumen

Este estudio analiza de forma comparativa los parámetros productivos y reproductivos del ganado criollo caqueteño puro (CCP) y del criollo caqueteño cruzado (CCC) en un sistema de producción de doble propósito en la finca Villa Mery, Morelia, Caquetá (Colombia). Ante la amenaza de desaparición de esta raza criolla (CCP), se plantea su valorización a través de estrategias de cruzamiento dirigidas. Mediante un enfoque sistémico, se recolectaron datos retrospectivos (2018-2022) y prospectivos (2023), para lo cual se evalúan indicadores clave en condiciones de manejo homogéneo (pastoreo, suplementación y plan sanitario). Los resultados revelaron un mejor desempeño en el lote CCC, destacándose una reducción de veintinueve días en el intervalo parto-concepción, un incremento de 140 g/día en la ganancia de peso predestete, mejores condiciones corporales y mayor peso al destete. También se evidenció un aumento en la tasa de natalidad en ambos lotes. Se concluye que el ganado CCP constituye un recurso genético estratégico, cuyo potencial puede ser optimizado mediante cruzamientos planificados con aplicaciones prácticas en programas de mejoramiento y sostenibilidad ganadera en regiones tropicales.

Palabras clave: análisis de inspección, adaptación genética, doble propósito, eficiencia reproductiva, ganado vacuno, genética animal.

Abstract

This study provides a comparative analysis of productive and reproductive parameters in purebred Caqueteño Creole cattle (CCP) and crossbred Caqueteño Creole cattle (CCC) within a dual-purpose production system at the Villa Mery farm, located in Morelia, Caquetá (Colombia). Given the risk of extinction faced by this native breed (CCP), its strategic valuation through directed crossbreeding is proposed. Using a systemic approach, both retrospective data (2018-2022) and prospective data (2023) were collected, evaluating key indicators under homogeneous management conditions (rotational grazing, supplementation, and health plans). The results showed superior performance in the CCC group, particularly in the reduction of the calving-to-conception interval (by 21 days), increased pre-weaning daily weight gain (by 140 g/day), improved body condition, and higher weaning weights. An increase in birth rate was also observed in both groups. It is concluded that the CCP represents a strategic genetic resource whose potential can be enhanced through planned crossbreeding, with practical applications in genetic improvement and sustainable livestock systems in tropical regions.

Keywords: inspection analysis, genetic adaptation, dual-purpose, reproductive efficiency, cattle, animal genetics.

Introducción

La ganadería bovina se muestra como una actividad estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico a nivel mundial al representar alrededor del 40 % del valor agrícola global; además, aporta a la nutrición, al empleo y al ingreso de millones de personas, especialmente a quienes viven en regiones tropicales y subtropicales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023). Respecto al inventario ganadero, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2025) indicó que la población bovina en Colombia es de 30 344 182, la cual está distribuida en 629 592 predios. Estas cifras representan un aumento del 3,94 % respecto al 2024. Por otro lado, esta población se concentra principalmente en los departamentos de Antioquia (10,63 %), Córdoba (9,33 %), Meta (7,94 %), Casanare (7,86 %), Caquetá (7,76 %), Cesar (5,66 %), Magdalena (5,43 %),

Santander (5,28 %), Cundinamarca (4,97 %) y Bolívar (4,84 %), los cuales representan el 69,69 % del total de la población.

Los sistemas ganaderos doble propósito son las actividades que predominan en el trópico húmedo colombiano, en especial en regiones como el departamento del Caquetá, donde los pequeños y medianos productores dependen de sistemas con baja tecnificación y alta presión ambiental (Gutiérrez et al., 2019).

En este contexto, las razas criollas representan un recurso estratégico dada su adaptabilidad, rusticidad y eficiencia en condiciones de pastoreo extensivo, lo cual las hace valiosas para sistemas sostenibles en zonas tropicales (Núñez et al., 2016).

Tal como lo indicó Celis (2022), el criollo caqueteño, raza bovina autóctona de la Amazonía colombiana ha demostrado cualidades destacadas en resistencia a enfermedades, aprovechamiento de forrajes locales y desempeño reproductivo en ambientes adversos; sin embargo, su población se encuentra en riesgo debido a la introducción de razas comerciales y a la falta de políticas sólidas para su conservación. Ante este panorama, el cruzamiento dirigido surge como una estrategia para aprovechar su base genética y mejorar la eficiencia productiva sin perder las cualidades adaptativas del genotipo criollo (González et al., 2013).

Si bien algunos estudios (Celis, 2022) han documentado el comportamiento de razas criollas y sus cruzamientos, son escasos los análisis comparativos que evalúen indicadores productivos y reproductivos en condiciones de manejo homogéneo, lo cual limita el diseño de programas de mejoramiento genético adaptados al trópico húmedo.

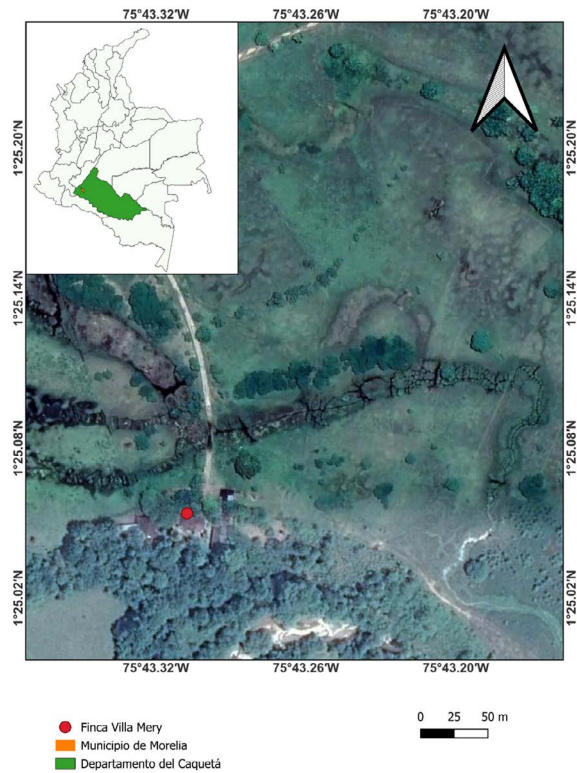
En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar comparativamente los parámetros productivos y reproductivos del ganado criollo caqueteño puro (CCP) y del criollo caqueteño cruzado (CCC) en un sistema de doble propósito a partir de datos recolectados en la finca Villa Mery, municipio de Morelia, Caquetá durante el período 2018-2023.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la finca Villa Mery, ubicada en la vereda Albano del municipio de Morelia, departamento del Caquetá (Colombia) (ver figura 1). Dicha zona pertenece al trópico húmedo y tiene una altitud promedio de 430 m s. n. m., temperatura media anual de 26 °C y precipitación cercana a los 3500 mm (Weather Spark, s.f). La finca desarrolla un sistema de producción de cría bajo pastoreo rotacional, suplementación mineral estacional y plan sanitario unificado.

Figura 1. Finca Villa Mery, Morelia, Caquetá



Fuente: elaboración propia.

Diseño del estudio y enfoque metodológico

Se realizó un análisis técnico comparativo con enfoque sistémico utilizando indicadores productivos y reproductivos recolectados en dos lotes bovinos: criollo caqueteño puro (CCP) y criollo caqueteño cruzado (CCC) (Villarreal Lugo et al., 2019). La información se obtuvo a partir del registro histórico en el *software* Ganadero, sin diseño experimental de campo. Ambos lotes fueron manejados en condiciones homogéneas de alimentación, sanidad y manejo reproductivo.

Población evaluada

El inventario general estuvo compuesto por ciento veinte animales, distribuidos en ochenta y seis CCP (71,6 %) y treinta y cuatro CCC (28,4 %). Las categorías incluyeron vacas paridas, vacas secas, novillas de vientre, crías, hembras y machos de levante, machos de ceba y toros.

Período de análisis:

- Fase retrospectiva (2018-2022): análisis de datos históricos registrados.
- Fase prospectiva (2023): seguimiento directo de los indicadores.

Variables analizadas

Reproductivas:

- Intervalo parto-concepción (IPC),
- días de gestación,
- intervalo entre partos (IEP),
- tasa de natalidad.

Productivas:

- Condición corporal en vacas paridas (escala 1-5 donde 1 es extremadamente delgado y 5 es un animal con condición corporal excesiva con abundante grasa);
- días en lactancia,
- ganancia diaria de peso predestete (g/día),
- ganancia de peso diaria ajustada al IEP (g/día/IEP),
- peso al nacimiento (kg),
- peso al destete (kg).

Instrumentos y recolección de datos

Los datos se obtuvieron del *software* + Ganadero TP utilizado en el predio Villa Mery, respaldados por registros de campo y observaciones directas. Las evaluaciones de condición corporal fueron realizadas por el equipo técnico, conformado por los docentes investigadores Lucerina Artunduaga y Ricardo Rusinque, durante los chequeos reproductivos. Los pesos fueron tomados con báscula portátil de barras hw 1500 durante controles programados.

Análisis estadístico

Los datos tanto de parámetros productivos como reproductivos entre el 2018 y el 2023 se procesaron en Python 3.10 (*pandas, scipy, statsmodels*). Se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Lee, 2025). Las decisiones sobre la prueba estadística se basaron en los resultados de normalidad por grupo (ver Anexo 1). Para comparar los lotes CCP y CCC, se aplicaron pruebas t de Student cuando ambas distribuciones cumplieran normalidad o prueba de Mann-Whitney U en caso contrario (Learn Statistics Easily, 2023). Además, se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Los resultados se reportan como media

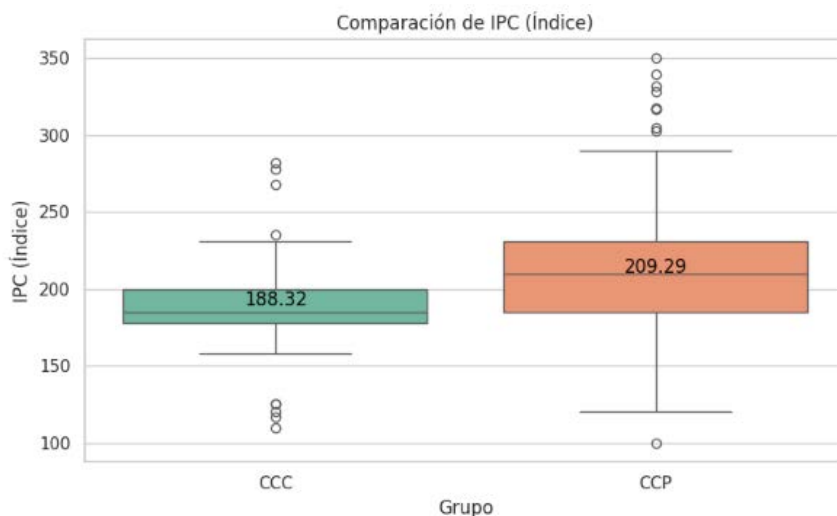
± desviación estándar (DE) y se incluyen los valores-p correspondientes para las variables evaluadas.

Resultados y discusión

Indicadores reproductivos

Intervalo parto-concepción (IPC). El grupo CCC presentó un IPC promedio de ciento setenta y cuatro días, mientras que el CCP registró ciento noventa y cuatro días, diferencia estadísticamente significativa ($p = 0,0006$). Esta diferencia se visualiza claramente en la figura 2, donde se observa una mayor dispersión y mediana más alta en el grupo CCP, lo que sugiere una menor eficiencia reproductiva comparativa.

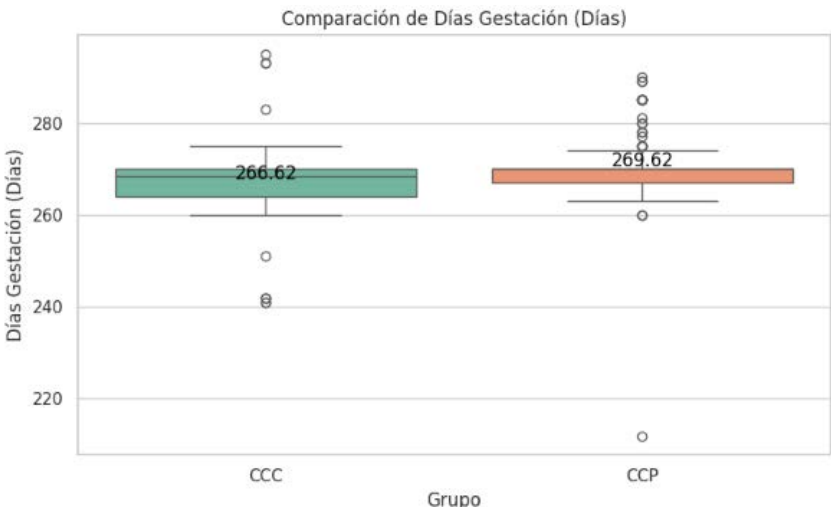
Figura 2. Comparación del intervalo parto-concepción (IPC) entre los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Días promedio de gestación. La duración de la gestación fue similar entre grupos, con $266,6 \pm 11,5$ días en CCC y $269,6 \pm 6,5$ días en CCP, diferencia significativa ($p = 0,0486$), como se observa en la figura 3. Sin embargo, existen diferencias entre medianas, ya que ambos grupos presentan concentraciones cercanas a los doscientos setenta días, con mayor variabilidad en el grupo CCC.

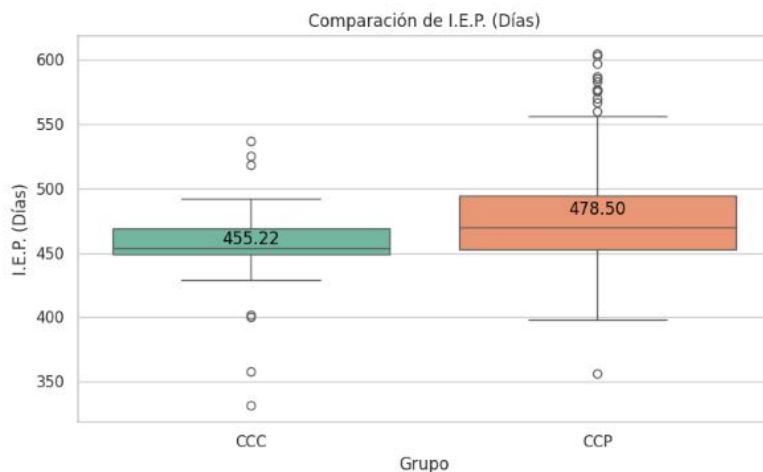
Figura 3. Comparación de los días promedio de gestación entre los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Intervalo entre partos (IEP). En la figura 4 se observa que el grupo CCC presentó un IEP de $455,2 \pm 33,9$ días, inferior al CCP con $478,5 \pm 42,1$ días. Esta diferencia fue estadísticamente significativa ($p = 0,0001$), lo que sugiere una mayor eficiencia reproductiva en el lote cruzado asociada a prácticas de suplementación, división de potreros y control sanitario.

Figura 4. Comparación del intervalo entre partos (IEP) entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023

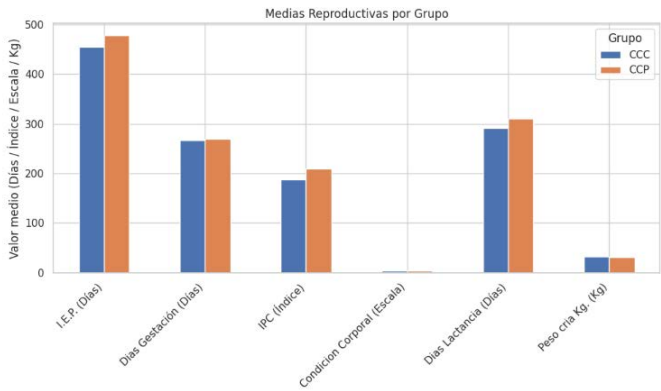


Fuente: elaboración propia.

Tasa de natalidad. Ambos grupos mostraron un incremento progresivo en la tasa de natalidad entre el 2018 y el 2023. El grupo CCC alcanzó un valor del 75 %, mientras que el CCP reportó un 71 %, lo que refleja una mejora general en los parámetros reproductivos. No se realizó análisis estadístico para esta variable, ya que el objetivo fue describir la tendencia observada en el sistema productivo.

En conjunto, estos resultados indican mayor eficiencia reproductiva en el grupo cruzado (CCC). Entretanto, las medias de los principales indicadores reproductivos comparados entre grupos se presentan de manera consolidada en la figura 5, lo que permite visualizar de forma integrada las diferencias observadas.

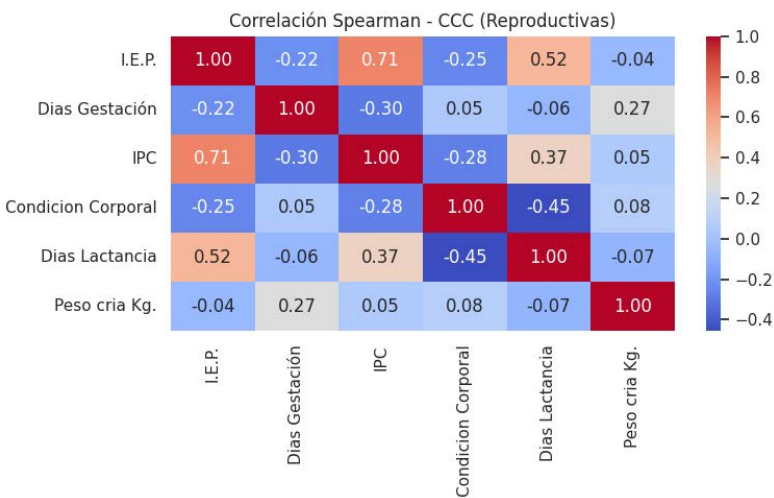
Figura 5. Medias de los indicadores reproductivos por grupo (CCC vs. CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se evaluaron las relaciones entre variables reproductivas dentro del grupo CCC. Al respecto, la figura 6 nos presenta una matriz de correlación de Spearman, donde destaca la asociación positiva entre el intervalo entre partos (IEP) y el intervalo parto-concepción (IPC), así como la correlación negativa entre condición corporal y días en lactancia.

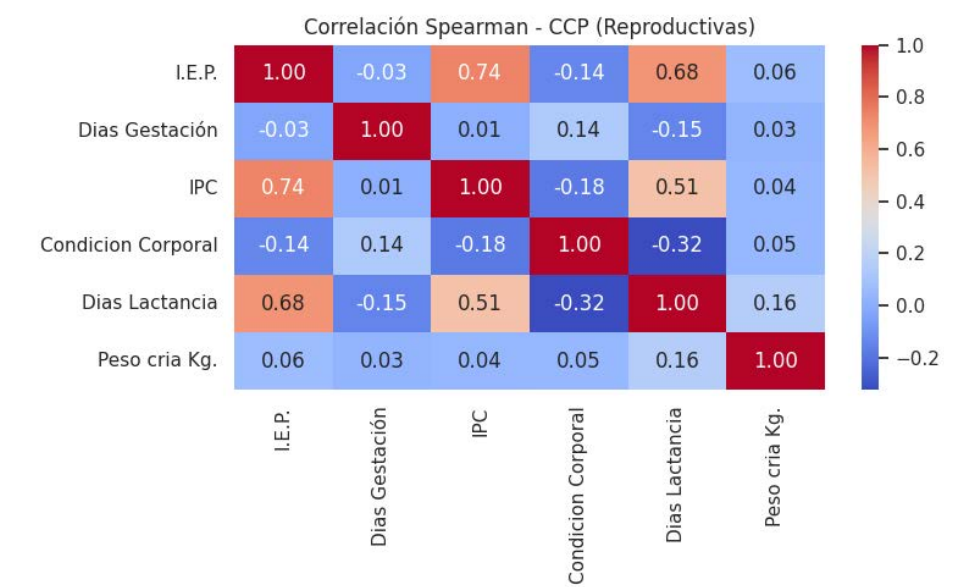
Figura 6. Matriz de correlación de Spearman entre variables reproductivas en el grupo CCC (2018-2023)



Fuente: elaboración propia.

Por su parte, en el grupo Criollo Caqueteño Puro el análisis de correlación de Spearman (ver figura 7) mostró relaciones similares a las observadas en el grupo cruzado. Destaca la fuerte correlación positiva entre el IEP y el IPC ($p = 0,74$), así como entre IEP y días de lactancia ($p = 0,68$), lo cual sugiere que mayores períodos de lactancia podrían prolongar los intervalos reproductivos.

Figura 7. Matriz de correlación de Spearman entre variables reproductivas en el grupo CCP (2018-2023)

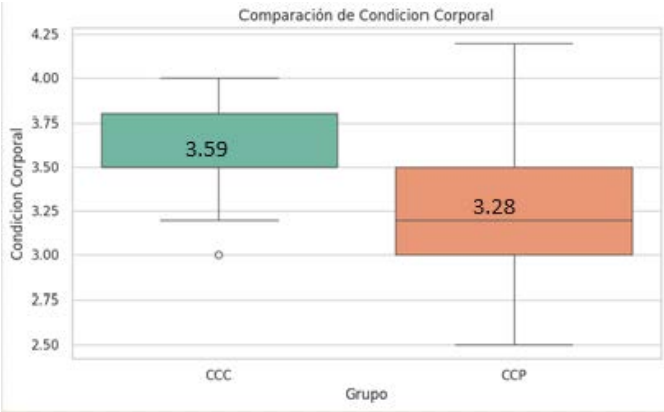


Fuente: elaboración propia.

Indicadores productivos

Condición corporal en vacas paridas. La condición corporal fue significativamente superior en el grupo CCC ($3,8 \pm 0,4$) frente al CCP ($3,7 \pm 0,5$) ($p < 0,0001$). Sin embargo, como se observa en la figura 8, la mediana del grupo CCP fue más baja ($\sim 3,2$) y presentó mayor dispersión, lo que indica una menor uniformidad en el estado corporal de ese grupo que, a su vez, refleja una mayor eficiencia en el uso de nutrientes y mejor adaptación metabólica en las hembras cruzadas (VikingGenetics, 2023).

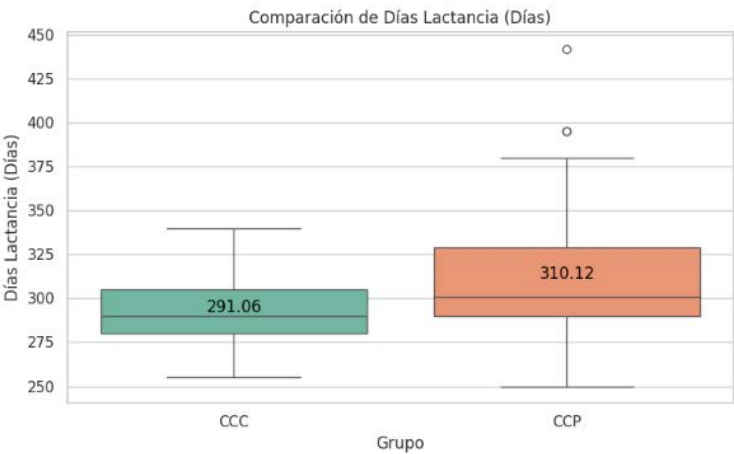
Figura 8. Comparación de la condición corporal (escala 1-5) en vacas paridas de los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Días en lactancia. En la figura 9 se observa que los días promedio en lactancia fueron significativamente menores en el grupo CCC ($291,1 \pm 18,5$ días) respecto al CCP ($310,1 \pm 27,4$ días), con un valor de $p < 0,0001$ como consecuencia de la mejora en el IPC.

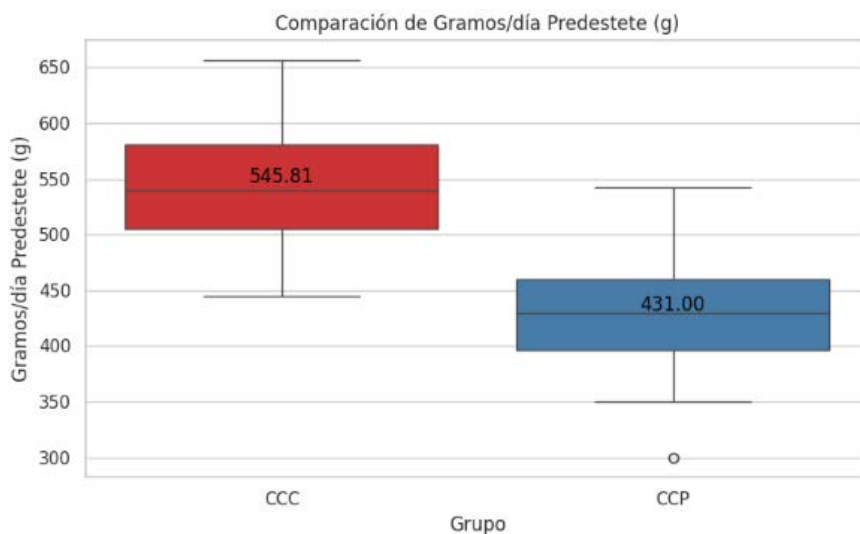
Figura 9. Comparación del número de días en lactancia en los grupos criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Ganancia diaria de peso predestete. La ganancia de peso predestete fue significativamente superior en el grupo CCC ($545,8 \pm 51,1$ g/día) en comparación con el CCP ($431,0 \pm 51,1$ g/día) ($p < 0,001$), como se observa en la figura 10. Esto sugiere una mayor eficiencia de conversión en los cruzamientos.

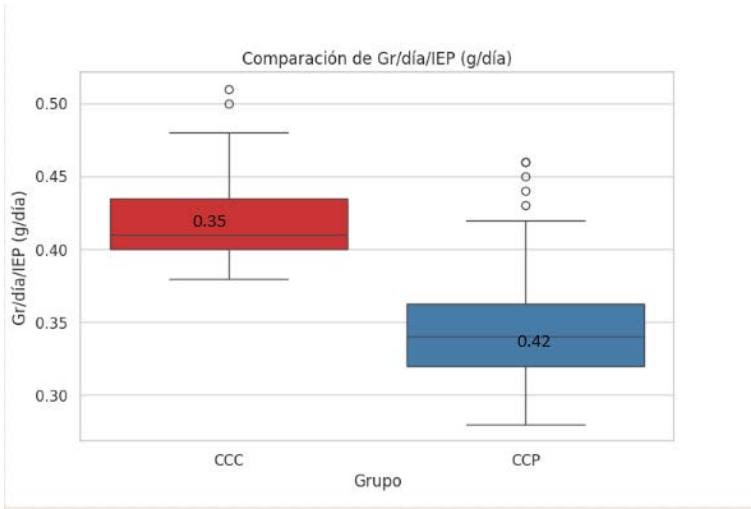
Figura 10. Comparación de la ganancia diaria de peso predestete (GDP) entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Ganancia diaria de peso ajustada al IEP. Al ajustar la ganancia diaria de peso por la duración del intervalo entre partos, el grupo CCC presentó un promedio de 420 ± 30 g/día/IEP, superior al CCP con 350 ± 40 g/día/IEP, como se muestra en la figura 11. Esto reafirma su mayor eficiencia biológica y económica en el lote cruzado.

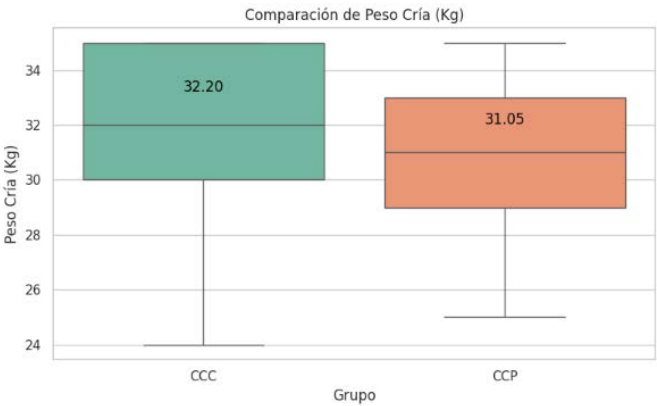
Figura 11. Comparación de la ganancia diaria de peso ajustada al intervalo entre partos (g/día/IEP) en criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Peso al nacer. De acuerdo con la figura 12, los pesos promedio al nacimiento fueron similares entre los grupos, con $32,2 \pm 2,5$ kg en CCC y $31,0 \pm 2,7$ kg en CCP sin diferencia estadísticamente significativa atribuibles al genotipo.

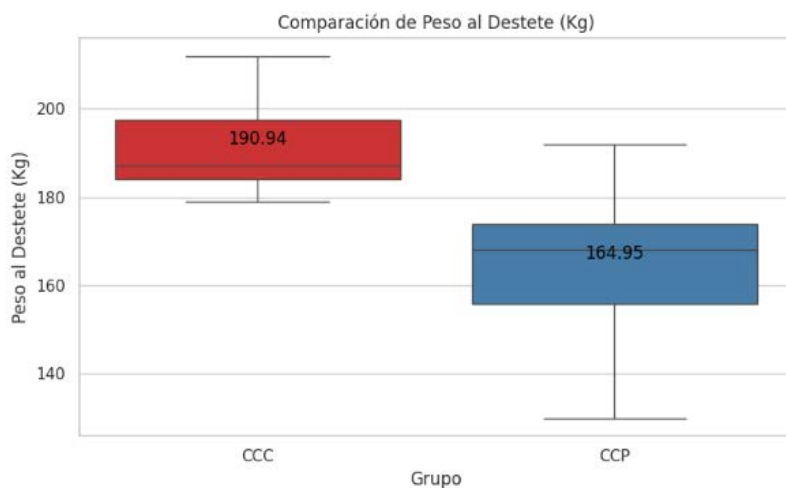
Figura 12. Comparación del peso al nacimiento (kg) entre crías de criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Peso al destete. Como se observa en la figura 13, el grupo CCC alcanzó un peso promedio al destete de $190,9 \pm 9,4$ kg, significativamente superior al CCP, que obtuvo $164,9 \pm 13,2$ kg ($p < 0,001$). Ambos resultados se explican por la mejora en ganancia de peso diaria y eficiencia general del sistema.

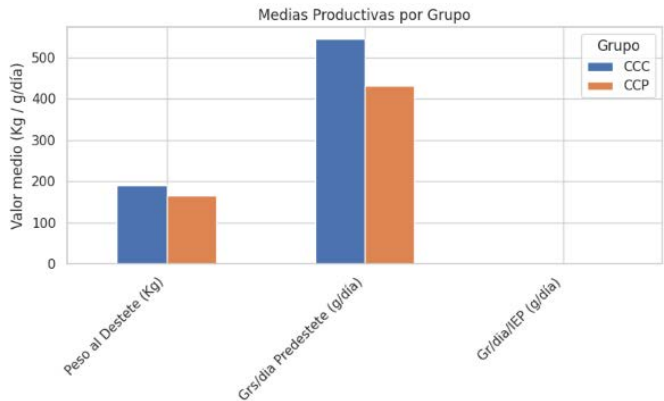
Figura 13. Comparación del peso al destete entre crías de (CCC) y (CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

Las medias comparativas de los indicadores productivos (peso al destete, ganancia diaria predestete y ganancia diaria ajustada al IEP) se presentan de forma consolidada en el figura 14, lo cual permite observar de manera integrada las diferencias en desempeño entre los grupos genéticos evaluados de CCC y CCP.

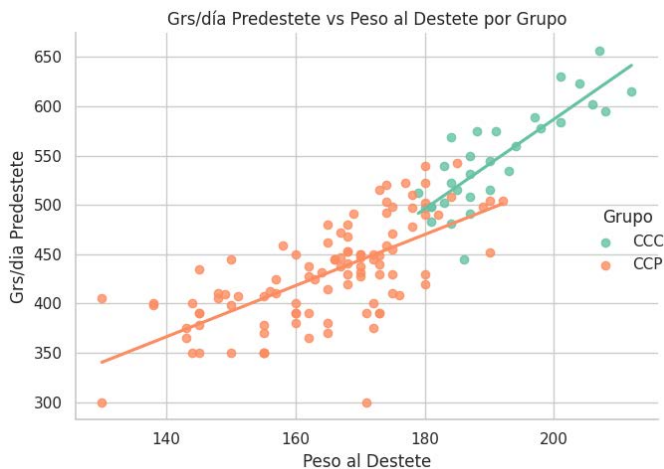
Figura 14. Medias de los indicadores productivos por grupo (CCC vs. CCP), 2018-2023



Fuente: elaboración propia.

De forma complementaria, la relación directa entre el peso al destete y la ganancia diaria predestete se analiza en la figura 15, en la cual se evidencia una correlación positiva en ambos grupos, con mayor pendiente en el grupo de CCC, lo que refleja una mayor eficiencia en la conversión de peso durante la fase predestete.

Figura 15. Relación entre ganancia diaria predestete y peso al destete por grupo genético (CCC vs. CCP)



Fuente: elaboración propia.

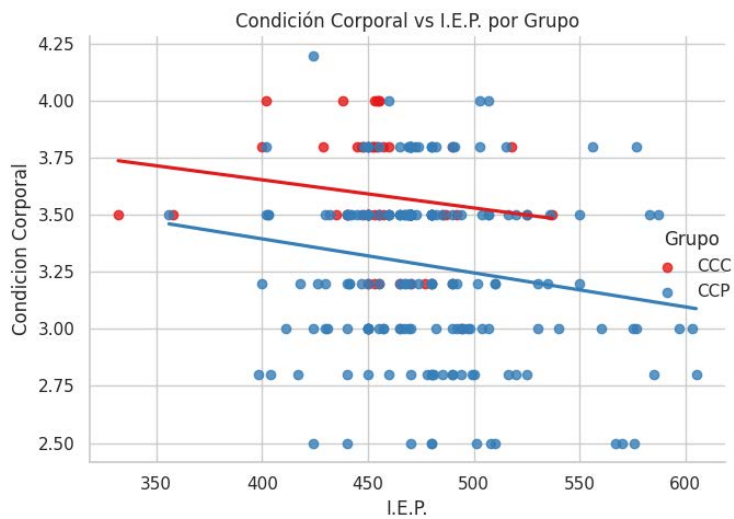
Los resultados de este estudio sugieren que el cruzamiento entre ganado criollo caqueteño y razas cebuinas (principalmente Brahman y Cebú comercial utilizadas en el estudio) ofrece ventajas técnicas significativas en varios indicadores productivos y reproductivos evaluados (IPC, IEP, condición corporal, ganancia diaria de peso predestete; ganancia diaria de peso ajustada al IEP, peso al destete). No obstante, al clasificarse como raza criolla, el criollo caqueteño puro (CCP) mantiene un desempeño competitivo que lo posiciona como una base genética valiosa en programas de mejora y sostenibilidad ganadera (González et al., 2013).

En términos reproductivos, la reducción del intervalo parto–concepción (IPC) y del intervalo entre partos (IEP) en ambos grupos sugiere una mejora integral del manejo nutricional y reproductivo, pero es notorio que las hembras del lote cruzado (CCC) respondieron de forma más eficiente en menor tiempo. Esto puede deberse a la mayor capacidad de reserva energética observada en los fenotipos cruzados, lo cual concuerda con lo reportado en estudios previos en los cuales se destaca que el cruzamiento en ambientes tropicales mejora la eficiencia reproductiva y de conversión (McDowell, 1985).

Respecto a la condición corporal, el aumento sostenido en ambos lotes indica una mejora significativa en la oferta forrajera y en la suplementación mineral. Sin embargo, el mayor índice en el lote CCC (3,8 frente a 3,7 en el CCP) refuerza el papel del cruzamiento en la eficiencia metabólica durante la lactancia, aspecto clave en sistemas de cría extensivos (Michael et al., 2021).

Además, se exploró la relación entre la condición corporal y el intervalo entre partos (IEP), observándose una tendencia negativa en ambos grupos genéticos, como se observa en la figura 16. Esta relación sugiere que vacas con menor condición corporal tienden a presentar intervalos entre partos más largos, lo que refuerza la importancia de mantener un adecuado estado corporal para mejorar la eficiencia reproductiva.

Figura 16. *Relación entre condición corporal e intervalo entre partos (IEP) por grupo genético*



Fuente: elaboración propia.

Entretanto, la tabla 1 presenta una síntesis tabular de los indicadores reproductivos junto con su respectiva interpretación técnica, lo que refuerza la utilidad práctica de los resultados.

Respecto al componente productivo, la ganancia diaria de peso predestete fue notoriamente superior en el CCC. Esta diferencia se mantuvo al ajustar por el IEP, lo que sugiere una mejor habilidad materna y aprovechamiento de la heterosis, como ha sido documentado en sistemas doble propósito del trópico (Martínez et al., 2020).

Tabla 1. Comparación de variables reproductivas entre criollo caqueteño cruzado (CCC) y criollo caqueteño puro (CCP)

Variable	CCC (media)	CCP (media)	Interpretación
IEP	455 días	478 días	En CCC, el intervalo entre partos es menor, lo que implica mayor eficiencia reproductiva.
Días de gestación	266,6	269,6	Ligera diferencia: CCP tiene gestaciones más largas en promedio.
IPC (parto concepción)	(Dato no visible completo)		El valor promedio es menor en CCC, lo que refuerza la mejor eficiencia reproductiva.
Condición corporal	3,2	3,05	CCC tiene mejores condiciones corporales (mayor reserva energética).
Días de lactancia	291	310	CCP tiene vacas más tiempo en lactancia, lo que podría retrasar la concepción.
Peso de la cría al nacimiento	32,2 kg	31,0 kg	En CCC, las crías nacen con mayor peso, lo que puede ser indicativo de mejor estado materno.

Fuente: elaboración propia.

Aunque el peso al nacimiento fue similar en ambos grupos ($32,2 \pm 2,5$ kg en CCC y $31,0 \pm 2,7$ kg en CCP), el peso al destete reflejó una ventaja para los animales cruzados, lo cual tiene implicaciones directas en la rentabilidad del sistema, especialmente si el objetivo es la venta de machos destetos. Sin embargo, el CCP mostró una mejora proporcional significativa, lo que sugiere que, bajo condiciones adecuadas, también puede alcanzar buenos niveles de eficiencia. Este hallazgo es coherente con lo reportado en la literatura, donde se destaca que el manejo técnico sostenido mejora el rendimiento incluso en razas criollas puras (Celis, 2022).

El comportamiento comparativo de las variables productivas entre CCP y CCC, así como su interpretación zootécnica se resume en la tabla 2. En conjunto, los resultados validan que el cruzamiento dirigido representa una estrategia técnicamente viable para aumentar el rendimiento de los sistemas bovinos en el trópico húmedo. No obstante, se ha señalado que el uso de razas criollas debe combinarse con

buenas prácticas de manejo, tecnologías apropiadas y planes de conservación genética (Núñez et al., 2016).

Tabla 2. Comparación de variables productivas entre Criollo Caqueteño Cruzado (CCC) y Criollo Caqueteño Puro (CCP)

Variable	CCC (media)	CCP (media)	Interpretación
Peso al destete	190,9 kg	164,9 kg	Las crías de CCC alcanzan un peso mayor al destete.
Ganancia diaria predestete	545,8 g/día	431,0 g/día	Mayor tasa de crecimiento en crías de CCC
Ganancia diaria ajustada IEP	0,42 g/día	0,35 g/día	Más eficiencia productiva por tiempo en CCC

Fuente: elaboración propia.

La mejora observada en los indicadores no se debe únicamente al cruzamiento; además, responde al efecto acumulado de una estrategia de manejo integral implementada progresivamente desde el 2018 que incluyó la división sostenible de praderas, suplementación estratégica y gestión de información.

Finalmente, el criollo caqueteño puro debe ser entendido no como un sistema competitivo aislado, sino como un recurso genético estratégico cuya conservación e integración a modelos de cruzamiento estructurados permite combinar productividad con sostenibilidad. Este enfoque coincide con planteamientos que sugieren que los programas de mejoramiento deben reconocer y aprovechar la base adaptativa de las razas locales en los sistemas tropicales (González et al., 2013).

Conclusiones

A lo largo del período de estudio (2018-2023), y con las condiciones controladas en cuanto a manejo en la finca Villa Mery (Caquetá), se pudo observar un desempeño superior del lote de criollo caqueteño cruzado (CCC) frente al criollo caqueteño puro (CCP), especialmente en variables clave, el intervalo parto-concepción, la

condición corporal al parto y la ganancia diaria predestete. Esta diferencia no solo indica el efecto positivo del cruzamiento con razas cebuinas, sino también la importancia de aplicar estrategias de mejora en condiciones reales del trópico húmedo.

Aunque el grupo CCP partía de un desempeño inicial un poco más restringido, logró mostrar avances sostenidos en todos los indicadores a lo largo del período de estudio, lo cual permite afirmar que, con un manejo técnico adecuado, también se pueden alcanzar niveles productivos competitivos. En tal caso, la suplementación mineral, el control del estado fisiológico de las vacas y la división de potreros con rotación incidieron directamente en esos resultados.

Es importante aclarar que las mejoras alcanzadas no se deben exclusivamente al componente genético sino que, en ambos grupos, tuvieron influencia las prácticas aplicadas de forma permanente, como el diligenciamiento mensual de los registros, la evaluación visual de la condición corporal y los ajustes en la suplementación según la época del año. Dichos hallazgos refuerzan la necesidad de combinar criterios técnicos con la experiencia del productor para, de esta forma, lograr una eficiencia sostenible.

De acuerdo con estos resultados, se sugiere promover y fortalecer los programas regionales que conlleven a la conservación del criollo caqueteño puro y, al mismo tiempo, avanzar en sistemas de cruzamiento planificado con otros tipos raciales que aumenten la productividad. En regiones como Caquetá, donde el acceso a tecnologías suele ser más limitado, este tipo de estrategias pueden ofrecer una posibilidad factible para mejorar la rentabilidad ganadera sin comprometer la base genética criolla.

Agradecimientos

Se agradece a la finca Villa Mery y al equipo técnico del proyecto por su valioso apoyo en la recolección y sistematización de los datos. Asimismo, se reconoce a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y a los ganaderos del municipio de Morelia, Caquetá, por su colaboración y compromiso durante el desarrollo de este estudio.

Financiamiento

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por la financiación del presente trabajo a través del proyecto PSI4202ECAPMA2023.

Uso de inteligencia artificial

No aplica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Celis Parra, G. (2022). *Respuesta al estrés calórico en bovinos criollos caquetños y grupos de cruces Bos taurus, Bos indicus en el piedemonte amazónico colombiano* [tesis de doctorado en Ciencias Agrarias]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81352/17648997.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- González Stagnaro, C., Verde, O., Sánchez, L. y Pacheco, L. (2013). Efectos del cruzamiento sobre la producción de leche y características de la canal en bovinos doble propósito. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(4), 393-409. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11242013000400001&script=sci_arttext.
- Gutiérrez, L., Moreno, C. A. y Barrera, J. A. (2019). *Sistemas de producción en el medio Caquetá (Cartagena del Chairá) GEF Corazón de la Amazonía*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi). <https://www.sinchi.org.co/sistemas-de-produccion-en-el-medio-caqueta-cartagena-del-chaira-gef-corazon-de-la-amazonia>.
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2025). *Censos Pecuarios Nacional*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Learn Statistics Easily. (2023, mayo 25). *What is the difference between ttest and MannWhitney test?* <https://statisticseasily.com/t-test-vs-mann-whitney-u-test/>
- Lee, S. (2025). Practical guide on ShapiroWilk test for data distribution analysis. *Number Analytics*. <https://www.numberanalytics.com/blog/practical-guide-shapiro-wilk-test-data-distribution>
- Martínez, R. D., Carpinetti, B. N., Ruiz Moreno, L. y Solís, R. (2020). El ganado criollo colombiano sanmartinero: conservación y aporte sostenible a la producción

- bovina en la Orinoquía. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 28(3-4), 69-86. https://ojs.alpa.uy/index.php/ojs_files/article/view/2810.
- McDowell, R. E. (1985). Crossbreeding in tropical areas with emphasis on milk, health, and fitness. *Journal of Dairy Science*, 68(9), 2418-2435. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)81118-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)81118-8)
- Michael, P., de Cruz, C. R., Mohd Nor, N., Jamli, S. y Goh, Y. M. (2021). The potential of using temperate–tropical crossbreds and agricultural by-products, associated with heat stress management for dairy production in the tropics: A review. *Animals*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.3390/ani12010001>.
- Núñez Domínguez, R., Ramírez Valverde, R., Saavedra Jiménez, L. A. y García Muñiz, J. G. (2016). La adaptabilidad de los recursos zoogenéticos criollos, base para enfrentar los desafíos de la producción animal. *Archivos de Zootecnia*, 65(251), 461-468. <http://www.ciap.org.ar/Sitio/Archivos/criollo%20recursos.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). *Avances y desafíos en la ganadería de América Latina y el Caribe - Medidas de mitigación apropiadas para cada país*. <https://doi.org/10.4060/cc8210es>
- Vikinggenetics. (2023). *El cruzamiento mejora la eficiencia alimenticia*. <https://www.vikinggenetics.com/es/noticias/el-cruzamiento-mejora-la-eficiencia-alimenticia>
- Villarreal Lugo, A. L., Hernández Ripalda, M. D. y Luna González, A. (2019). *Un análisis comparativo entre el enfoque de procesos y el enfoque sistémico usando simulación*. *Pistas Educativas*, 41(133), 760-773. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/download/1945/1558>
- Weather Spark. (s.f). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Morelia*. <https://es.weatherspark.com/y/22363/Clima-promedio-en-Morelia-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Anexos

Anexo 1: resultados de pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y significancia estadística para variables productivas y reproductivas (2018-2023)

Figura 1. Resultados de pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y significancia estadística para variables productivas y reproductivas (2018-2023)

Variable: I.E.P.	- Normalidad CCC: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0001 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Dias Gestación	- Normalidad CCC: $p = 0.0001 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0486 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: IPC	- Normalidad CCC: $p = 0.0042 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0023 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0006 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Condicion Corporal	- Normalidad CCC: $p = 0.0002 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0000 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Dias Lactancia	- Normalidad CCC: $p = 0.6196 \rightarrow$ Normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0000 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Peso cria Kg.	- Normalidad CCC: $p = 0.0001 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0046 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Peso al Destete	- Normalidad CCC: $p = 0.0093 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0221 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0000 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Grs/dia Predestete	- Normalidad CCC: $p = 0.7170 \rightarrow$ Normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.3965 \rightarrow$ Normal
	t-test: $p = 0.0000 \rightarrow$ Diferencia significativa
Variable: Gr/dia/IEP	- Normalidad CCC: $p = 0.0042 \rightarrow$ No normal
	- Normalidad CCP: $p = 0.0000 \rightarrow$ No normal
	Mann-Whitney U: $p = 0.0000 \rightarrow$ Diferencia significativa

Fuente: elaboración propia.





Potencial de la pulpa de café como suplemento nutricional en cerdos y gallinas ponedoras: un estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental en el municipio de Pitalito, Huila, Colombia

Resumen

La pulpa de café es un residuo que representa hasta el 45 % del fruto de café; aunque en general esta se convierte en un factor contaminante del ambiente, su importancia radica en el gran potencial que posee como suplemento alimenticio para los sistemas productivos animales. Pese a que existen algunos estudios sobre la pulpa de café en alimentación animal, no los había de forma particular para el caso del municipio de Pitalito, departamento del Huila, Colombia, que hoy en día es una de las regiones con mayores productores de café en el país. El propósito de este estudio fue evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de pulpa de café en dietas de cerdos y gallinas en Pitalito. El enfoque de la investigación fue cuantitativo de tipo experimental en el que la pulpa de café fue procesada mediante deshidratación y ensilaje. Se analizaron muestras en laboratorio certificado y se realizaron dos ensayos de alimentación en campo de sesenta días y cuatro tratamientos en aves de postura. Se reemplazó el alimento comercial en 10 %, 15 % y 20 % frente a un grupo testigo con 100 % de alimento comercial. En cerdos de engorde, se reemplazó 10 %, 20 % y 30 % del alimento comercial contrastado con un testigo al 100 % de alimento comercial. El diseño experimental fue completamente al azar y las variables analizadas fueron porcentaje de postura, peso de los huevos, peso de las gallinas y consumo de alimento, ganancia de peso y consumo de alimento en cerdos. Se realizó análisis ANOVA ($\alpha = 0,05$). El análisis bromatológico de las muestras evidenció valores de 12,1 % y 12,5 % de proteína considerado bueno para un producto vegetal. La producción

de huevo promedio fue de T1 = 82,4 %, T2 = 71,6 %, T3 = 57,6 %, T4 = 94,6 % (testigo). El peso de los huevos, peso de las aves y consumo de alimento por tratamiento presentaron disminución cuanto mayor fue el aporte de pulpa de café en la dieta. La ganancia diaria promedio de peso en cerdos fue de 0,589 kg y tuvo valores similares en todos los tratamientos. El análisis estadístico de las variables mostró que hay diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos de las aves y no significativas entre los tratamientos en cerdos. El uso de harina de cereza de pulpa de café en la alimentación de gallinas de postura afecta la producción, incluso utilizando solo 10 %; mientras que en cerdos de engorde puede utilizarse la pulpa de café ensilada en un valor hasta del 30 % como parte del alimento diario.

Palabras clave: producción agrícola, procesamiento de alimentos, nutrición animal, sostenibilidad.

Abstract

Coffee pulp is a residue that represents up to 45 % of the coffee fruit and generally becomes an environmental pollutant. Its importance lies in its great potential as a food supplement for animal production systems. There are some studies on coffee pulp in animal feed, but none have been conducted in the municipality of Pitalito, Huila, Colombia, which is currently one of the largest coffee producers in Colombia. The objective was to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of using coffee pulp in the diets of pigs and chickens in Pitalito. The research approach was quantitative and experimental, in which coffee pulp was processed by dehydration and ensilage, samples were analyzed in a certified laboratory and two 60-day field feeding trials with four treatments were carried out, in laying hens the commercial feed was replaced by 10 %, 15 % and 20 % compared to a control group with 100 % commercial feed; in fattening pigs replacing 10 %, 20 % and 30 % of the commercial feed contrasted with a control at 100 % commercial feed. The experimental design was completely randomized and the variables analyzed were percentage of laying, egg weight, weight of hens and feed consumption, weight gain and feed consumption in pigs; ANOVA analysis was performed ($\alpha = 0,05$). Bromatological analysis of the samples showed protein values of 12,1 % and 12,5 %, considered good for a plant-based product. Average egg production was T1 = 82,4 %, T2 = 71,6 %, T3 = 57,6 %, T4 = 94,6 % (control); egg weight, bird weight, and feed intake per treatment decreased with greater coffee pulp intake in the diet; the average daily weight gain in pigs was 0,589 kg and had similar values in all treatments. Statistical analysis of the variables showed significant differences ($p > 0,05$) between bird treatments and non-significant differences between pig treatments. The use

of coffee cherry pulp flour in laying hen feed affects production, even when using only 10 %; while in fattening pigs, ensiled coffee pulp can be used in a value of up to 30 % as part of the daily feed.

Keywords: agricultural production, food processing, animal nutrition, sustainability.

Introducción

Colombia es un país de vocación agropecuaria gracias a sus condiciones geográficas, climáticas y topográficas. Entre los productos más destacados se encuentra el café, reconocido internacionalmente por su alta calidad, de cuyo proceso se genera un volumen de alrededor del 45 % que corresponde a la pulpa, la cual tiene gran potencial para alimentación animal. Según la Federación Nacional de Cafeteros (FNC, 2024), Colombia produjo alrededor de catorce millones de sacos de 60 kg de café arábigo suave lavado. Al respecto, el departamento del Huila se ha consolidado como el nuevo eje cafetero de Colombia dado el crecimiento sostenido de su producción y la calidad de su café, destacándose el municipio de Pitalito como mayor productor y ganador frecuente de concursos de calidad de taza (Alcaldía municipal de Pitalito, 2024).

Durante años, la producción de café ha sido la fuente de ingresos más importante para muchas familias colombianas; sin embargo, en este proceso de beneficio se generan grandes volúmenes de pulpa o cereza como subproducto que, en su mayoría, es desechado o gestionado de manera inadecuada, lo que provoca graves afectaciones ambientales en el suelo y en los cuerpos de agua (Fernández et al., 2020).

A nivel internacional, diversos estudios han explorado el aprovechamiento de la pulpa del café en la alimentación animal debido a su contenido nutricional. Serna Jiménez et al. (2018) evaluaron compuestos bioactivos, polifenoles totales y capacidad antioxidante, mientras que Flórez y Rosales (2018) indicaron que mediante el ensilaje se pueden reducir las sustancias no deseables, como la cafeína y los polifenoles. Sobre la utilización en rumiantes de leche, puede incluirse de un 20 a un 40 % del alimento balanceado; en peces un 30 % y en aves y cerdos hasta un 15 %. Por su parte, Noriega et al. (2008) describieron que la inclusión del 15 % en ovinos

no afecta el crecimiento, en conejos hasta un 85 % de pulpa ensilada con melaza, en cerdos 20 % en crecimiento y 15 % en acabado. No obstante, se identifica como vacío de conocimiento la falta de información específica sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de aprovechar la pulpa del café en la alimentación de cerdos y gallinas ponedoras en el contexto particular de Pitalito, Colombia, porque no se han realizado estudios sobre el ensilaje de la pulpa de café ni sobre su deshidratación, así como tampoco se han evidenciado análisis bromatológicos para comprobar el contenido nutricional. En consecuencia, esta carencia limita la implementación de estrategias que permitan transformar este residuo en un recurso útil para la producción pecuaria local.

Por lo tanto, la presente investigación se centró en determinar la factibilidad nutricional económica y ambiental del uso de pulpa de café en dietas de cerdos y gallinas de postura en Pitalito, porque estas especies pueden producirse al lado del cultivo de café. De esta forma, se busca aportar soluciones prácticas para generar valor agregado a un subproducto abundante, diversificar los ingresos de las familias caficultoras mediante proyectos productivos pecuarios y promover prácticas sostenibles que beneficien el entorno y fortalezcan la economía regional.

Este estudio cobra importancia teniendo en cuenta que, de acuerdo con Núñez Torres (2017), en la producción animal la alimentación representa entre el 60 % y el 70 % de los costos. Por ello, el aprovechamiento de la pulpa del café como fuente alternativa puede contribuir de forma significativa a disminuir estos costos, mejorar la competitividad de los productores y, a su vez, reducir la contaminación generada por la disposición inadecuada del residuo.

Materiales y métodos

El enfoque de la investigación fue cuantitativo con un diseño experimental completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos en cada especie animal (diez unidades experimentales por tratamiento en aves y tres unidades experimentales en cerdos).

El desarrollo del trabajo se realizó en dos etapas: en la primera, se evaluó la pulpa de café procesada mediante ensilaje y deshidratación, tomando las muestras para

realizar el análisis químico nutricional con el fin de conocer los valores numéricos de los nutrientes presentes y, así, poder utilizarla como alimento para los animales. El ensilaje se realizó por el sistema tradicional sin aditivos utilizando canecas plásticas para su fermentación y conservación por un período de veintidós días y pH = 4,5. La deshidratación se hizo en secaderos de café tipo camión por un período de catorce días para obtener el producto con no más del 10 % de humedad; este proceso permite la evacuación de la humedad por medio de la evaporación por efecto del aire caliente que se concentra dentro del secadero. Posteriormente, se realizó la molienda en un molino convencional casero con motor eléctrico.

Análisis químico

Las muestras fueron procesadas por el Laboratorio de Química Analítica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) (ver anexos 1 y 2), que cuenta con acreditación del Organismo Nacional de Acreditación (ONAC) vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031 bajo la norma ISO/IEC 17025:2017; en los ensayos de humedad por ISO 6496:2009 NTC 4888:2000; ceniza por la *Association of Analytical Communities* (AOAC) 942.05, vigésima segunda edición, 2023; extracto etéreo por AOAC 2003.06, vigésima segunda edición, 2023; proteína cruda por AOAC 960.52, vigésima segunda edición, 2023. Las muestras fueron analizadas entre el 27 y el 29 de noviembre del 2024.

Evaluación del rendimiento animal

Se llevaron a cabo dos ensayos de campo, uno con gallinas ponedoras semipesadas de veinticinco semanas de vida y en etapa de producción. Se tomaron cuarenta aves con peso vivo entre 1,7 y 1,9 kg cada una, de un grupo de mil gallinas. Se ubicaron de forma aleatoria en grupos de diez animales en cubículos de 1,5 x 1,0 m, contruidos con estructura en madera y cerramiento de malla plástica; posteriormente, se asignaron los tratamientos también al azar, los cuales consistieron en suministro de pulpa de café deshidratada y molida como reemplazo del alimento comercial, así: T1 = 10 %; T2 = 15 % y T3 = 20 % frente a un Testigo al que se suministró 100 % alimento comercial, proceso realizado con similitud al descrito por Yoplac et al. (2017). Las variables evaluadas fueron producción de huevo, peso de

huevo, peso de las gallinas y consumo de alimento. Este ensayo fue realizado entre los meses de noviembre y diciembre del 2024.

El segundo ensayo se realizó con doce cerdos de engorde, animales tipo cruzados de varias razas (no puros) provenientes de una misma camada con peso entre 60 y 65 kg de peso vivo, que se distribuyeron aleatoriamente en cuatro grupos de tres animales cada uno ubicados en corrales de 3,0 x 2,0 m, a los que se asignaron al azar los siguientes tratamientos: T1 = 10 %; T2 = 20 % y T3 = 30 % de pulpa de café ensilada como reemplazo del alimento comercial frente a un testigo al que se suministró solo alimento comercial. Las variables evaluadas fueron ganancia de peso y consumo de alimento.

Por otra parte, el desarrollo del presente trabajo tuvo la aprobación y vigilancia del Comité de Ética en Investigación e Innovación de la UNAD, creado mediante Resolución N° 5173 de 2014 en cumplimiento de la Ley 84 de 1989. El manejo de los animales se hizo bajo las normas de bienestar animal y la observancia de la Ley 576 del 2000.

El análisis de los datos fue realizado mediante estadística descriptiva (ANOVA) y se aplicó la prueba de Tukey para identificar la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos con nivel de significancia ($\alpha = 0,05$).

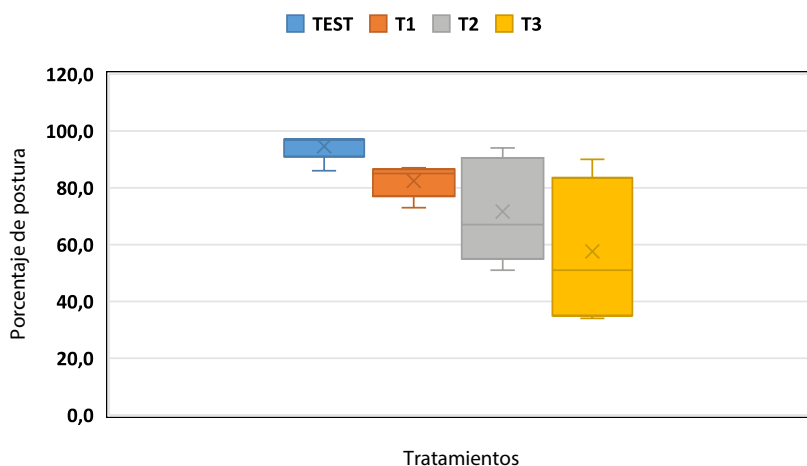
Resultados y discusión

El reporte del análisis químico del laboratorio de Agrosavia evidencia el contenido de nutrientes de cada muestra, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Contenido de nutrientes hallados en las muestras de pulpa de café

Determinación analítica	Unidad	Deshidratada	Ensilada
		Valor	Valor
Determinación de humedad	g/100 g	9,25	80,99
Determinación de ceniza	g/100 g	9,55	9,84
Determinación de extracto etéreo	g/100 g	2,2	3,31
Determinación de proteína cruda	g/100 g	12,51	12,11
Determinación de fibra cruda	g/100 g	14,6	17,6

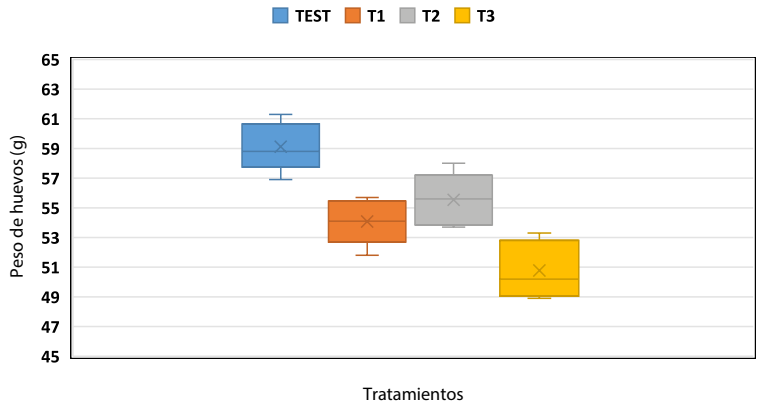
Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Nivel de significancia entre tratamiento para la variable producción de huevos

Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianza para la variable producción de huevo en la gallina dio como resultado que existen diferencias significativas entre los tratamientos, pero al aplicar la prueba de Tukey se evidenció que solo existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el Testigo y T3 (ver figura 2); para los demás tratamientos las diferencias fueron no significativas ($p > 0,05$).

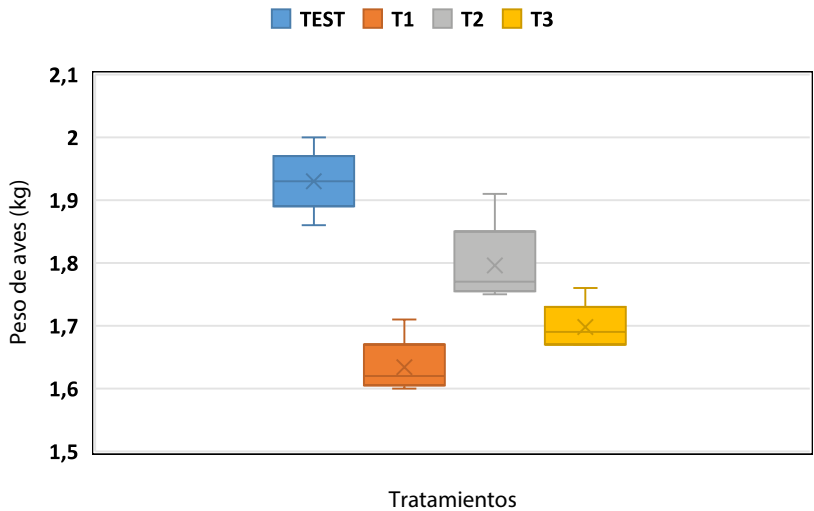
Figura 2. Nivel de significancia entre tratamientos para la variable peso de huevos



Fuente: elaboración propia.

El ANOVA para la variable peso de huevos dio como resultado que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Tras aplicar la prueba de Tukey, se evidenció que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el Testigo y los demás tratamientos, pero no existen diferencias entre T1 y T2.

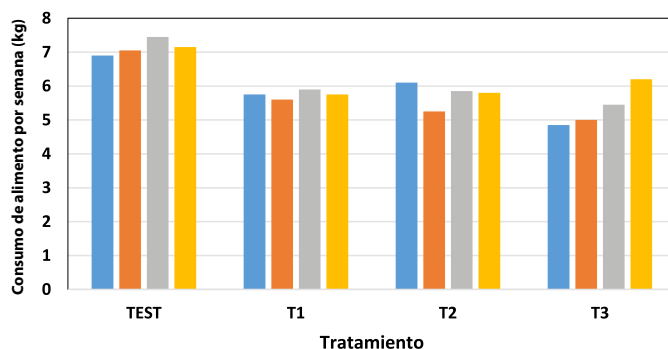
Figura 3. Nivel de significancia entre tratamientos para la variable peso de las aves



Fuente: elaboración propia.

La variable peso de gallinas también mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos; sin embargo, al aplicar la prueba de Tukey, se pudo ver que entre T1 y T3 no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) (ver figura 4).

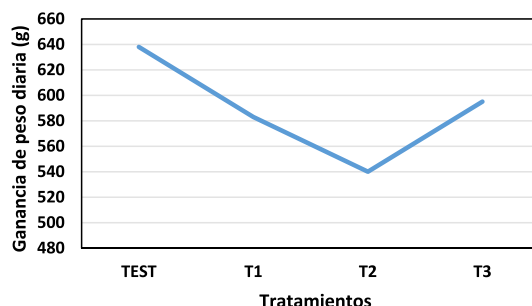
Figura 4. Consumo de alimento por tratamiento en aves por semana (semana 1 a 4)



Fuente: elaboración propia.

Respecto a la evaluación de consumo de alimento por semana y por tratamiento, el análisis por ANOVA arrojó como resultado que existen diferencias significativas ($p < 0,05$); no obstante, al aplicar la prueba de Tukey se evidenció que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el testigo y los demás tratamientos y no significativas ($p > 0,05$) entre T1, T2 y T3 (ver figura 5).

Figura 5. Ganancia diaria promedio de peso (G) por tratamiento en cerdos



Fuente: elaboración propia.

A partir del peso en pie de los cerdos se determinó la ganancia durante el experimento, la cual correspondió a los valores observados en la figura 5 lo que equivale diariamente, por tratamiento y por animal, a los siguientes valores (g): T1 = 583, T2 = 540, T3 = 595, testigo = 638. Se evidencia un valor ligeramente mayor en el grupo testigo, pero al realizar el análisis estadístico, el valor p (0,075) > 0,05; esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ni contra el testigo al nivel del 5 %.

Por otro lado, los valores de los nutrientes encontrados en las muestras de la pulpa de café procesada mediante la técnica de deshidratación y mediante ensilaje tienen coincidencia con los estudios de Braham et al. (2003), Noriega et al. (2008) y Fernández Cortés (2020). Estos nutrientes pueden ser aprovechados por los animales de granja, entre los que se incluyen minerales, proteínas, fibra, carbohidratos y compuestos bioactivos, por lo cual se considera apta para ser utilizada en la alimentación animal en el municipio de Pitalito, Huila. Sin embargo, existe una discordancia con la postura de Garcés Molina et al. (2004), en la cual se reconoce la existencia de microorganismos y factores antinutricionales, como cafeína, polifenoles y fibra que pueden disminuir la calidad nutricional y, en consecuencia, ocasionar desbalance nutricional en el animal, produciendo a su vez una afectación en la producción.

Se esperaba que los resultados de esta investigación fueran más favorables que los de Rodríguez et al. (1994), quienes evaluaron cuatro niveles de pulpa de café también en alimentación de gallinas ponedoras con determinación de parámetros productivos disminuidos. Ahora bien, en la variable peso de huevos se evidenció que en dietas más altas de pulpa de café disminuyó el peso, lo que corrobora lo hallado en el estudio de Acosta et al. (1997), citado por Noriega et al. (2008), en el que alimentaron aves con inclusión de 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 %. En dicho estudio se concluyó que inclusiones altas de pulpa de café ocasionan efecto dañino en la digestibilidad verdadera de la materia seca y en la energía metabolizable del animal debido a los factores antinutricionales ya mencionados, lo cual baja su productividad. En contraposición, Flórez y Rosales (2018) encontraron que en aves y cerdos la alimentación puede llevar hasta un 15 % de pulpa de café, mientras que Yoplac et al. (2017) determinaron que en cuyes la adición de harina de pulpa de café puede suministrarse hasta un 25 % sin que se afecte la ganancia de peso.

Los resultados de este ensayo sugieren que la pulpa de café deshidratada afecta negativamente los parámetros productivos de las aves, principalmente cuando se incluyen en niveles superiores al 10 % en la dieta, posiblemente debido a los factores antinutricionales como los taninos, la cafeína y los polifenoles libres (Yoplac et al., 2017), los cuales solo se hacen digeribles mediante la técnica del ensilaje, pues de esta forma ha sido utilizado para alimentación animal en proporciones hasta del 48 % (Braham et al., 2003).

La pérdida de peso de las aves durante el experimento pudo deberse a la disminución del consumo de alimento y esto, a su vez, pudo causar una deficiencia nutricional o afectación a la digestibilidad, produciendo un deterioro de las funciones vitales, como lo describe Chauca (1997), citado por Yoplac et al. (2017).

De acuerdo con Flórez y Rosales (2018), la pulpa de café tratada mediante el proceso de ensilaje es la mejor forma para su utilización en alimentación animal. A la par, los estudios reportan su mayor uso en especies rumiantes más que en monogástricos. Respecto a su uso en cerdos, hay dos reportes mencionados por Noriega et al. (2008), los cuales corresponden a Braham y Bressani (1978). Estos investigadores ensayaron varias dietas, entre ellas algunas con inclusión de pulpa de café, a partir de lo cual determinaron la no existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. El otro estudio es el de Batista et al. (1999), donde se aplicaron dietas con pulpa de café en proporciones del 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en cerdos en las etapas de levante y ceba, concluyendo que en levante puede utilizarse hasta un 20 % y en ceba hasta 15 % sin que se afecte el proceso productivo.

Por su parte, Bermúdez et al. (2013) concluyeron que la inclusión de pulpa de café en cerdos puede ser hasta del 30 % de la dieta; sin embargo, en esta investigación se determinó que el suministro de este porcentaje (30 %) es viable pese a que se observó falta de aceptación de la pulpa ensilada por parte de los cerdos debido a que se suministró del ensilaje húmedo y sin ningún tipo de aditivo. No obstante, al hacer un suministro con un poco de melaza como aditivo, el consumo mejoró, por lo que es recomendable que al proceso de ensilaje se agreguen aditivos que ayuden al proceso de fermentación y a la palatabilidad para los animales. Al respecto, Encalada et al. (2017) adicionaron urea y melaza al ensilaje de pulpa de café, indicando que esto mejora la digestibilidad *in vitro*, aunque no hubo diferencias significativas entre los tratamientos y tampoco se evaluó la palatabilidad por cuanto no se realizó ensayo *in vivo*. Aun así, para la utilización del ensilaje en

cerdos solo se podría adicionar melaza debido a que esta especie no tiene la capacidad para metabolizar el nitrógeno no proteico como la urea. También, podría realizarse ensayos con la adición de otros productos como los nutracéuticos y probióticos, por ejemplo.

Ahora bien, desde la perspectiva económica y ambiental, debe tenerse en cuenta lo indicado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, a saber, que la producción del 2024 fue de catorce millones de sacos de café almendra. El departamento del Huila consiguió en el 2023 una cosecha de 2 237 400 sacos de café verde (almendra) de 60 kg (Comité Departamental de Cafeteros del Huila, 2023), para lo cual se requieren 839 025 t de fruto fresco (Cenicafé, 2008), de cuyo proceso se generan 365 647,1 t de pulpa de café fresca (Serna Jiménez et al., 2018) que, al ser deshidratada, resultaría en 73 129,42 t de harina de cereza de café para ser utilizada en alimentación animal.

Gran parte de ese volumen es completamente desperdiciado, lo que causa un grave daño ecológico por contaminación al suelo que afecta la microbiota existente y las aguas tanto corrientes como subterráneas (Fernández et al., 2020). Frente a este aspecto, hay una participación importante de la experticia en la formulación de raciones aprovechando los recursos disponibles que, de acuerdo con Núñez Torres (2017), debe hacerse por especie y etapa productiva con el fin de optimizar la producción y disminuir los costos asociados a la alimentación. Todo ello evidencia el gran potencial que representa este residuo para ser aprovechado en forma adecuada como alimento para los animales con miras a fortalecer la eficiencia y rentabilidad para los productores.

Conclusiones

Este estudio demuestra por primera vez la factibilidad de usar harina de pulpa de café deshidratada en la alimentación de gallinas ponedoras en Pitalito, Huila, la cual puede tener una inclusión hasta del 15 % del alimento sin que se afecte estadísticamente el nivel de postura de huevos. Esta afirmación se respalda en el hecho de que no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos.

El ensayo realizado con cerdos de engorde con suministro de pulpa de café ensilada fue favorable por cuanto no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos, incluido el testigo, al que solo se le suministró alimento comercial. Esto indica que, sobre el reporte existente acerca de la utilización del residuo hasta un 15 %, se logró evidenciar en esta investigación que puede ser incluida hasta un 30 % de la dieta alimenticia.

Respecto al factor ambiental, es de amplio conocimiento que en la mayoría de las regiones del mundo donde se produce café la pulpa es un residuo tan abundante que representa alrededor del 40 % del fruto maduro; esto se ha convertido en un gran problema dada a la contaminación del suelo y del agua producto de la deficiente gestión y el poco aprovechamiento del mismo el cual, si se utilizara ampliamente en alimentación animal, podría motivar la diversificación entre los productores con el fin de generar un impacto positivo tanto en la parte ambiental como en el aspecto económico y, por ende, en el desarrollo regional del municipio de Pitalito en Colombia.

Como recomendación orientada a la necesidad de nuevas investigaciones, puede afirmarse que para la utilización de la pulpa de café en la alimentación de gallinas ponedoras se procese primero por medio del ensilaje y, luego se deshidrate para ser incorporada en el alimento de las aves. En cuanto a la preparación del ensilaje para cerdos, conviene evaluar la aplicación de aditivos con el fin de mejorar la palatabilidad y el consumo en los animales.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por su apoyo financiero para el desarrollo del proyecto *Evaluación de la pulpa del café en la alimentación de cerdos y gallinas ponedoras en Pitalito, Huila* mediante la convocatoria N° 12 cohorte 2 - Soluciones innovadoras para un futuro sostenible.

También, un agradecimiento para los productores que participaron en el desarrollo del proyecto, por su colaboración voluntaria e incondicional, lo que permitió la obtención de los resultados registrados en el cuerpo del artículo.

A la estudiante del programa de Zootecnia de la UNAD, quien participó en la ejecución del proyecto de investigación y realizó su opción de grado, dando importantes aportes el presente trabajo y dentro de ello, la coautoría del artículo.

Financiamiento

El proyecto que dio origen al presente artículo fue financiado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) mediante la convocatoria N° 12 cohorte 2 - Soluciones innovadoras para un futuro sostenible. Título: *Evaluación de la pulpa del café en la alimentación de cerdos y gallinas ponedoras en Pitalito, Huila*. Código: PGI5502ECAPMA2024.

Uso de inteligencia artificial

Los autores declaran no haber utilizado la IA para la construcción de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Pitalito Huila. (2024). *Pitalito, un referente mundial en competitividad y café especial*. <https://www.alcaldiapitalito.gov.co/publicaciones/4375/pitalito-un-referente-mundial-en-competitividad-y-cafe-especial/>
- Bermúdez Viña, Y. P., Santos Rivera, J. M. y Poveda Huertas, C. A. (2013). Caracterización organoléptica, química y digestibilidad de ensilajes de cereza de café para cerdos. *Agroforestería Neotropical*, 3, 63-80. https://www.researchgate.net/profile/Mariana-Santos-Rivera/publication/268446781_Caracterizacion_organoleptica_quimica_y_digestibilidad_de_ensilajes_de_cereza_de_cafe_para_cerdos/links/546b8a530cf2397f7831c367/Caracterizacion-organoleptica-quimica-y-digestibilidad-de-ensilajes-de-cereza-de-cafe-para-cerdos.pdf#page=63
- Braham, J., Jarquin, R., González, J. y Bressani, R. (2003). *Pulpa y pergamino de café. III. Utilización de la pulpa de café en forma de ensilaje*. <http://bvssan.incap.int/local/E/E-696.pdf>
- Comité Departamental de Cafeteros del Huila. (2023). *Informe de gestión 2023*.
- Encalada, M., Fernández, P., Jumbo, N. y Quichimbo, A. (2018). Ensilaje de pulpa de café con la aplicación de aditivos en el cantón Loja. *Bosques Latitud Cero*, 7(2), 71-82. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/322>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2024). *Informe mensual de cifras (diciembre)*.
- Fernández Cortés, Y., Sotto Rodríguez, K., Vargas Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Revista Producción + Limpia*, 15 (1), 93-110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000100093

- Flórez Delgado, D. F. (2020). Efecto del tiempo de fermentación sobre la calidad nutricional del ensilaje de pulpa de *Coffea arabica* L. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1-11. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art-1423
- Flórez Delgado, D. F. y Rosales Asensio, E. (2018). Uso del ensilaje de pulpa de café en alimentación animal. *Mundo FESC*, 8(15), 73-82. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6638703>
- Garcés Molina, A. M., Berrío Roa, L., Ruíz Alzate, S., Serna León, J. G. y Builes Arango, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 66-71. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69511010.pdf>
- Montilla Pérez, J., Arcila Pulgarín, J., Aristizábal Loaiza, M., Montoya Restrepo, E., Puerta Quintero, G., Oliveros Tascón, C. y Cadena Gómez, G. (2008). Propiedades físicas y factores de conversión de café en el proceso de beneficio. *Avances Técnicos Cenicafé*, 370, 1-8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf>
- Noriega, S. A., Silva A. R. y García, S. M. (2008). Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*, 26(4), 411-419. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000400001&lng=es&tlng=es.
- Núñez Torres, O. P. (2017). Los costos de la alimentación en la producción pecuaria. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 4(2), 93-94. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2311-25812017000200001&lng=es&tlng=es
- Nutricional del ensilaje de pulpa de *Coffea arabica* L. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1423
- Rodríguez Zelaya, J., Aguirre Rosales, D. y Benavides Rivera, O. (1994). Efecto de cuatro niveles de pulpa de café en alimentación de gallinas ponedoras (iniciación-desarrollo). *Uniciencia II*, 27-35. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/5482/5311>
- Serna Jiménez, J. A., Torres Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K. y Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alterna-

tiva de valorización de subproductos. *Revista ION*, 31(1), 37-42. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>

Yoplac, I., Yalta, J., Vásquez, H. V. y Maicelo, J. L. (2017). Efecto de la alimentación con pulpa de café (*Coffea arabica*) en los índices productivos de cuyes (*Cavia porcellus* L) Raza Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 28(3), 549-560. <https://doi.org/10.15381/rivep.v28i3.13362>

Anexos

Anexo 1. Resultados del análisis químico de la pulpa de café deshidratada y molida

Figura 1. Resultados del análisis químico de la pulpa de café deshidratada y molida

INFORME No.QA24-007042 LEONEL STERLING ROJAS 2024-12-02

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

ONAC

ACREDITADO

ISO/IEC 17025:2017

13-LAB-031

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO

GESTIÓN DE LA AGENDA CORPORATIVA

LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO:

LEONEL STERLING ROJAS

CÉDULA O NIT:

79421798

DIRECCIÓN:

CALLE 3A # 13B-28

DEPARTAMENTO:

HUILA

MUNICIPIO:

PITALITO

TEL, FÍJO/CEL:

3112407153 / 3112407153

TIPO DE ANALISIS:

PROXIMAL

NÚMERO SOLICITUD

CODIGO DE LABORATORIO

QA24-007042

LQAF24-0005017

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN:

CEREZA DE CAFÉ DESHIDRATADA Y MOLIDA

MATRIZ:

ALIMENTOS PARA ANIMALES

VEREDA:

EL DIVISO

FINCA:

BUENAVISTA

FECHA DE TOMA:

21/06/2024 5:00:00 P.M.

EMAIL ENVÍO RESULTADOS:

leonel.sterling@unad.edu.co

ALIMENTO:

SUBPRODUCTOS

N. COMÚN:

CEREZA DEL CAFÉ

N. CIENTIFICO:

NO APLICA

DESC COMPONENTE:

NO INDICA

En la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA contamos con acreditación ONAC, vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, en los ensayos de humedad por ISO 6496:2009 NTC 4888:2000; ceniza por AOAC 942.05, Ed 22nd, 2023; extracto Etéreo por AOAC 2003.06, Ed 22nd, 2023; proteína cruda por AOAC 960.52, Ed 22nd, 2023. Los resultados marcados con (*) se basan en actividades de evaluación de la conformidad no incluidas en el alcance de acreditación.

FECHA DE RECEPCIÓN:

2024-11-26

FECHA DE ANÁLISIS:

DE 2024-11-27 A 2024-11-29

FECHA DE REPORTE:

2024-12-02

Carlos Adolfo Barrera Hernandez (E6991)

Lider de laboratorio

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO.	VALOR
Determinación de humedad	g/100g	ISO 6496:2009 NTC 4888:2000.	9.25
Determinación de ceniza	g/100g	AOAC 942.05, Ed. 22nd, 2023	9.55
Determinación de extracto etéreo	g/100g	AOAC 2003.06, Ed. 22nd, 2023	2.20
Determinación de proteína cruda	g/100g	AOAC 960.52, Ed. 22nd, 2023	12.51
Determinación de fibra cruda	g/100g	GA-R-40 Determinación de fibra cruda en alimentos para animales, versión 4	14.60

Observaciones: Las muestras ingresaron con un tiempo > 15 días. El cliente autoriza su procesamiento.

- La información de la(s) muestra(s) entregada(s) al laboratorio fue(ron) suministrada(s) por el cliente, por tanto, el usuario del servicio es responsable de los datos reportados en relación con cada una de las muestras.

- Los resultados expresados en el informe se obtienen de la muestra tal como fue suministrada por el usuario del servicio.

- El cliente es responsable del muestreo y traslado de muestras al laboratorio, las muestras no son modificadas o alteradas en su composición desde la recepción y sus características son las reflejadas en el análisis.

- Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia.

- Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.

- Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de AGROSAVIA.

- Para peticiones, quejas y solicitudes de información, comuníquese al correo electrónico atencionalcliente@agrosavia.co o a la línea telefónica 018000121515.

FIN DEL INFORME

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Resultados del análisis químico de la pulpa de café ensilada

Figura 2. Resultados del análisis químico de la pulpa de café ensilada

INFORME No. QA24-007042 LEONEL STERLING ROJAS 2024-12-02



Corporación colombiana de investigación agropecuaria



ISO/IEC 17025:2017
13-LAB-031

**REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO**

**GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA**

LABORATORIO DE QUIMICA ANALÍTICA

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO: LEONEL STERLING ROJAS
CÉDULA O NIT: 79421798
DIRECCIÓN: CALLE 3A # 13B-28
DEPARTAMENTO: HUILA
MUNICIPIO: PITALITO
TEL, FIJO/CEL: 3112407153 / 3112407153
TIPO DE ANALISIS: PROXIMAL

NÚMERO SOLICITUD	CODIGO DE LABORATORIO
QA24-007042	LQAF24-0005018

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN: CEREZA DE CAFÉ ENSILADA
MATRIZ: ALIMENTOS PARA ANIMALES
VEREDA: EL DIVISO
FINCA: BUENAVISTA
FECHA DE TOMA: 21/06/2024 5:00:00 P.M.
EMAIL ENVÍO RESULTADOS: leonel.sterling@unad.edu.co

ALIMENTO: SUBPRODUCTOS
N. COMÚN: CEREZA DEL CAFÉ
N. CIENTIFICO: NO APLICA
DESC COMPONENTE: NO INDICA

En la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA contamos con acreditación ONAC, vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, en los ensayos de humedad por ISO 6496:2009 NTC 4888:2000; ceniza por AOAC 942.05, Ed 22nd, 2023; extracto Etéreo por AOAC 2003.06, Ed 22nd, 2023; proteína cruda por AOAC 960.52, Ed 22nd, 2023. Los resultados marcados con (*) se basan en actividades de evaluación de la conformidad no incluidas en el alcance de acreditación.

FECHA DE RECEPCIÓN: 2024-11-26
FECHA DE ANÁLISIS: DE 2024-11-27 A 2024-11-29
FECHA DE REPORTE: 2024-12-02

Carlos Adolfo Barrera Hernandez (E6991)

Lider de laboratorio

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO.	VALOR
Determinación de humedad	g/100g	ISO 6496:2009 NTC 4888:2000.	80.99
Determinación de ceniza	g/100g	AOAC 942.05, Ed. 22nd, 2023	9.84
Determinación de extracto etéreo	g/100g	AOAC 2003.06, Ed. 22nd, 2023	3.31
Determinación de proteína cruda	g/100g	AOAC 960.52, Ed. 22nd, 2023	12.11
Determinación de fibra cruda	g/100g	GA-R-40 Determinación de fibra cruda en alimentos para animales, versión 4	17.60

Observaciones: Las muestras ingresaron con un tiempo > 15 días. El cliente autoriza su procesamiento.

- La Información de la(s) muestra(s) entregada(s) al laboratorio fue(ron) suministrada(s) por el cliente, por tanto, el usuario del servicio es responsable de los datos reportados en relación con cada una de las muestras.
- Los resultados expresados en el informe se obtienen de la muestra tal como fue suministrada por el usuario del servicio.
- El cliente es responsable del muestreo y traslado de muestras al laboratorio, las muestras no son modificadas o alteradas en su composición desde la recepción y sus características son las reflejadas en el análisis.
- Los resultados son validos unicamente para la muestra en referencia.
- Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
- Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de AGROSAVIA.
- Para peticiones, quejas y solicitudes de información, comuníquese al correo electrónico atencionalcliente@agrosavia.co o a la línea telefónica 018000121515.

FIN DEL INFORME

Fuente: elaboración propia.





CAPÍTULO 3

Educación ambiental y salud pública: estrategias de gobernanza hídrica y calidad del aire

- Martha Cecilia Vinasco Guzmán
- Silvia Alejandra Trujillo Zapata
- Nelly María Méndez Pedroza
- Andrés Mauricio Munar Samboní
- Jennifer Tovar Quintero
- Catherine Johana Jaimes Silva
- Jorge Enrique Arboleda Puerta
- Marcelo Noreña Ceballos

Este capítulo integra estudios que vinculan la gestión socioambiental y la salud pública. Desde una visión comparativa, se analiza la implementación de planes de educación ambiental en la cuenca del río Guachicos (Colombia) para destacar su aporte a la gobernanza del agua y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Asimismo, se presenta un análisis bibliométrico sobre los riesgos respiratorios asociados a la inhalación de humo con evidencia ambiental y clínica. Estos aportes ofrecen herramientas encaminadas al fortalecimiento de políticas educativas, prevención de impactos en la salud y promoción de territorios sostenibles y resilientes.





Análisis comparativo de planes de educación ambiental en la gobernanza del agua en la cuenca del río Guachicos (Colombia): una propuesta alineada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Resumen

La gobernanza hídrica en microcuencas estratégicas enfrenta desafíos asociados a la participación social, la justicia ambiental y la sostenibilidad de los recursos hídricos. En la microcuenca del río Guachicos, localizada en Pitalito (Huila, Colombia), estos retos se evidencian en la limitada articulación entre actores institucionales y comunitarios, así como en la persistencia de enfoques de educación ambiental centrados en la transmisión de información más que en la transformación de prácticas y relaciones territoriales. Este artículo analiza críticamente los enfoques convencionales de educación ambiental aplicados a la gestión de microcuencas y examina su potencial contribución al fortalecimiento de la gobernanza hídrica. Para ello, se realizó un estudio de caso basado en la revisión y análisis de dos trabajos de grado desarrollados en la cuenca hidrográfica del río Guarapas, principal fuente de abastecimiento del municipio de Pitalito, con el propósito de identificar brechas conceptuales y metodológicas y proponer un marco de actuación articulado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los resultados evidencian que las estrategias de educación ambiental evaluadas presentan limitaciones relacionadas con la ausencia de indicadores de justicia hídrica, la escasa incorporación de diálogos de saberes entre comunidades e instituciones y una débil consideración de las relaciones de poder que influyen en la gestión territorial del agua. Estas condiciones reducen la capacidad de la educación ambiental para promover cambios sostenibles en las prácticas sociales y en los procesos de gobernanza. Como respuesta, se propone un enfoque

de educación ambiental crítica articulado con los ODS orientado al fortalecimiento de capacidades locales, la apropiación territorial, la participación efectiva y la construcción de acuerdos colectivos para la gestión sostenible del recurso hídrico. Se concluye que la integración entre la justicia hídrica, el diálogo de saberes y los principios de sostenibilidad puede convertir la educación ambiental en un instrumento estratégico para consolidar procesos de gobernanza más inclusivos, equitativos y transformadores en contextos de gestión de microcuencas.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, desarrollo sostenible, gobernanza, justicia hídrica, participación social.

Abstract

Water governance in strategic micro-watersheds faces significant challenges related to social participation, environmental justice, and the sustainable management of water resources. In the Guachicos River micro-watershed, located in Pitalito, Huila, Colombia, these challenges are reflected in the limited articulation between institutional and community stakeholders, as well as in the persistence of environmental education approaches focused primarily on information dissemination rather than on transforming practices and strengthening territorial relationships. This study critically examines conventional environmental education approaches applied to micro-watershed management and evaluates their contribution to strengthening water governance. A case-study methodology was employed based on the review and analysis of two undergraduate research projects conducted within the Guarapas River watershed, the primary water supply source for the municipality of Pitalito. The objective was to identify conceptual and methodological gaps and to propose an integrated framework aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

The findings reveal important limitations in the environmental education strategies assessed, including the absence of water-justice indicators, limited incorporation of knowledge dialogue between communities and institutions, and insufficient consideration of the power relations that shape territorial water management. These shortcomings constrain the potential of environmental education to promote sustainable behavioral change and strengthen governance processes. In response, this study proposes a critical environmental education framework aligned with the SDGs, designed to enhance local capacities, territorial appropriation, effective participation, and collective action for sustainable water-resource management. The study concludes that integrating principles of water justice, knowledge dialogue, and sustainability can transform environmental education into a strategic

instrument for fostering more inclusive, equitable, and transformative water-governance processes in micro-watershed contexts.

Keywords: watershed, sustainable development, governance, water justice, social participation.

Introducción

En la microcuenca del río Guachicos, municipio de Pitalito (Huila), la gobernanza hídrica enfrenta retos de participación y justicia. Este artículo contrasta enfoques convencionales de educación ambiental con perspectivas críticas para identificar brechas y proponer un marco articulado a los ODS como una apuesta para fortalecer la capacidad transformadora de los actores involucrados.

La gobernanza de los recursos hídricos es un desafío por cuanto enfrenta una demanda en el alza y la presión del deterioro ambiental; por ello, la educación ambiental se convierte en una herramienta para pasar de la consciencia a la acción y para que las comunidades se transformen en agentes de conservación.

Por ende, el propósito del artículo es analizar los enfoques tradicionales de la educación ambiental en el contexto de la gestión de microcuencas. Esta investigación parte de la revisión de dos trabajos de grado desarrollados en la cuenca hidrográfica del río Guarapas, que abastece al acueducto de Pitalito, Huila y a través del estudio de caso, donde se busca identificar las brechas de conocimiento para proponer un marco que articule la educación ambiental con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y, de esta manera, potenciar su capacidad transformadora.

Las principales limitaciones identificadas en ambos estudios radican en la ausencia de indicadores de justicia hídrica, así como en la escasa incorporación de diálogos de saberes entre las comunidades involucradas y los actores institucionales participantes. Tales vacíos pueden limitar el alcance de la educación ambiental como eje transformador al disminuir su pertinencia y efectividad en contextos locales y territoriales particularmente sensibles, como los relacionados con la gestión del recurso hídrico.

La investigación se sustenta en un análisis cualitativo orientado a contrastar los enfoques convencionales con los principios de la educación ambiental crítica, la justicia hídrica y el diálogo de saberes en articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible con el fin de formular recomendaciones para el fortalecimiento de estos procesos.

En su desarrollo, se reconoce que los planes de educación ambiental se limitan a campañas informativas que no involucran a las comunidades ni transforman las prácticas cotidianas que deterioran el ambiente. Las brechas encontradas son la falta de consideración de las estructuras de poder del territorio, la falta de consideración de los saberes de las comunidades y de coherencia entre el discurso y las acciones efectivas, lo que genera desconexión entre lo técnico y su aplicación.

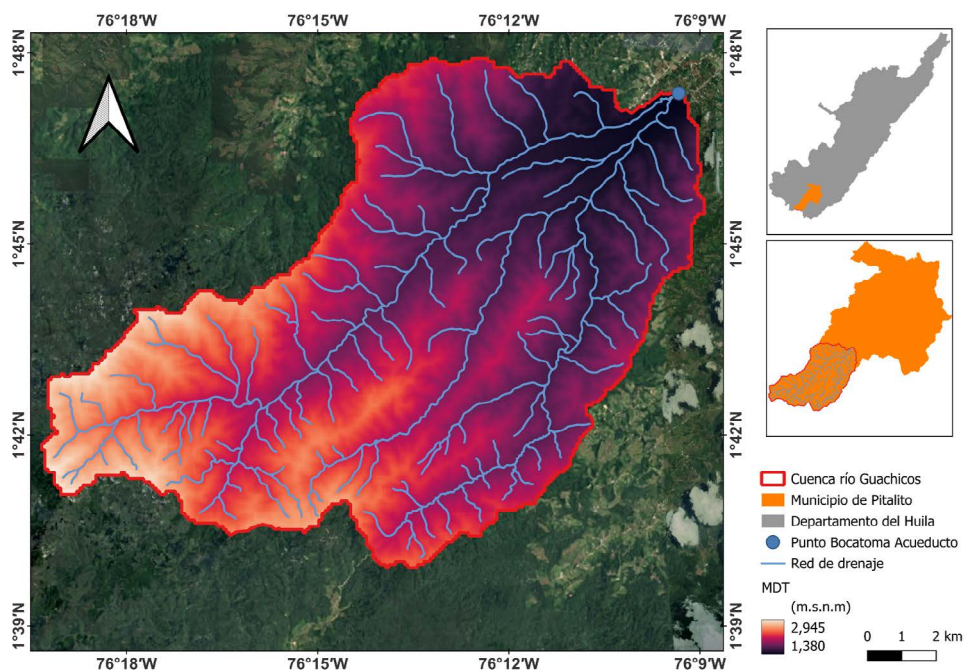
Como resultado, se propone que la educación ambiental debe superar el enfoque informativo y asumir un rol político y pedagógico para proponer modelos que empoderen a las comunidades, promuevan la justicia hídrica y utilicen la articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible para guiar acciones colectivas, medibles y relevantes que conviertan a los habitantes en gestores ambientales de su territorio.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Guachicos, ubicada en el municipio de Pitalito, Huila, representa un nodo crítico para la configuración hidroecológica del sur colombiano (ver figura 1). Su origen en la Reserva Natural El Berlín —ecosistema de bosque muy húmedo y hábitat de especies amenazadas, como la danta de montaña (*Tapirus pinchaque*) y el oso andino (*Tremarctos ornatus*)— le otorga un valor ecosistémico destacado (Sánchez y Acosta, 2015). A lo largo de sus 45 km de recorrido, el río atraviesa áreas rurales intensamente cultivadas, sirviendo como fuente de abastecimiento para el acueducto de Pitalito y diversas veredas, lo que tensiona su funcionalidad ecológica frente a usos antrópicos intensivos (Chavarro Scarpetta, 2019).

Figura 1. Cuenca del río Guachicos, municipio de Pitalito, departamento del Huila, Colombia



Fuente: elaboración propia.

Como respuesta a estas amenazas derivadas de la expansión agrícola, el vertido de aguas residuales sin tratamiento y la gestión inadecuada de los residuos sólidos, la elaboración del Plan de Educación Ambiental Comunitario para la protección del río Guachicos representa una iniciativa de intervención socioeducativa. Esta propuesta, impulsada por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y con posibilidades de articulación institucional con Empitalito E.S.P. fue desarrollada desde un enfoque metodológico participativo que combina técnicas de diagnóstico social, análisis fisicoquímico del agua, elaboración de cartografía comunitaria y una pedagogía ambiental de carácter crítico.

Tipo de investigación

La investigación se enmarca en un enfoque cualitativo, crítico e interpretativo. Su orientación principal es el análisis documental, a partir del cual se busca contrastar los enfoques convencionales de la educación ambiental con perspectivas críticas con el fin de identificar brechas y oportunidades de mejora en el contexto de la gobernanza del agua.

Fuentes de información y criterios de selección

El propósito de esta metodología es analizar los documentos seleccionados a través de estos lentes teóricos para identificar falencias, como la ausencia de indicadores de justicia hídrica o la limitada integración de los saberes comunitarios.

Marco de análisis y fuentes de información

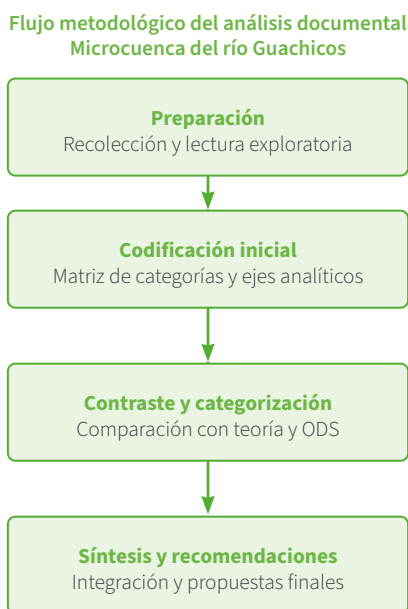
El análisis se fundamenta en tres ejes conceptuales: educación ambiental crítica (Sauvé, 2010), justicia hídrica (Boelens et al., 2018) y diálogo de saberes (Leff, 2015). Las fuentes de información se dividen en dos grupos:

- Fuentes primarias (corpus de análisis). El estudio se centra en el análisis de contenido de dos trabajos de grado desarrollados en la UNAD entre el 2019 y el 2023. Estos fueron seleccionados por cumplir los siguientes criterios: (1) enfoque directo en la microcuenca del río Guachicos, (2) desarrollo de estrategias de educación ambiental para la gestión del recurso hídrico y (3) disponibilidad pública y validación institucional.
- Fuentes secundarias (marco referencial). Para contextualizar el análisis, se revisaron los documentos orientadores de la educación ambiental en Colombia, incluyendo la Política Nacional de Educación Ambiental (PNEA) y los lineamientos para los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental (PROCEDA) y para la planificación territorial, la Herramienta Metodológica para la construcción del Plan de Educación Ambiental Municipal (PEAM).

Procedimiento de análisis de contenido

El proceso metodológico se basó en el análisis de contenido cualitativo (Miles et al., 2014), siguiendo cuatro fases (ver figura 2).

Figura 2. *Flujograma del marco metodológico establecido en el estudio*



Fuente: elaboración propia.

El desarrollo metodológico fue el siguiente:

1. Preparación: recopilación y lectura exploratoria de los documentos seleccionados.
2. Codificación inicial: desarrollo de una matriz de categorías con tres ejes analíticos: enfoques convencionales, principios de educación ambiental crítica y presencia de justicia hídrica y diálogo de saberes.
3. Contraste y categorización: se compararon los hallazgos frente a referentes teóricos y análisis de la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

(ODS) mediante una lista de verificación de metas e indicadores específicos (por ejemplo, meta 6.5 sobre la gestión integrada de los recursos hídricos). La presencia o ausencia de cada aspecto se registró en forma binaria (1 = presente; 0 = ausente) acompañada de notas cualitativas.

4. Síntesis y recomendaciones: se integraron todos los hallazgos para formular recomendaciones y proponer ajustes metodológicos, conceptuales y pedagógicos a los planes de educación ambiental con el fin de fortalecer su capacidad transformadora.

Este estudio reconoce que el análisis documental basado únicamente en dos fuentes limita la validez externa y el alcance de generalización de los hallazgos; en consecuencia, como fase posterior se propone ampliar la investigación mediante entrevistas semiestructuradas a actores institucionales y líderes comunitarios, así como a través de la revisión de instrumentos oficiales de planificación y gestión del recurso hídrico. Entre estos se destaca el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), entendido como el instrumento mediante el cual se orienta la planeación del uso coordinado del suelo, el agua, la flora y la fauna, además del manejo integral de la cuenca con participación de la población del territorio de acuerdo con el Decreto 1076 del 2015. De igual manera, se incorpora el análisis de este Decreto como marco normativo compilatorio del sector ambiente y desarrollo sostenible en Colombia dada su relevancia en la regulación de la gestión ambiental e hídrica. Esta ampliación permitirá fortalecer la triangulación metodológica y enriquecer el análisis del soporte legal e institucional que enmarca los procesos de educación ambiental vinculados con la gestión del agua en los territorios.

Planteamiento del problema

La visión del Plan Nacional de Desarrollo, que establece como eje de transformación el “ordenamiento del territorio alrededor del agua y justicia ambiental” se alinea de forma directa con los desafíos presentados en la microcuenca del río Guachicos en Pitalito, Huila, donde la gobernanza hídrica enfrenta retos de participación y justicia. En este contexto, la educación ambiental se postula como una herramienta estratégica para que las comunidades pasen de la consciencia a la acción y se conviertan en agentes de conservación.

De este modo, se busca que la educación ambiental sea el motor que impulse a nivel local la materialización de una justicia ambiental y un ordenamiento territorial centrado en el agua, tal como lo proyecta la política nacional.

En Colombia, documentos como el CONPES 3810 —enfocado en el suministro de agua potable en zonas rurales— reconocen la importancia de vincular a la comunidad en los procesos de conservación de fuentes hídricas; sin embargo, advierten sobre las dificultades en la participación efectiva de la ciudadanía en la definición de alternativas, su gestión y la búsqueda de soluciones sostenibles (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014).

Esta situación se agudiza en las zonas rurales y periurbanas en Colombia, que se abastecen y dependen de fuentes hídricas sometidas a fuertes presiones antrópicas relacionadas con muchas causas, p. ej., la agricultura sin planificación, los vertimientos urbanos e industriales no tratados, la ganadería extensiva y la falta de regulación en el uso del agua (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [Cornare], 2015).

Con frecuencia, las acciones de educación ambiental se reducen a actividades puntuales, como campañas de reforestación, reciclaje o ahorro de agua que, aunque valiosas, no suelen articularse con los procesos de gestión ambiental territorial ni con instancias institucionales que favorezcan la toma de decisiones o promuevan la corresponsabilidad.

Al respecto, los Planes de Educación Ambiental (PEA) representan un instrumento estratégico para transformar este enfoque fragmentado. Se trata de herramientas para la planificación que, a nivel local, regional o nacional estructuran acciones con el fin de fomentar una cultura ambiental. Programas como Guardianes del Agua o iniciativas de recolección de tapas, pilas, baterías, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), así como caminatas ecológicas o jornadas de siembra de árboles ilustran cómo los PEA pueden sensibilizar especialmente a niños, niñas y jóvenes en torno al uso responsable del agua y su conservación (Henao, 2021). Estos planes permiten traducir los grandes objetivos de la Agenda 2030 en acciones concretas y participativas en las que se involucran a escuelas, comunidades y autoridades locales en la solución de los problemas ambientales que les afectan directamente (ONU Agua, 2021).

De forma particular, los planes de educación ambiental permiten diseñar estrategias que promuevan la consciencia crítica y la acción participativa que articule las escuelas, las comunidades y los actores institucionales en la gestión sostenible de microcuencas abastecedoras; ello con el fin de fortalecer capacidades técnicas, políticas y ciudadanas para el cuidado del recurso hídrico.

Como resultado, en esta revisión se propone que, para superar la crisis global del agua y avanzar en el cumplimiento del ODS 6 no basta con políticas macroestructurales; se requiere además una acción local, coordinada y consciente en la que los planes de educación ambiental (PAE) se constituyan en vehículos eficaces para formar una ciudadanía comprometida y capaz de transformar su realidad, contribuyendo al desarrollo sostenible desde lo cotidiano.

Entonces, el presente artículo busca precisamente analizar los enfoques tradicionales de la educación ambiental para identificar brechas, como la ausencia de indicadores de justicia hídrica y la limitada integración de saberes locales para, de esta manera, proponer un marco articulado a los ODS que fortalezca la capacidad transformadora de los actores involucrados.

Los ODS como hoja de ruta de la educación ambiental

En el marco de la Agenda 2030, la gestión sostenible del agua y la educación de calidad son pilares interconectados que promueven el bienestar humano y la resiliencia ambiental. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos, mientras que el ODS 4 enfatiza una educación inclusiva, equitativa y de calidad con una meta específica (4.7) orientada a que todos los educandos adquieran los conocimientos necesarios para promover el desarrollo sostenible (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015). En este contexto, la educación ambiental se configura como un componente clave para articular ambos objetivos al promover valores, actitudes y prácticas tendientes a la protección de los ecosistemas hídricos, especialmente en territorios donde el acceso al agua potable está condicionado por factores geográficos, sociales y políticos.

Esto debido a que Colombia enfrenta una creciente presión sobre sus ecosistemas acuáticos producto de fenómenos como la deforestación, la expansión agrícola, la

minería legal e ilegal y la variabilidad climática. Estas presiones afectan de forma desproporcionada a comunidades rurales y periurbanas. Cerca del 26 % de los municipios colombianos presentan algún nivel de estrés hídrico, siendo las regiones más impactadas aquellas con mayores índices de vulnerabilidad socioeconómica (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2021).

Ante este panorama, resulta evidente que una educación ambiental limitada a enfoques informativos o centrados únicamente en el cambio de conductas individuales es insuficiente. La magnitud y complejidad de la crisis hídrica demanda una educación transformadora que incorpore metodologías participativas, interculturales y contextualizadas capaces de promover el empoderamiento comunitario y fortalecer la gobernanza local del agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Diversos estudios han demostrado que los procesos educativos con enfoque territorial e inclusivo que integran el conocimiento científico con los saberes locales pueden fortalecer las capacidades de comunidades para conservar y restaurar fuentes hídricas. Estrategias como la cartografía social, la ciencia ciudadana y los monitoreos comunitarios se han utilizado con éxito en contextos rurales para fomentar la apropiación social del conocimiento ambiental y la acción colectiva (Aya Cárdenas, 2021).

Por lo anterior, resulta urgente transitar de una educación ambiental centrada exclusivamente en la concienciación hacia una educación para la transformación ecosocial, la cual, por lo demás, debe articular los ODS con procesos locales de defensa del agua como bien común; esto con el fin de promover una ciudadanía activa, crítica y corresponsable frente a los desafíos socioambientales contemporáneos.

Marco conceptual

Microcuenca como unidad pedagógica y de gestión

Una microcuenca es un sistema de aguas superficiales que tributan a un caudal continuo o intermitente y que desembocan en un cuerpo de agua de mayor volumen, como un río principal o el mar (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012). El manejo ambiental de una microcuenca es sistémico, puesto que tiene una naturaleza compleja que involucra múltiples actores sociales, económicos y ambientales, la disponibilidad de recursos y la calidad de vida de los habitantes.

Algunos de los impactos que afectan las microcuencas y que generan repercusiones en la disponibilidad del recurso hídrico involucran desequilibrios físicos, químicos y biológicos, degradación de aguas y suelos, falta de acceso o disminución de la disponibilidad de recursos naturales, así como la existencia de amenazas por la mala gestión o por desastres naturales y afectación de las fuentes abastecedoras de los acueductos, entre otros aspectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Aunque en los documentos de orientación para la construcción de planes de manejo ambiental de las microcuencas se menciona el componente sociocultural —donde se debe indagar sobre las costumbres y usos relacionados con el uso del agua—, no se hace énfasis en el involucramiento de la comunidad para garantizar que se dé continuidad a las buenas prácticas del uso del agua.

La microcuenca se concibe no solo como un sistema hídrico que es objeto de planificación, sino como un territorio social, cultural y político (Leff, 2006; Boelens, 2014a). Su escala manejable debe permitir la integración de conocimientos técnicos con prácticas cotidianas del uso del agua.

Educación ambiental crítica

En los enfoques tradicionales de educación ambiental (EA) prevalece una perspectiva centrada en la transmisión de información: campañas del tipo “ahorra agua” o “protege el río” que privilegian conocimientos teóricos sobre pautas correctas de comportamiento. Sin embargo, la falencia más significativa de dichos modelos es su desconocimiento contextual porque, precisamente, desconocen las estructuras de poder, las dinámicas locales y las barreras socioeconómicas que determinan la viabilidad de cualquier acción ambiental. Al analizar la evolución de la EA, García Díaz (2002) señala que “una perspectiva asociacionista promueve la transmisión de respuestas ya dadas, mientras que los modelos críticos requieren problematización en contextos reales” (p. 125). Esto confirma que la acumulación de conocimiento comunitario no trasciende si las condiciones materiales y las estructuras de poder que perpetúan el problema permanecen intactas.

En contextos vulnerables —como zonas rurales de Colombia—, la EA informativa puede generar conocimiento, pero no fomenta la capacidad real de las personas para intervenir. Sobre esto, en un estudio sobre el Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) en Colombia se observó que, aunque los estudiantes consolidaron saberes ecológicos, no desarrollaron acciones comunitarias sostenibles debido a la falta de participación real y oportunidades para ejercer. Entretanto, Leal Pérez et al. (2022) afirman que la educación para una ciudadanía ambiental debe empoderar a los sujetos, no solo instruirlos; es decir, la EA convencional, desprovista de mecanismos para la apropiación de saberes situados o el ejercicio del poder local tiene como alcance una mera declaración de buenas intenciones.

Frente a este panorama, este artículo postula que los enfoques convencionales de EA centrados en la mera difusión son insuficientes para alcanzar un cambio real, pues estos modelos generan consciencia, pero no agencia. Para superar esa limitación, es preciso promover una EA crítica que integre saberes locales, análisis de las estructuras de poder y estrategias de acción comunitaria. Como sugiere el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM) del Ministerio de Medio Ambiente de España (2011), transitar hacia una EA integradora implica pasar de la persuasión socioambiental a la experiencia estética para generar herramientas de análisis y acción frente a la realidad. Es necesario, por tanto, reconstruir la EA sobre

las bases de una pedagogía situada y relacional, cuyo éxito se mida por su capacidad de impulsar acciones colectivas contextualmente relevantes.

Ausencia de metodologías para respetar el diálogo de saberes

Los planes de educación ambiental tienen una desconexión entre lo que se plantea de manera técnica y el desconocimiento de los saberes ancestrales y tradicionales de los campesinos. Con frecuencia, las consultas a las comunidades se reducen a un ejercicio de “escucha” cuyos resultados rara vez se integran en los documentos técnicos que, en última instancia, definen las intervenciones en sus territorios.

La relevancia de considerar los conocimientos comunitarios es planteada por autores como Enrique Leff, quien invita a reflexionar sobre el tema:

El diálogo de saberes no puede ser un mero encuentro superficial entre conocimientos distintos, sino una práctica política y epistémica que cuestione las jerarquías del saber y permita la articulación real de los saberes locales y científicos en igualdad de condiciones. (Leff, 2014, p. 63)

La ausencia de metodologías para la formulación de planes impide que se logre un diálogo de saberes donde el conocimiento ancestral, local y campesino sobre el agua se integre con el conocimiento técnico, por lo que solo se presenta “el trámite” sin integrarlo realmente a la toma de decisiones.

Dicha brecha solo puede superarse mediante el diseño de procesos participativos que aseguren la coconstrucción y validación del conocimiento entre todos los actores. La incorporación activa de los saberes locales es, en definitiva, la única vía para generar un compromiso comunitario genuino con la implementación de los planes.

Educación ambiental y justicia hídrica

Aunque el agua es un derecho humano, su acceso está cada vez más restringido. La creciente dificultad para disponer de este recurso tanto para el consumo como

para la producción de alimentos, bienes o servicios se vincula directamente con las relaciones de poder que controlan su distribución y gestión (UNESCO, 2021).

A nivel local, el marco normativo colombiano sienta las bases para la educación ambiental (EA). Inicialmente, los artículos 67 y 79 de la Constitución Política de 1991 la enmarca como una educación para el respeto de los derechos humanos y la protección del ambiente. Más adelante, la Política Nacional de Educación Ambiental (Ley 1549 de 2012) la definió formalmente como un proceso dinámico y participativo. El objetivo de esta política es capacitar a los ciudadanos para que comprendan las problemáticas de su entorno y desarrollen propuestas de transformación con las cuales puedan aspirar a la construcción de sociedades más justas y sustentables.

En ese marco, se debe considerar la justicia hídrica, que puede entenderse como “la equidad en la distribución, acceso y gobernanza del agua, reconociendo los derechos humanos, las diversidades culturales, los contextos ecológicos y las relaciones de poder que determinan quién controla y se beneficia del recurso” (Boelens, 2014b, p. 143).

Por tanto, alcanzar la justicia social y ambiental depende de procesos de integración, participación y de una distribución equitativa. Además, dicha distribución debe abarcar no solo los recursos ambientales y materiales, sino también las riquezas y particularidades culturales que garantizan una vida digna para los habitantes de un territorio (Boelens y Zwarteveen, 2015). En Colombia —y en el mundo—, el acceso desigual a los recursos naturales y en especial al agua genera conflictos sociales lo que, a su vez, crea disputas territoriales a diversas escalas y profundiza la inequidad.

Por otra parte, la literatura académica evidencia que el acceso al agua está plagado de desafíos legales, con obstáculos que incluyen desde trámites burocráticos complejos y costosos para muchas comunidades hasta prolongados litigios que involucran intereses diversos, disputas vecinales y debates sobre la ética del derecho a la producción de alimentos o a la conservación de las condiciones de vida (Ballester, 2019). Otra consideración importante es que, en Colombia, el acceso al agua es un tema que une a las comunidades por cuanto en las regiones rurales se comparten intereses relacionados con el derecho al agua, los acueductos comunitarios o los distritos de riego.

Resultados y discusión

Revisión de la metodología para la formulación de los planes de educación ambiental institucionales en Colombia

La Política Nacional de Educación Ambiental (PNEA) se constituye como el marco rector y conceptual que orienta todas las acciones en esta materia en Colombia, para lo cual establece una visión de país con una cultura ambiental ética, responsable y respetuosa de la diversidad. Su principal conclusión es la necesidad de superar los enfoques reduccionistas y desarticulados para, en cambio, proponer una concepción sistémica del ambiente que integra las dimensiones natural, social y cultural (Ministerio de Ambiente, 2019).

El marco conceptual y estratégico para la educación ambiental en Colombia se encuentra cimentado en la Política Nacional de Educación Ambiental, un esfuerzo conjunto de los Ministerios de Ambiente y Educación para unificar criterios y orientar las acciones en todo el territorio nacional. En su momento, este documento fundacional realizó un diagnóstico que identificó los nudos críticos que limitaban la efectividad de las iniciativas ambientales, entre ellos la ausencia de una conceptualización clara, la descontextualización de las acciones respecto a las realidades locales, una visión reducida a lo ecológico y la desarticulación entre los actores del Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Para superar estas fallas, la PNEA propuso una visión sistémica del ambiente y estableció como estrategias centrales los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) y los Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental (PROCEDA). A pesar de que esta política sentó las bases para una educación ambiental crítica y contextualizada hace ya varias décadas, el presente estudio sobre la microcuenca del río Guachicos evalúa la persistencia de estas mismas brechas, cuestionando no tanto la validez de la política, sino la efectividad de su implementación en los territorios.

A nivel institucional, el marco para la planificación de la educación ambiental en Colombia es guiado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el cual ha desarrollado una herramienta metodológica para la construcción del

Plan de Educación Ambiental Municipal (PEAM). Este documento define al PEAM como un instrumento de planificación construido de manera participativa por la comunidad con la asesoría del Comité Interinstitucional de Educación Ambiental (CIDEA) con el fin de transformar la cultura local y mitigar las problemáticas ambientales (MADS, 2020a).

La metodología propuesta se fundamenta en principios como la investigación acción participación (IAP) y el diálogo de saberes, partiendo de un diagnóstico que integra los instrumentos de planificación existentes en el municipio, como los planes de ordenamiento territorial (POT) y los planes de desarrollo municipal (PDM). Si bien este marco oficial busca institucionalizar la Política Nacional de Educación Ambiental y fortalecer la gestión local, el presente artículo analiza las brechas que surgen entre esta directriz metodológica y su implementación real en territorios específicos, donde los enfoques críticos y el diálogo de saberes genuino enfrentan barreras significativas.

Los *Lineamientos para la gestión del PROCEDA en Colombia* (Proyecto Ciudadano de Educación Ambiental - PROCEDA) establecen un marco metodológico integral y estructurado para el desarrollo de Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental en contextos no formales. Su principal conclusión es que para lograr una transformación cultural y mitigar las problemáticas ambientales, estos proyectos deben gestionarse siguiendo un ciclo de vida riguroso de cinco fases: inicio, planificación, ejecución, monitoreo y control, y cierre (MADS, 2020b).

El documento subraya que el éxito de los PROCEDA depende de la articulación de una participación ciudadana activa, un “diálogo de saberes” genuino y una gestión sistémica que permita a las comunidades apropiarse de sus realidades y convertirse en agentes de cambio. Finalmente, se concluye que la sostenibilidad de estas iniciativas se garantiza al vincularlas con instrumentos de planificación territorial y marcos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de Escazú, asegurando así su legitimidad, gobernanza y potencial de financiación.

Aunque el documento es una guía exhaustiva, un análisis crítico revela varias limitaciones y sesgos implícitos. Primero, presenta un sesgo tecnocrático y gerencial al estructurar los proyectos comunitarios bajo metodologías formales de gestión de proyectos como PMBOK y Prince. Este enfoque puede resultar excesivamente complejo y burocrático para organizaciones de base y comunidades sin formación

técnica. Segundo, su visión de la participación ciudadana es idealizada; si bien la promueve ampliamente, la presenta como un paso gestionable dentro de un plan, sin abordar a fondo los conflictos y las asimetrías de poder que a menudo obstaculizan un diálogo de saberes genuino en la práctica.

Tercero, aunque detalla múltiples fuentes de financiación, el documento las expone como posibilidades, colocando la carga de la gestión de recursos sobre las comunidades, lo que representa una limitación práctica significativa para la sostenibilidad de los proyectos. Además, el documento asume que las comunidades y entidades locales poseen las capacidades técnicas y administrativas para llevar a cabo todo el ciclo del proyecto, desde el diagnóstico hasta la sistematización, una suposición que puede no corresponder con la realidad de muchos territorios.

La estrategia por excelencia para la incorporación de la dimensión ambiental en el sistema educativo formal de Colombia es el Proyecto Ambiental Escolar (PRAE), cuyo enfoque ha sido objeto de revisión por parte del mismo gobierno.

El documento *Resignificación de los Proyectos Ambientales Escolares PRAE* concluye que para que la educación ambiental sea una fuerza transformadora en el sistema educativo formal, los PRAE deben superar su concepción como actividades aisladas y convertirse en ejes transversales de la vida escolar. Esta “resignificación” implica un cambio profundo que parte de superar obstáculos históricos como la desarticulación curricular y la falta de formación docente. La conclusión central es que un PRAE significativo debe fundamentarse en una visión sistémica y compleja del ambiente, fomentar la investigación y el pensamiento crítico, y estar profundamente integrado en el Proyecto Educativo Institucional (PEI). Finalmente, se subraya la necesidad de adoptar enfoques pedagógicos basados en el diálogo de saberes y la interculturalidad, incluyendo la etnoeducación, para formar una ciudadanía con una nueva ética ambiental orientada a la sustentabilidad de la vida (MADS, 2021).

A pesar de su valioso aporte conceptual, el documento presenta limitaciones y sesgos inherentes a su enfoque. Exhibe un sesgo académico y filosófico, utilizando un lenguaje denso (hermenéutica, epistemología ambiental, sustentabilidad) que puede resultar poco accesible para los docentes y directivos que deben implementar los PRAE en el día a día. Además, el documento presenta una limitación metodológica, ya que se enfoca más en el porqué de la resignificación que en el

cómo hacerlo; ofrece principios y criterios, pero no una hoja de ruta práctica o un conjunto de herramientas didácticas claras para que una institución educativa rediseñe su proyecto.

De igual forma, para la implementación del plan se parte de una visión idealizada de la institución escolar, con lo cual se asume una flexibilidad curricular y una voluntad para el trabajo interdisciplinario que a menudo choca con las estructuras administrativas y académicas del sistema educativo, y si bien reconoce la falta de formación docente como un obstáculo, impone sobre los maestros una gran responsabilidad para que actúen como investigadores y pedagogos críticos sin detallar los apoyos institucionales necesarios para superar las limitaciones de tiempo y recursos que enfrentan.

El caso del río Guachicos como punto de partida

La investigación desarrollada se centra en un contexto territorial marcado por múltiples presiones socioambientales derivadas del uso intensivo del suelo, la expansión de la frontera agrícola y la débil gobernanza del recurso hídrico. En este escenario, el corregimiento de Bruselas —cuenca media del río Guachicos— presenta un patrón típico de ruralidad dispersa, con alta dependencia del café como eje económico y limitada infraestructura para el saneamiento básico. A pesar de que el río Guachicos abastece a más de veinticuatro mil quinientos habitantes a través del sistema de acueducto municipal (Empitalito, 2023), su entorno enfrenta condiciones que generan preocupación creciente en la comunidad y en los actores institucionales.

Si bien los estudios de calidad del agua han reportado un estado aún aceptable en la mayoría de los puntos de muestreo, se advierte una vulnerabilidad progresiva ante amenazas latentes, como los vertimientos domésticos no tratados y los residuos generados por el beneficio del café (Chávarro Scarpetta, 2019). Esta situación ha motivado la formulación de estrategias preventivas basadas en la educación ambiental como herramienta para fortalecer la consciencia ciudadana, fomentar el sentido de corresponsabilidad y promover procesos participativos de protección del recurso hídrico. Así, se reconoce el potencial de la educación ambiental no solo como medio de sensibilización, sino como mecanismo clave para consolidar una gobernanza local del agua más sólida e inclusiva.

Para entender la compleja interacción entre los aspectos sociales y ambientales del río Guachicos, así como sus implicaciones en la educación ambiental comunitaria resulta esencial integrar el análisis técnico con un diagnóstico social. En este sentido, la investigación realizada por Chávarro Scarpetta (2019) abordó la percepción de los habitantes de las veredas El Porvenir, Bombonal y La Palma, evidenciando que el 98 % de los encuestados considera el río como un elemento valioso apreciado por su relevancia en actividades cotidianas como la recreación, el paisaje y el abastecimiento de agua.

Sin embargo, se presentan importantes vacíos en el conocimiento ecológico básico: el 41 % desconocía el lugar de origen del río y el 67 % ignoraba su desembocadura, lo cual refleja una desconexión entre el uso del recurso y la comprensión de su dinámica territorial. Aunque el 84 % afirmó sentirse afectado por la contaminación del río, solo una minoría reconoció sus propias acciones (como los vertimientos domésticos o el procesamiento del café) como parte del problema, lo que pone de manifiesto la necesidad de impulsar procesos educativos que promuevan una consciencia crítica y una reflexión colectiva sobre el impacto antrópico.

Considerando lo anterior, se diseñó un plan de educación ambiental estructurado en módulos temáticos, cuya implementación inicial fue bien recibida: todos los participantes lograron responder correctamente en la evaluación posterior, lo que evidenció una alta asimilación de los contenidos.

La comprensión de la dinámica socioambiental del río Guachicos requiere integrar el análisis técnico con un diagnóstico social que permita identificar percepciones, conocimientos y prácticas de las comunidades locales. En este sentido, el estudio desarrollado por Chávarro Scarpetta (2019) analizó la percepción de los habitantes de las veredas El Porvenir, Bombonal y La Palma, encontrando que el 98 % de los encuestados considera el río como un recurso valioso debido a su importancia para la recreación, el paisaje y el abastecimiento de agua.

De forma complementaria, Cruz Ospina y Ortega Astudillo (2020) desarrollaron un estudio técnico que caracterizó fisicoquímicamente los afluentes del río Guachicos. Esta investigación permitió sustentar empíricamente los hallazgos sociales al aportar evidencia sobre la calidad del agua y las fuentes de contaminación.

Los resultados de los índices de calidad de agua —donde valores más cercanos a 1 indican mejor calidad— revelaron que la mayoría de las fuentes presentaban una calidad “regular” (ICA entre 0,50 y 0,54), mientras que la quebrada La Maralla registró un nivel crítico de contaminación (ICA de 0,33), que se puede atribuir a vertimientos domésticos y residuos del beneficio del café.

Respecto a los índices de contaminación (ICO), se identificó baja mineralización y escasos sólidos suspendidos. Sin embargo, se evidenció una elevada carga orgánica, con la medición del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) en todos los puntos de muestreo, lo cual indica la presencia de desechos humanos y animales, aceites, grasas y plaguicidas.

El índice de contaminación trófico (ICOTRO) reveló condiciones de hipereutrofia en quebradas como El Roble debido al exceso de fósforo asociado al uso intensivo de fertilizantes. Estos hallazgos apuntan al carácter antropogénico de la contaminación y refuerzan la necesidad de estrategias educativas enfocadas en prácticas agrícolas sostenibles y en la gestión adecuada de residuos y aguas residuales.

Si bien los proyectos analizados cumplen con las directrices convencionales de los planes de educación ambiental desarrollados como ejercicios académicos y mantienen una estructura semejante a la de los planes institucionales originales, presentan potencial para ser optimizados mediante la incorporación de aspectos vinculados a la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), lo que posibilita trascender las prácticas tradicionales.

Adicionalmente, la elaboración de trabajos académicos aportan a la validación de las fuentes de contaminación de los recursos hídricos y sirven a las instituciones para diseñar estrategias de educación ambiental respaldadas por evidencia científica, enfocándose en la gestión sostenible de las actividades productivas y domésticas de las comunidades que ocupan las microcuencas, aprovechando el conocimiento técnico y la acción de las comunidades en la protección de los ecosistemas.

Análisis de los planes propuestos

Un examen de los planes de educación ambiental propuestos para la microcuenca del río Guachicos evidencia tres brechas fundamentales que limitan su potencial transformador. Primero, la falta de una perspectiva de educación ambiental crítica; segundo, el desconocimiento de las relaciones de poder que configuran el territorio y tercero, la carencia de metodologías que faciliten un auténtico diálogo de saberes. Este diagnóstico nos permite identificar ejes temáticos comunes y formular directrices para fortalecer el diseño e implementación de intervenciones futuras.

Falta de consideración de las relaciones de poder

Autores como González Gaudiano (2007) muestran cómo la educación ambiental promovida desde el norte global se enfoca en discursos como el ahorro individual de agua y discursos de conservación, que ignoran que las causas de la degradación ambiental son la pobreza y la desigualdad en las comunidades y las regiones.

En ese sentido, se considera que la educación ambiental debe incorporar los conceptos de política y pedagogía con el fin de que no solo se conozca la información, sino que pueda estar en condiciones de realizar acciones comprometidas y asumir una posición que le permita ejercer una participación política que incide en lo que ocurre en sus territorios (Sauvé, 2004).

Por lo general, los planes de educación ambiental no tienen consideraciones políticas, puesto que no abordan los actores que acceden al agua y en cuáles condiciones o no tienen en cuenta las dinámicas de poder económico o político; es decir, no se considera si hay debilidad institucional en el territorio, si hay industrias extractivas o contaminantes, agronegocios intensivos o acaparamiento de tierras que tengan el manejo sobre los recursos (Robbins, 2019).

Este enfoque no considera que las desigualdades en acceso y control del agua no son por falta de información, sino que evidencian realidades injustas que requieren un análisis crítico y acciones colectivas desde el plano comunitario.

Ausencia de metodologías para respetar el diálogo de saberes

Los planes de educación ambiental tienen una desconexión entre lo que se plantea de manera técnica y el desconocimiento de los saberes ancestrales y tradicionales de los campesinos. A menudo, las consultas a las comunidades se reducen a un ejercicio de “escucha”, cuyos resultados rara vez se integran en los documentos técnicos que, en última instancia, definen las intervenciones en sus territorios.

Brecha en las prácticas de conservación

Mientras que la investigación de Chávarro Scarpetta (2019) estableció la percepción positiva y la disposición comunitaria hacia la conservación, así como la capacidad de asimilar información ambiental, el estudio de Cruz Ospina y Ortega Astudillo (2020) aportó la evidencia de los contaminantes (materia orgánica y fósforo) y sus fuentes directas (aguas residuales domésticas y de procesamiento de café, además de fertilizantes agrícolas).

La brecha no solo reside en la falta de conocimiento, sino en la necesidad de transformar ese conocimiento en acciones efectivas que modifiquen las prácticas y costumbres arraigadas en las comunidades. Este desafío se agrava por dos factores adicionales: un profundo desconocimiento dentro de las propias comunidades sobre las iniciativas de conservación que otros actores ya implementan en el territorio; y la ausencia de un sistema de medición y seguimiento riguroso de los parámetros de calidad del agua.

Esto presenta el desafío de generar datos científicos que, al ser socializados, informen a las comunidades y, además, fomenten la adopción de prácticas ambientales que impacten su realidad socioeconómica y su calidad de vida al empoderarlas en los procesos de conservación y visibilizar sus esfuerzos.

Esta brecha va más allá de la mera falta de información” y se adentra en la necesidad de transformar el conocimiento en un cambio de comportamiento efectivo y sostenido. La formulación y socialización de un plan, aunque positiva, no garantiza por sí misma la modificación de prácticas arraigadas. La ausencia de conocimiento sobre “acciones de conservación que se estén adelantando actualmente” por parte de la comunidad también subraya la necesidad de una mayor integración y visibilidad de

los esfuerzos entre los actores involucrados. Es decir, el desafío radica en cómo traducir los datos científicos en estrategias educativas que no solo informen, sino que inspiren y faciliten la adopción de prácticas más sostenibles que aborden directamente los contaminantes específicos identificados y que se adapten a las realidades socioeconómicas y culturales de las comunidades ribereñas.

Hacia una educación ambiental transformadora con los ODS

Para cerrar las brechas identificadas y potenciar la eficacia de la educación ambiental en la preservación del río Guachicos, como propuesta que puede ser considerada en contextos similares y contribuyendo así significativamente a los ODS (especialmente al ODS 6: agua limpia y saneamiento, y a los ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles y ODS 15: vida de ecosistemas terrestres), se propone un enfoque que haga accesible la evidencia científica con estrategias pedagógicas innovadoras y participativas.

Diseñar módulos educativos que traduzcan los resultados técnicos de los análisis físico-químicos y microbiológicos (ICA, ICOMO, ICOTRO) en información comprensible y directamente aplicable por la comunidad. El objetivo es mostrar explícitamente cómo, por ejemplo, el alto ICOMO se vincula a los vertimientos del café y las aguas domésticas y cómo el ICOTRO elevado se relaciona con el uso de fertilizantes.

Articulación de la propuesta de mejora de los PEA con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La propuesta de mejoramiento consiste en proponer una “lista de chequeo” para los trabajos de grado orientados a la formulación de planes de educación ambiental, que incorporen elementos que permitan involucrar los ODS como orientación central y que además permitan a las comunidades aplicar a convocatorias locales, nacionales e internacionales que obedezcan esta orientación, contribuyan a su cumplimiento y posibiliten articular a la comunidad con buenas prácticas ambientales con recursos económicos y técnicos.

A continuación, se presentan las dimensiones consideradas para integrar los ODS a las propuestas elaboradas por los estudiantes.

ODS 4: educación de calidad

Esta es una de las metas más significativas de los ODS porque garantiza la sostenibilidad de comunidades y la naturaleza en un mundo pacífico y respetuoso de los derechos humanos. En el marco del ODS 4, se presenta la Meta 4.7:

Para 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible” (ONU 2023, párr. 23)

Se deben orientar procesos de educación ambiental que permitan pasar de lo informativo a la gestión de pensamiento crítico, que logre la transformación de los hábitos y comportamientos y genere acción colectiva.

Es decir, que se planteen no solamente encuestas, sino talleres donde la comunidad educativa o los habitantes de un territorio participen de procesos de análisis de los derechos al agua, las relaciones de poder involucradas a nivel local y estos factores se involucren en el plan.

En caso de desarrollar los planes en instituciones educativas, es relevante proponer proyectos de aula que respondan a problemas locales del agua (por ejemplo: manejo de residuos, vertimientos, prácticas agrícolas), tener como producto manuales comunitarios de buenas prácticas ambientales generados por los aportes colectivos o realizar jornadas de monitoreo participativo de calidad del agua, que permitan interpretar el uso de bioindicadores, el uso de kits básicos y valoren la percepción de la calidad del agua.

ODS 6: agua limpia y saneamiento

El ODS 6 es el objetivo central de la propuesta. Respecto de los planes de manejo para microcuencas y su orientación lo da la Meta 6.b: “Apoyar y fortalecer la

participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento” (ONU, 2023, párr. 15).

Esto implica que en el plan se involucren acciones para que las comunidades puedan recibir la información técnica, de manera que la puedan interpretar empleando visualizaciones interactivas, mapas de calor de contaminación, herramientas de IA, que evidencien el impacto directo de prácticas específicas en la calidad del agua, fortaleciendo la conexión causa-efecto y les permita empoderar a la comunidad para que participe en la gestión del agua de forma informada, usando evidencia técnica que pueda comprender, discutir y llevar ese conocimiento a la acción.

ODS 5, 10 y 16: eje transversal de justicia y equidad

La propuesta de ajustes, al adoptar un enfoque crítico, impacta necesariamente en los ODS relacionados con la justicia y la reducción de las desigualdades.

El agua es uno de los recursos que más contribuye a la calidad de vida de las comunidades y esto afecta especialmente a las mujeres y las niñas, que son las responsables de gestionar no solo la provisión de agua, muchas veces en condiciones no higiénicas y que se encuentra en sitios lejanos a sus hogares, consumiendo su tiempo para estudiar o realizar otras actividades y exponiéndose a peligros. Además, en sus manos está el cuidado de los integrantes del hogar que pueden sufrir de enfermedades por la baja calidad del agua, en especial los más pequeños o las personas mayores (Pacto Mundial de la ONU, 2024).

Es por esto por lo que es indispensable involucrar el ODS 5 (igualdad de género) en su meta 5.5: “Asegurar la participación plena y efectiva de las mujeres y la igualdad de oportunidades de liderazgo”. Considerar el rol de las mujeres en la gestión del agua para asegurar su participación efectiva en las estrategias por ejecutar en el plan.

Esto, a su vez, va de la mano con el ODS 10 (reducción de las desigualdades) en su meta 10.2: “Potenciar y promover la inclusión social, económica y política de todas las personas”, que equipara el saber técnico con el conocimiento social, dando voz a las comunidades marginadas.

Además, al considerar las relaciones de poder de los territorios, es importante considerar el ODS 16 (paz, justicia e instituciones sólidas), en su meta 16.7: “Garantizar la adopción en todos los niveles de decisiones inclusivas, participativas y representativas”, para que las estrategias de los planes obedezcan al fortalecimiento de la gobernanza local, el tejido social y las capacidades locales de tomar decisiones informadas y representativas de sus recursos ambientales.

ODS 17: alianzas para lograr los objetivos

Es importante que se planteen alianzas estratégicas que acompañen no solamente el desarrollo de los trabajos de grado, sino también la implementación de las acciones en las comunidades por parte de aliados institucionales, públicos y privados que puedan aportar conocimientos, experiencia y recursos que permitan dar continuidad a los procesos.

Esto implica considerar la meta 17.17: “Fomentar y promover la constitución de alianzas eficaces en las esferas pública, público-privada y de la sociedad civil, aprovechando la experiencia y las estrategias de obtención de recursos de las alianzas”. Esto requiere crear alianzas entre la universidad (conocimiento técnico y metodológico), la comunidad (saber local y legitimidad) y, las instituciones locales (juntas de acción comunal, acueductos veredales, alcaldías) para ser sostenible.

Resumen del análisis de la contribución de los

ODS a la gestión del recurso hídrico

A continuación, la tabla 1 presenta un resumen de la contribución de los ODS a los planes de educación ambiental orientados a la gestión del recurso hídrico.

Tabla 1. Dimensiones de los ODS en los planes de educación ambiental

Dimensión de la ficha de análisis	Brecha que aborda	ODS que impacta directamente
1. Diagnóstico y comprensión del territorio	El análisis superficial y apolítico de los problemas ambientales.	ODS 5 (al incluir género), ODS 16 (al analizar el poder y la justicia).
2. Enfoque pedagógico	La educación meramente informativa no genera capacidad de acción.	ODS 4 (Meta 4.7) (al promover una educación crítica y transformadora).
3. Articulación de saberes	La falta de un diálogo de saberes genuino y la exclusión del conocimiento local.	ODS 6 (Meta 6.b) (al asegurar participación real), ODS 10 (al reducir la desigualdad epistémica).
4. Evidencia y uso de datos científicos	La desconexión entre los datos técnicos y su apropiación por parte de la comunidad.	ODS 6 (Meta 6.b) (al fortalecer la participación informada).
5. Naturaleza de los resultados	El enfoque en resultados de conocimiento individual en lugar de acción colectiva.	ODS 16 (Meta 16.7) (al construir gobernanza local), ODS 17 (al requerir alianzas para la acción).

Fuente: elaboración propia.

Articular los ODS en los trabajos de grado puede contribuir a que las acciones ejecutadas en alianza de las comunidades y las autoridades locales, en el cuidado y la conservación de las fuentes hídricas.

Recomendaciones para la implementación de los ODS en los planes de educación ambiental orientados a la gestión del recurso hídrico

Para la superación de las brechas entre la planificación y la acción, la educación ambiental acerca de la gestión de los recursos hídricos exige vincular a los ODS en el

tejido social y político del territorio. Para lograrlo, se proponen recomendaciones que incluyen la integración de los planes de EA en las estrategias de desarrollo local:

- Integrar a estrategias que generan impactos ambientales positivos y efectivos en el territorio: Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), Proyectos Ambientales Universitarios (PRAU), Proyectos Ciudadanos y Comunitarios de Educación Ambiental (PROCEDA) y a los Planes de Desarrollo Local.
- Establecer alianzas con juntas de acueductos, asociaciones y organizaciones campesinas, autoridades ambientales (como la CAM), y universidades.
- Promover el acompañamiento de semilleros de investigación y prácticas académicas desde los diversos cursos y carreras de una manera transversal y transdisciplinar.
- Fomentar y acompañar procesos de ciencia ciudadana y el monitoreo participativo, capacitando a los integrantes de las instituciones educativas y de las comunidades para realizar monitoreos básicos de calidad de agua (por ejemplo, mediante kits de prueba básicos, observación de indicadores biológicos o registro de olores y colores). Esto les permitiría visualizar el impacto de los cambios de comportamiento y fomentar un mayor sentido de apropiación.
- Promover la innovación local y el intercambio de experiencias exitosas en prácticas agrícolas y domésticas que minimicen el impacto ambiental, reconociendo el valor del conocimiento empírico y destacando el papel de la mujer en la conservación.
- Proponer ejercicios de retroalimentación periódica donde los resultados de los monitoreos sean presentados, discutidos y contextualizados con la comunidad, reforzando la relación entre sus acciones y los cambios observados.
- Generar materiales educativos diseñados con la comunidad para que se creen herramientas de acción. La recomendación es que se creen en formatos visuales, impresos o digitales como videos cortos, que sean muy didácticos y lúdicos, para que se puedan difundir por redes sociales, para

promover una participación activa y una gobernanza efectiva de sus recursos hídricos.

Conclusiones

El estudio desarrollado en la microcuenca del río Guachicos evidencia que la educación ambiental, cuando se limita a enfoques informativos y prescriptivos, tiene un alcance reducido para incidir en la gestión del recurso hídrico. Las campañas centradas en sensibilización, sin articulación con las dinámicas territoriales, las relaciones de poder y las prácticas comunitarias resultan insuficientes para generar transformaciones socioambientales sostenidas.

Los hallazgos muestran que la principal debilidad no radica únicamente en la falta de información, sino en la escasa capacidad de los procesos educativos para promover apropiación social, participación incidente y cambios colectivos en la gestión del agua. A ello se suma la débil visibilización de iniciativas comunitarias preexistentes, lo que limita la continuidad de las acciones de conservación y reduce las posibilidades de consolidar procesos de gobernanza hídrica con base territorial.

En este sentido, la investigación concluye que la educación ambiental adquiere mayor pertinencia y eficacia cuando se articula con enfoques de justicia hídrica y diálogo de saberes. Esta perspectiva permite reconocer que la problemática del agua no es exclusivamente técnica o ecológica, sino también social, política y cultural, y que su abordaje requiere integrar los conocimientos locales, las experiencias comunitarias y la participación efectiva de los actores del territorio.

Asimismo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible aportan un marco integrador para vincular las problemáticas locales de las microcuencas con metas más amplias de educación de calidad, equidad, reducción de desigualdades, participación y justicia institucional. No obstante, su valor no reside solo en su función orientadora, sino en su capacidad para traducirse en acciones territoriales concretas, evaluables y socialmente apropiadas.

En consecuencia, se concluye que la educación ambiental orientada a la gestión participativa de microcuencas debe superar el énfasis en la transmisión de contenidos y avanzar hacia procesos de formación crítica, construcción colectiva de capacidades y fortalecimiento de la gobernanza del agua. Solo bajo esta lógica puede consolidarse como una herramienta efectiva para la protección del recurso hídrico y para la construcción de territorios más justos, participativos y sostenibles.

Uso de inteligencia artificial

Para la optimización de este manuscrito se utilizó una herramienta de inteligencia artificial generativa como asistente de escritura. Su aplicación se centró en mejorar la claridad, el estilo y la cohesión de la redacción con el fin de asegurar un tono académico consistente y pulcro. La responsabilidad sobre los argumentos, las ideas y el contenido final del artículo recae íntegramente en el autor.

Referencias

- Aya Cárdenas, D. M. (2021). *Pedagogía del agua. Compilación, sistematización y reelaboración de experiencias en educación ambiental* [tesis de especialización en Comunicación Educativa]. Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/783f7be9-7648-4db0-a49f-d8ecfa72583f/content>
- Boelens, R. (2014a). Cultural politics and the hydrosocial cycle: Water, power and identity in the Andean highlands. *Geoforum*, 57, 234-247. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.02.008>
- Boelens, R. (2014b). Water justice in Latin America: The politics of difference, equality and identity. *Water International*, 39(2), 129-142.
- Boelens, R. y Zwarteveen, M. (2015). Hydrosocial territories: A political ecology perspective. *Water International*, 40(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1012805>
- Chávarro Scarpetta, Y. A. (2019). *Formulación del plan de educación ambiental comunitario para el cuidado y la preservación del río Guachicos de Pitalito, Huila* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [Cornare]. (2015). *Análisis situacional de la cuenca del río Aburrá - Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA)*. https://www.cornare.gov.co/POMCAS/planes-de-ordenacion/DocumentosFasesRioAburra/2.8.Analis_Situa_vf.pdf
- Cruz Ospina, S. F. y Ortega Astudillo, J. C. (2020). *Determinación del estado de la calidad del agua y la contaminación en los afluentes del río Guachicos en la zona alta de la Sub-cuenca, en Pitalito Huila* [tesis de grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33517>

Decreto 1640 del 2012 (2 de agosto), por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial* 48.510.

Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2014). *Documento CONPES 3810. Política para el Suministro de Agua Potable y Saneamiento Básico en la Zona Rural*. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3810.pdf?utm_source=chatgpt.com#page=1.00&gsr=0

Empitalito E.S.P. (2023). *Servicio de acueducto. Empresas Públicas de Pitalito*. <https://empitalito.gov.co/servicio-de-acueducto/>

Freire, P. (1970). *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI Editores.

Gallardo López, J. A. y García Lázaro, I. (2021). *ODS y educación ambiental, el papel de la educación social en la construcción de una ciudadanía comprometida con el desarrollo sostenible*. https://sips2020.sepa.gal/docs/sala-3_perspectivas-teoricas-de-la-educacion-ambiental-ante-la-sostenibilidad-social-y-ambiental/ods-y-educacin-ambiental-el-papel-de-la-educacin-social-en-la-construccion-de-una-ciudadana-comprometida-con-el-desarrollo-sostenible_3.pdf

García Díaz, J. (2002). Educación ambiental y participación ciudadana. *Revista Iberoamericana de Educación Ambiental*, 3(2).

García Díaz, J. E. (2002). *Los problemas de la educación ambiental: ¿es posible una educación ambiental integradora?* *Investigación en la Escuela*, (46), 123-141. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/recursos/documentos/reflexiones-educacion-ambiental-carpeta-ceneam_tcm30-167571.pdf

González Gaudiano, E. (2007). *Educación ambiental: trayectorias, rasgos y escenarios*. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Henao Díaz, I. (2021). *Formulación del plan de educación ambiental (PEA) para la empresa Emtelco S. A. S.* [informe de práctica en Ingeniería Ambiental]. Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/18338>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2021). *Informe nacional del agua 2021*. <https://www.ideam.gov.co/documents/21021/109964879/Informe+Nacional+del+Agua+2021.pdf>
- Leff, E. (2006). *Racionalidad ambiental: la reconfiguración del conocimiento y la educación*. Siglo XXI Editores.
- Leff, E. (2014). *Epistemología ambiental*. Siglo XXI Editores.
- Miles, M. B., Huberman, A. M. y Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd edición). Sage Publications. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/239700221402800402>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía metodológica para la formulación de los planes de manejo ambiental de microcuencas – PMAM*. <https://www.andi.com.co/Uploads/GU%C3%8DA%20PMA%20de%20Microcuenca.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Política nacional de educación ambiental*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/Politica-Nacional-de-Educacion-Ambiental-2019.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020a). *Herramienta Metodológica: Construcción Plan de Educación Ambiental Municipal PEAM*. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/0b/d2/0bd26923-a5ac-459e-beb1-ce98d3e2cc00/herramienta_metodologica_peam.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020b). *Lineamientos para la gestión del PROCEDA en Colombia: «Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental en espacios de educación no formales»*. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/a5/0f/a50f95e3-1de1-43a9-bf33-d108160d12c4/lineamientos_gestion_proceda.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resignificación de los Proyectos Ambientales Escolares PRAE*. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/dc/16/dc16874f-889d-433f-9f80-50f2e556ca39/resignificacion_programas_ambientales_escolares_prae.pdf

- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainable-development/es/development-agenda/>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]-Agua. (2021). *Resumen actualizado de 2021 sobre los progresos en el ODS 6: agua y saneamiento para todos*. https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021_SP.pdf
- Pacto Mundial de la ONU. (2024). *ODS 6 Agua limpia y saneamiento*. <https://www.pactomundial.org.ar/ods/ods6-agua-limpia-y-saneamiento>
- Robbins, P. (2019). *Political ecology: A critical introduction*. John Wiley & Sons.
- Sánchez, J. y Acosta, G. (2015). Pitalito: Atlas Ambiental y de la Biodiversidad. *Alcaldía Municipal de Pitalito*. <https://colombia.inaturalist.org/projects/atlas-de-la-biodiversidad-de-pitalito>
- Sauvé, L. (2004). Una cartografía de corrientes en educación ambiental. En M. Sato e I. Carvalho (Comps.), *A pesquisa em educação ambiental: cartografias de uma identidade narrativa em formação* (pp. 17-44). Artmed. <https://laboratoriogrecia.cl/wp-content/uploads/2016/04/Lucia-SauveEAM3.pdf>
- Sauvé, L. (2005). Currents in environmental education. *Canadian Journal of Environmental Education*, 10(1), 11-37.
- UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua*. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>





Riesgos respiratorios por inhalación de humo: un análisis bibliométrico con evidencias ambientales y clínicas

Resumen

La exposición prolongada de humo en entornos cerrados y abiertos representa un riesgo respiratorio asociado a otras enfermedades crónicas, como la lesión pulmonar aguda (LIH) y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Pese a los avances científicos sobre enfermedades respiratorias, persiste un vacío en la integración de análisis bibliométricos y clínicos que permita entender de manera holística el impacto del humo en la salud humana, particularmente en cuanto a caracterización geográfica, evolución temporal, manifestaciones fisiopatológicas y abordajes terapéuticos. El propósito de este estudio fue analizar la producción científica entre el 2019 y el 2025 sobre lesiones respiratorias inducidas por inhalación de humo mediante un análisis bibliométrico y la síntesis clínica de hallazgos relevantes relacionados con la LIH, daño pulmonar, tratamiento y secuelas. Se realizó una revisión sistemática y análisis bibliométrico mediante protocolo de Ítems de Informes Preferidos para Revisiones Sistemáticas o *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), manejando bases de datos de Web of Science, con un filtro de palabras clave relacionadas con inhalación de humo y enfermedades respiratorias, que redujo de trescientos cuarenta y ocho documentos a cincuenta y tres artículos revisados. Los resultados evidencian que el 65 % de las publicaciones científicas tiene una alta concentración de estudios provenientes de EE. UU. y China con aparición de EPOC, alcanzando una prevalencia del 30 % en comunidades rurales (IC 95 %:25-35 %). También, se evidenció un incremento de estudios clínicos asociados a inflamación,

respuesta inmune exacerbada, daño alveolar y alteración del surfactante, así como terapias y rehabilitación, aunque con escasa representación de población vulnerable y una limitada aplicabilidad clínica. Se concluye que las lesiones por inhalación de humo requieren fortalecer el diagnóstico temprano, implementar programas de rehabilitación y formular estrategias preventivas integrales con enfoque ambiental y de salud para mitigar el riesgo respiratorio.

Palabras clave: EPOC, PRISMA, riesgo respiratorio, bibliometría, inhalación de humo, lesión pulmonar aguda.

Abstract

Prolonged exposure to smoke in closed and open environments represents a respiratory risk, associated with other chronic diseases such as acute lung injury (LIH) and COPD. Despite the existence of high-impact scientific literature, there is a gap in the comprehensive bibliometric and clinical characterization of smoke-induced lung injuries, the effects of inhaled smoke, and the clinical and environmental responses needed to minimize their impact. Despite scientific advances on respiratory diseases, there is still a gap in the integration of bibliometric and clinical analyses that allow a holistic understanding of the impact of smoke on human health, particularly in terms of geographical characterization, temporal evolution, pathophysiological manifestations and therapeutic approaches. The purpose was to analyze the scientific production between 2019 and 2025 on respiratory injuries induced by smoke inhalation, through a bibliometric analysis and the clinical synthesis of relevant findings related to LIH, lung damage, treatment and sequelae. A systematic review and bibliometric analysis was carried out, using protocol PRISMA, using databases from WEB of Science, with a filter of keywords related to smoke inhalation and respiratory diseases, which was reduced from 348 documents to 53 reviewed articles. The results show that 65% of scientific publications have a high concentration of studies from the United States. In the USA and China, COPD appeared, reaching a prevalence of 30% in rural communities (95% CI: 25-35%). Also, there was an increase in clinical studies associated with inflammation, exacerbated immune response, alveolar damage and surfactant alteration; as well as therapies and rehabilitation, although with little representation of the vulnerable population and limited clinical applicability. It is concluded that smoke inhalation injuries require strengthening early diagnosis, implementing rehabilitation programs, and formulating comprehensive preventive strategies with an environmental and health approach to mitigate respiratory risk.

Keywords: COPD, PRISMA, Respiratory Risk, bibliometrics, Smoke Inhalation - Acute Lung Injury.

Introducción

La contaminación del aire es uno de los mayores riesgos ambientales que existen para la salud. Mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire, los países pueden reducir la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2024). Los efectos combinados de la contaminación del aire ambiente y la del aire doméstico se asocian a 6,7 millones de muertes prematuras cada año.

En el transcurso del tiempo se han generado diferentes estrategias e investigaciones desde diferentes organizaciones con el fin de mitigar la contaminación y las enfermedades respiratorias, entre ellas lesión pulmonar aguda por inhalación de humo (*Smoke Inhalation – Induced Acute Lung Injury; SI-ALI*), enfermedad obstructiva crónica y asma (Scharaunfnagel et al., 2019). A pesar de esto, todavía sigue habiendo impactos negativos por la inhalación de humo en la salud de los seres humanos.

Por su parte, el humo de leña puede afectar a todo el mundo, especialmente a los niños, los adolescentes, los adultos mayores y las personas con enfermedades pulmonares como asma o EPOC, así como a las personas con enfermedades cardíacas, siendo esta comunidad una de las más vulnerables (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2025). Otro aspecto por tener en cuenta es el efecto en el medio ambiente por las partículas que se generan por humo de leña, las cuales pueden reducir la visibilidad y ocasionar daños ambientales y estéticos en nuestras comunidades y espacios pintorescos, como los parques nacionales. La exposición crónica al humo de leña es un factor de riesgo para el desarrollo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). En algunas zonas del mundo, este factor puede ser más importante que la exposición al humo de tabaco, generalmente inhalado como humo de cigarrillo, como causa de EPOC (Ortiz Quintero et al., 2023).

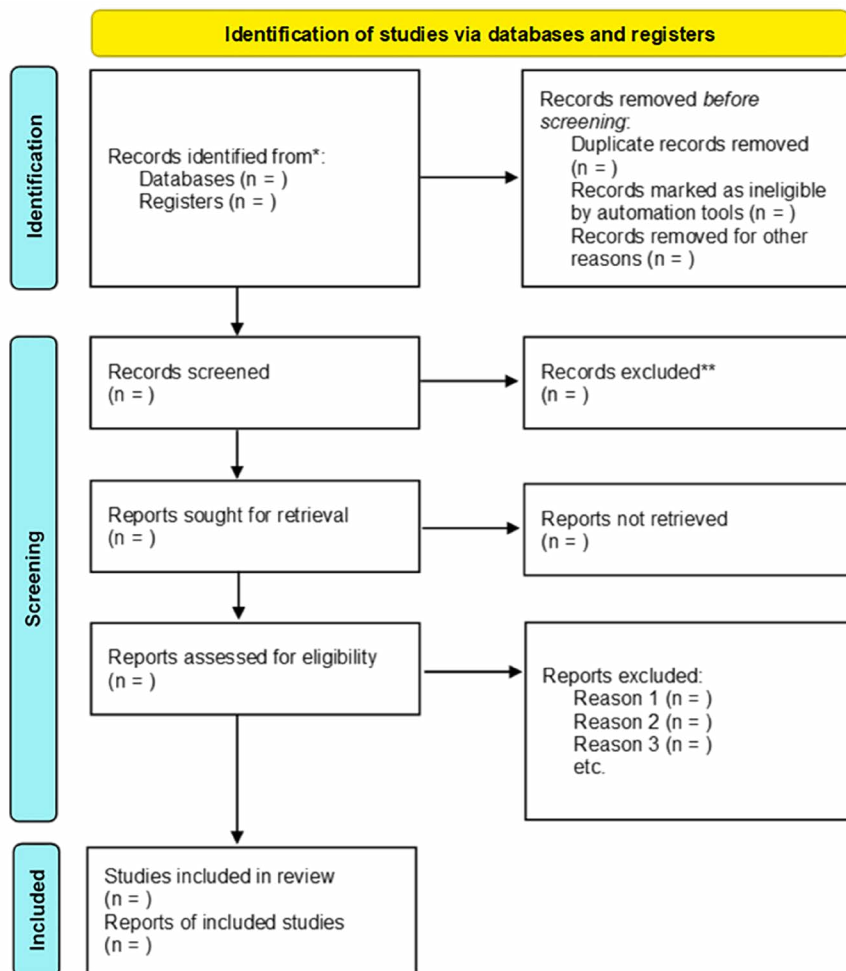
En la revisión se identificaron algunas enfermedades respiratorias más representativas por la exposición al humo. Se consideraba tener una mayor influencia por el humo de leña, pero no fue así; en cambio, se presentan por quema, incendios y

cigarrillo. Todo se evidencia desde un enfoque del área de la salud con relaciones patológicas y tratamientos para estas dos enfermedades que se relacionan: el SI ALI, (SHS) y humo de cigarrillo activo. Respecto al enfoque de impacto del medio ambiente, no es un factor relevante para los investigadores y se evidencia una desarticulación entre factores de profundización que genera una perspectiva más patológica.

Es por eso por lo que desde el siguiente análisis se caracterizó un análisis bibliométrico entre el 2019 y el 2025 en Web of Science (WoS), reconociendo el trabajo colaborativo en red entre autores en el desarrollo de proyectos que generan impacto negativo en la salud respiratoria. Algunos países con gran influencia en las investigaciones se encuentran en América, Asia y Europa. Asimismo, se reconoce la influencia de los temas de investigación en las afiliaciones públicas y privadas. Se evidencian avances terapéuticos que buscan mitigar los impactos de la exposición al humo, pero falta la caracterización bibliométrica y clínica integral sobre lesiones pulmonares inducidas por humo; además, están ausentes otros factores que tienen influencia en la afección respiratoria, entre ellos la quema de biomasa y la actividad de las fábricas. Es por eso por lo que se realizó esta revisión a partir de la investigación actual con el fin de proponer nuevas líneas futuras de investigación que buscan cerrar paulatinamente brechas para futuros estudios.

Materiales y métodos

La declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), publicada en el 2009, se diseñó para ayudar a los autores de revisiones sistemáticas a documentar de manera transparente el porqué de la revisión, qué hicieron los autores y qué encontraron. Durante la última década, ha habido muchos avances en la metodología y terminología de las revisiones sistemáticas, lo que ha requerido una actualización de esta guía (Page et al., 2021). La figura 1 expone la estructura que se toma como guía para la revisión.

Figura 1. *Flujograma empleado en este estudio***Fuente:** elaboración propia.

El análisis y discusión de la temática que proponemos versa sobre las enfermedades respiratorias por inhalación constante o parcial de humo en el día a día de las personas, los tratamientos que se han desarrollado para la mitigación de las patologías y el reconocimiento sobre la comunidad científica de la temática de investigación. Se elaboró una revisión sistémica de artículos científicos en la base de datos Web of Science (WoS), modelo que filtra procesos de calidad de la remisión. Reconociendo lo que la comunidad científica está escribiendo sobre

enfermedades por la exposición a la absorción del humo, de este se hace el análisis bibliométrico. Con el uso de la búsqueda de la base de datos de WoS y organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), el *International Journal of Spanish Respiratory Society of Pulmonology and Thoracic Surgery* y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) se realizó la revisión sistemática de la literatura, que permitió determinar los hallazgos y discusiones sobre las enfermedades por la absorción del humo.

La búsqueda de literatura científica se realizó utilizando palabras clave, filtros y descriptores, como área de conocimiento, filiación, red de autores. El análisis se desarrolló con base en la siguiente ecuación booleana: «diseases» AND «inhalation» AND «smoke». Esta investigación inicial arrojó un total de trescientos cuarenta y ocho documentos. Posteriormente, la aplicación de criterios de filtrado (ver tabla 1) permitió reducir significativamente el número de registros. Se aplicaron filtros de inclusión y exclusión, con lo cual se determinaron cincuenta y tres artículos a los que se pueden acceder para la lectura orientada a la elaboración de la revisión sistemática de la literatura y de bibliometría.

Tabla 1. Lista de criterios de elección para la búsqueda

Criterios de búsqueda y elección	Buscadores/filtros	Cantidad
Palabras claves	Enfermedades respiratorias, humo	
Descriptores	“diseases” AND “Inhalation” AND “smoke”	
Bases de datos	WOS	348
Tipo de documento	Article-Review	338
Tiempo de publicación	2019-2025	53
Áreas de investigación	<i>Respiratory System or Public Environmental Occupational Health or General Internal Medicine or Research Experimental Medicine or Science Technology Other Topics or Cardiovascular System Cardiology or Integrative Complementary Medicine or Pathology</i>	144

Fuente: elaboración propia.

Como resultado de la búsqueda de investigación, se seleccionaron los artículos y se llevó a cabo un análisis bibliométrico utilizando los datos gráficos proporcionados por WoS y el *software* VOSviewer con el objetivo de identificar y evaluar patrones temáticos y contribuciones significativas en este campo de estudio de las enfermedades respiratorias. Asimismo, se compiló la información específica sobre las enfermedades que más se presentan por la absorción del humo, qué elementos las provocan y otros aspectos que puedan contribuir a la revisión. La información utilizada en este análisis sistemático de la investigación provino de fuentes institucionales públicas, privadas a nivel internacional y bases de datos especializadas, las cuales se detallan en la tabla 2.

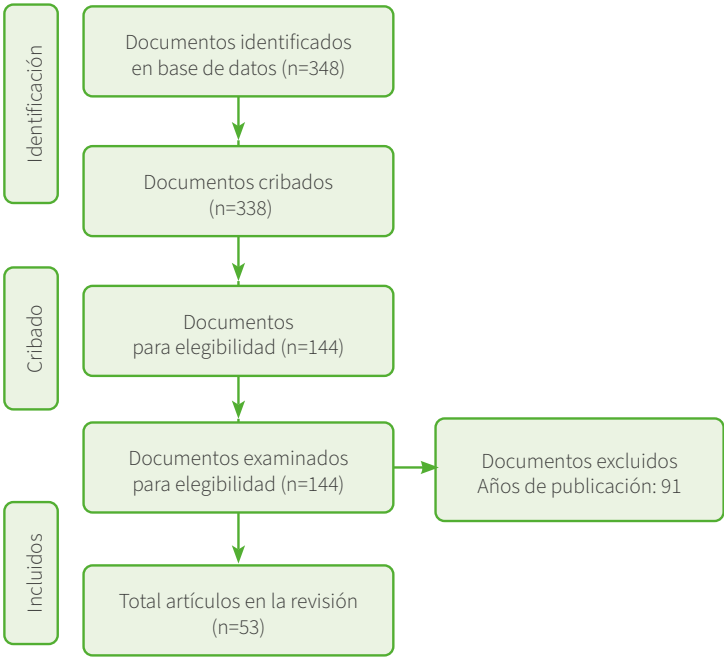
Tabla 2. Fuentes de información de artículos

Categoría	Fuentes
Bases de datos académicas	WoS
Organizaciones	Organización Mundial de la Salud (OMS), Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Organización Panamericana de la Salud (OPS)
Revistas	Son las tres más representativas o mayor cantidad: <i>International Journal of Spanish Respiratory</i> , <i>Society of Pulmonology</i> y <i>Thoracic Surgery</i> .

Fuente: elaboración propia.

Para la revisión se empleó la metodología PRISMA. La figura 2 muestra una representación gráfica del proceso de selección de los estudios científicos. A través de este diagrama se reconoce la cantidad inicial de datos encontrados en la base de datos de WoS, así como las etapas de cribado que permitieron aplicar criterios de inclusión y exclusión para determinar el número final de artículos científicos considerados en el presente análisis. De los ochenta artículos relacionados con enfermedades por la inhalación de humo, se seleccionaron aquellos que cumplieran con los requisitos establecidos para la revisión sistemática de literatura.

Figura 2. *Revisión sistemática PRISMA*



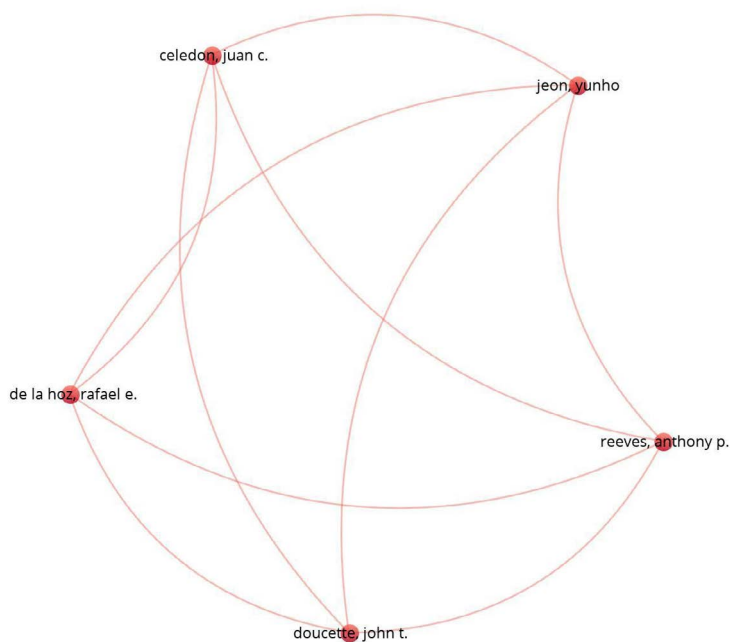
Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

En este apartado se presenta un análisis de la producción científica sobre lesiones respiratorias inducidas por inhalación de humo, para lo cual se integra un enfoque bibliométrico con una interpretación cualitativa de los hallazgos. Se examinan las principales tendencias en la investigación, incluidas la distribución por autores, años de publicación, además de instituciones y países con el fin de proporcionar una visión integral del panorama actual y las dinámicas de colaboración en este campo. Se profundiza en el significado de estas tendencias y su relación con el problema de investigación para identificar las causas subyacentes de los patrones observados y su implicación en el avance del conocimiento sobre la lesión por inhalación de humo (LIH).

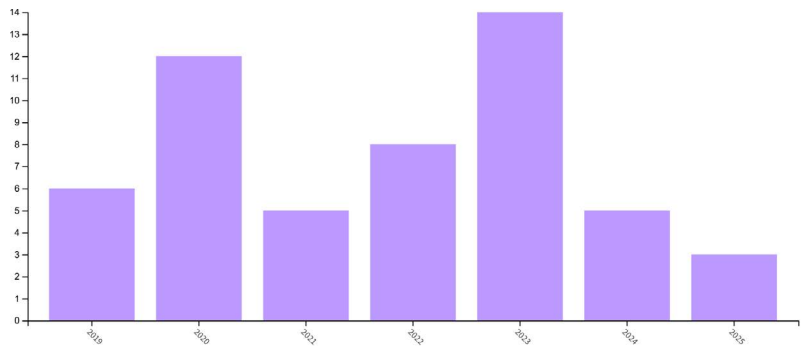
La figura 3 ilustra la red de coautoría y la colaboración entre los investigadores más influyentes en el campo de las lesiones por inhalación de humo. Por otra parte, el análisis de clústeres revela la existencia de cinco nodos interrelacionados, lo que sugiere una producción científica colaborativa. Esta colaboración se centra en el estudio de enfermedades respiratorias, particularmente en el contexto de la exposición al humo. La identificación de grupos de investigación y su interconexión permite comprender la dinámica de la investigación y la difusión del conocimiento en esta área.

Figura 3. *Revisión sistemática*



Fuente: Web of Science [WoS] (2025).

Figura 4. *Publicaciones por año*



Fuente: Web of Science [WoS] (2025).

El análisis de las publicaciones por año (ver figura 4) revela una evolución temporal en la investigación sobre enfermedades respiratorias por exposición al humo. Se identifica un incremento notable en la producción científica en el 2020 (22,6 %) y el 2023 (26,4 %) dentro del período de 2019 a 2025, abarcando un total de cincuenta y tres artículos. Este pico en el 2020 podría estar directamente relacionado con la pandemia de COVID-19, que puso de manifiesto la vulnerabilidad del sistema respiratorio, la importancia de la calidad del aire y la exposición a agentes irritantes. La mayor consciencia pública y el aumento de la financiación para la investigación en salud respiratoria durante este período podrían haber impulsado la publicación de estudios. Además, el sostenido interés en el 2023 sugiere que la investigación en LIH sigue siendo una prioridad, posiblemente debido a la creciente preocupación por la contaminación del aire y los eventos climáticos extremos que provocan incendios forestales.

En la figura 5 se muestra que los autores con mayor número de publicaciones, como de la Hoz (2018) (8 %) y Doucette (2017), Jeon (2019) y Reeves (2021) (6 % cada uno), no solo demuestran una alta productividad individual, sino la actuación en redes de colaboración para abordar la complejidad de la LIH.

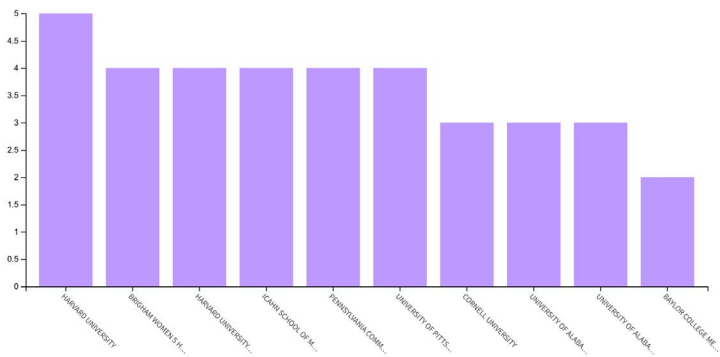
Figura 5. Autores de la búsqueda



Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la figura 6, entre los cincuenta y tres artículos seleccionados se destaca la Universidad de Harvard con un 9,4 % de las publicaciones, seguida por el Hospital de Mujeres de Brigham, Afiliados Médicos de la Universidad de Harvard, la Escuela de Medicina Icahn en el Monte Sinaí, el Sistema de Educación Superior de Pensilvania (PCSHE) y la Universidad de Pittsburgh, cada una con un 7,5 %. Esta distribución institucional refleja no solo el aporte científico de estos centros académicos y hospitalarios, sino también la relevancia global que ha adquirido la investigación sobre LIH.

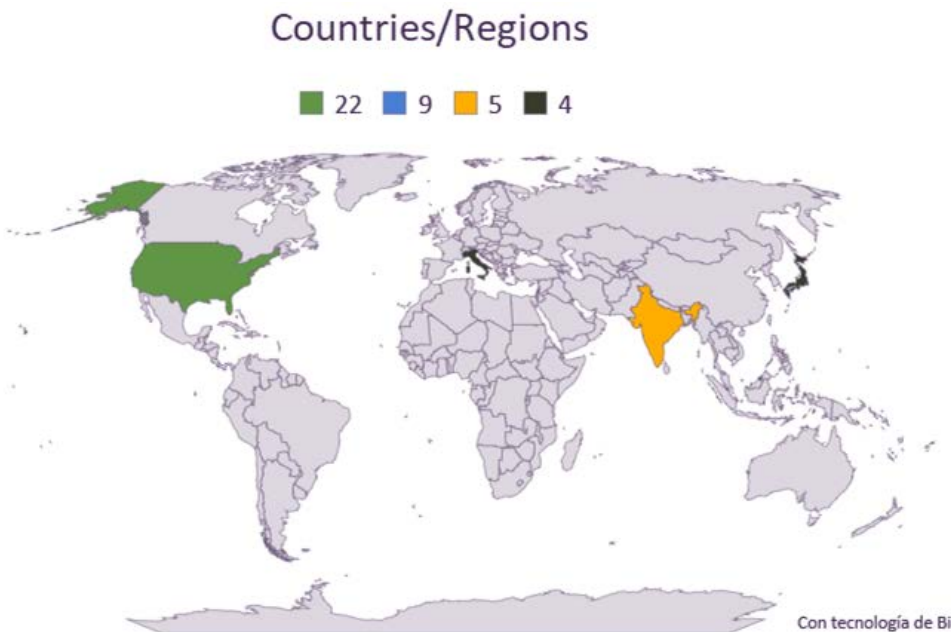
Figura 6. Instituciones



Fuente: Web of Science [WoS] (2025).

El análisis bibliométrico de la distribución geográfica de las publicaciones (ver figura 7) revela que Estados Unidos es el país con la mayor contribución, representando el 42 % de los estudios en los últimos siete años. Le sigue China con un 17 %, y luego Inglaterra, Italia y Japón, cada uno con un 7,5 %. Esta distribución indica que la investigación sobre la lesión por inhalación de humo está predominantemente concentrada en países desarrollados. La alta producción en estas naciones puede atribuirse a una mayor inversión en investigación y desarrollo, la disponibilidad de infraestructura tecnológica avanzada y una mayor consciencia sobre los problemas de salud ambiental. Sin embargo, esta concentración también resalta una posible disparidad en la investigación global, ya que las regiones con mayor prevalencia de exposición al humo de biomasa, como muchos países de bajos y medianos ingresos, tienen una representación limitada en la literatura científica. Esta brecha geográfica en la investigación es crítica, ya que las soluciones y enfoques terapéuticos desarrollados en un contexto pueden no ser directamente aplicables a otro dadas las diferencias en los tipos de exposición, las condiciones socioeconómicas y los sistemas de salud.

Figura 7. Países o regiones a nivel global



Fuente: Web of Science [WoS] (2025).

Para contextualizar los resultados del análisis bibliométrico, se profundiza a continuación en los hallazgos sobre las lesiones por inhalación de humo (LIH) y sus implicaciones clínicas, donde se muestra un interés en el estudio de sus mecanismos de daño y evolución, así como un interés creciente en terapias emergentes orientadas a modular la respuesta inflamatoria y preservar la función pulmonar.

Lesiones por inhalación de humo: fisiopatología, tratamiento, pronóstico y terapias emergentes

Las lesiones por inhalación de humo (LIH) constituyen una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en pacientes con quemaduras, especialmente en aquellos con quemaduras extensas o expuestos a incendios en espacios cerrados. Estas lesiones afectan principalmente el tracto respiratorio y los pulmones, lo que genera una cascada de eventos fisiopatológicos que complican de forma significativa el manejo clínico.

El humo inhalado contiene una mezcla compleja de partículas calientes, gases tóxicos (como monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno y aldehídos) y compuestos irritantes que provocan daño térmico, inflamación y alteraciones en la permeabilidad de la membrana alveolo-capilar (Bookshelf, 2023). A diferencia de las quemaduras térmicas externas, el daño por inhalación puede ser insidioso, desarrollándose horas después de la exposición inicial, lo que dificulta su diagnóstico y tratamiento oportuno (Walker et al., 2015).

Impacto clínico y epidemiológico

Los estudios clínicos han demostrado de forma consistente que la presencia de inhalación de humo se asocia con una mayor mortalidad hospitalaria, mayor número de días en ventilación mecánica y una estancia prolongada en unidades de cuidados intensivos (UCI) (Guerra Ávila et al., 2024). La evidencia es particularmente contundente en población pediátrica, donde una investigación retrospectiva en pacientes con quemaduras severas reveló que la inhalación de humo aumentaba significativamente la mortalidad y los requerimientos de soporte ventilatorio, incluso en ausencia de quemaduras profundas (Burns y Trauma, 2017).

Desde la perspectiva pronóstica, la presencia de SI ALI duplica la probabilidad de muerte en comparación con quemados sin compromiso respiratorio (Sheridan, 2016), lo que subraya la importancia crítica de su reconocimiento temprano y manejo especializado.

Fisiopatología de la lesión pulmonar aguda por inhalación de humo (SI ALI)

a. Mecanismos iniciales de lesión

La lesión pulmonar aguda inducida por inhalación de humo (*Smoke Inhalation–Acute Lung Injury* —SI ALI—) representa una de las principales complicaciones clínicas en pacientes expuestos a incendios, especialmente cuando existe concomitancia con quemaduras cutáneas extensas. Este síndrome se caracteriza por una respuesta inflamatoria desregulada en el pulmón que lleva al desarrollo de edema alveolar, hipoxemia severa y, en muchos casos, síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA), una de las causas más frecuentes de muerte en pacientes quemados (Saad Eldin et al., 2024).

b. Cascada inflamatoria

Desde el punto de vista fisiopatológico, la exposición al humo desencadena una respuesta inflamatoria aguda mediada por citocinas como IL-6, TNF- α y quimioquinas que inducen el reclutamiento masivo de neutrófilos. Estos, a su vez, generan especies reactivas de oxígeno (ROS) que perpetúan el daño epitelial y aumentan el riesgo de SDRA (Yang y Wang, 2024). A nivel molecular, la SI ALI se inicia con la inhalación de partículas tóxicas y gases calientes, lo cual produce una combinación de daño térmico directo en el epitelio respiratorio, así como una reacción inflamatoria sistémica. Se ha documentado que el humo activa rutas de señalización intracelular como NF- κ B y MAPK, que a su vez promueven la liberación de citocinas proinflamatorias (IL-1 β , IL-6, TNF- α) y quimioquinas como MCP-1, que median el reclutamiento de neutrófilos y monocitos al parénquima pulmonar (Sun et al., 2024).

c. Disfunción de la barrera alveolo-capilar

Un aspecto fundamental en la fisiopatología de la SI ALI es el daño endotelial, que provoca disfunción de la barrera alveolo-capilar. La pérdida de integridad endotelial facilita la extravasación de proteínas plasmáticas al espacio alveolar, lo que contribuye al edema pulmonar y la disminución del intercambio gaseoso. Paralelamente, el aumento en la expresión de moléculas de adhesión como ICAM-1 y VCAM-1 favorece la migración leucocitaria y perpetúa la inflamación (Chong et al., 2021).

d. Alteraciones del surfactante y colapso alveolar

En los casos más graves, se produce una desregulación del surfactante pulmonar, lo que reduce la capacidad de los alvéolos para mantenerse expandidos, promoviendo colapso alveolar (atelectasia) y aumentando la dificultad respiratoria. Esta situación, sumada a la hipoxemia progresiva, puede desembocar en falla multiorgánica si no se interviene de forma rápida y efectiva (Phelps et al., 2024). Además, el edema en las vías aéreas superiores puede comprometer la permeabilidad y requerir intervención quirúrgica urgente como intubación precoz o traqueotomía.

Manifestaciones clínicas y diagnóstico

a. Presentación clínica

Los síntomas iniciales incluyen disnea, tos, estridor, esputo carbonáceo y quemaduras faciales o intraorales. La broncoscopia es considerada el estándar de oro para el diagnóstico, permitiendo visualizar directamente la mucosa traqueobronquial afectada por el calor y los productos químicos del humo (Giurgiu, 2025). Los hallazgos suelen correlacionarse con la gravedad clínica y se han propuesto escalas broncoscópicas para clasificar la lesión (Li et al., 2022).

b. Métodos diagnósticos complementarios

El diagnóstico puede complementarse con estudios de imagen, como la tomografía computarizada (TC) de tórax, que puede revelar engrosamiento bronquial, atelectasias y consolidaciones alveolares. En pacientes con sospecha de hipoxia por gases tóxicos como el monóxido de carbono o el cianuro, la medición de carboxihemoglobina y lactato sérico es funda-

mental. El estudio de Kim et al. (2020) propone el uso de biomarcadores circulantes como la proteína surfactante D (SP-D) para la detección temprana del daño pulmonar.

Complicaciones clínicas

La SI ALI se asocia a una serie de complicaciones respiratorias, entre ellas:

- Neumonía: ocurre en más del 50 % de los pacientes con inhalación de humo y es un factor independiente de mal pronóstico.
- SDRA: frecuente en los primeros días, puede requerir ventilación mecánica prolongada.
- Fibrosis pulmonar: en casos graves y mal controlados, puede desarrollarse como secuela a largo plazo (Putman et al., 2024).
- Falla multiorgánica: la inflamación sistémica derivada de la lesión pulmonar puede contribuir al deterioro de otros órganos como riñones e hígado.

Factores pronósticos y escalas de valoración

Diversos estudios han identificado predictores independientes de mortalidad en pacientes con SI ALI:

- Porcentaje de superficie corporal quemada total (%SCQT).
 - Edad avanzada (> 60 años).
 - Presencia de SDRA y necesidad de ventilación mecánica invasiva.
 - Grado de lesión broncoscópica.
 - Elevados niveles séricos de IL-6 y proteína C reactiva (PCR) (Jeschke et al., 2020).
-

Herramientas como la escala Revised Baux Score, que integra edad, %SCQT y presencia de inhalación de humo permiten estimar la mortalidad con alta precisión. Por ejemplo, un paciente de 50 años con 40 % SCQT y lesión por inhalación tendría un Baux Score de 90, lo que implica una mortalidad cercana al 50 % (Rahimpour et al., 2024).

Tratamiento y estrategias terapéuticas actuales

a. Medidas de soporte inicial

El tratamiento de la lesión por inhalación de humo aún representa un desafío clínico importante debido a la complejidad de los mecanismos fisiopatológicos involucrados y la elevada morbilidad asociada. A diferencia del tratamiento de las quemaduras cutáneas, no existe una terapia específica y definitiva para la SI; por el contrario, se basa principalmente en medidas de soporte respiratorio, manejo de complicaciones y estrategias farmacológicas emergentes.

b. Oxigenoterapia y ventilación mecánica

La administración temprana de oxígeno es una medida crítica en todos los pacientes con sospecha de inhalación de humo, especialmente ante la posible exposición a monóxido de carbono (CO) y cianuro. La oxigenoterapia al 100 % reduce la vida media de la carboxihemoglobina de doscientos cincuenta a solo cuarenta-sesenta minutos, mientras que en cámaras hiperbáricas puede reducirse a veinte minutos (Borron et al., 2007). Liao et al. (2021) investigaron el uso de oxigenoterapia hiperbárica (OHB) como intervención posintoxicación por CO, mostrando mejor recuperación neurológica y menor incidencia de deterioro cognitivo.

En casos graves, especialmente cuando se desarrolla SDRA, la ventilación mecánica se vuelve necesaria. La ventilación protectora con bajo volumen corriente (6 ml/kg) y presión positiva al final de la espiración (PEEP) ha demostrado mejorar la oxigenación y reducir el barotrauma (Schultz et al., 2021). En ciertos casos se ha reportado el uso exitoso de estrategias avanzadas, como la ventilación de alta frecuencia oscilatoria o incluso la oxigenación por membrana extracorpórea (ECMO), aunque esta última se reserva para pacientes seleccionados (Chen et al., 2024).

c. Terapias farmacológicas

A lo largo de las últimas dos décadas se han explorado múltiples enfoques terapéuticos para atenuar la respuesta inflamatoria, mejorar la limpieza mucociliar y proteger la integridad alveolar:

- Broncodilatadores (como salbutamol o ipratropio): se utilizan para reducir el broncoespasmo inducido por los irritantes del humo, especialmente en pacientes con antecedentes de asma o EPOC.
- Corticosteroides: su uso es controvertido. Algunos estudios han sugerido beneficios en la reducción del edema pulmonar y la inflamación bronquial (Zhang et al., 2022), mientras que otros no reportan mejoras significativas y advierten sobre el riesgo de infecciones.
- Heparina nebulizada y N-acetilcisteína (NAC): esta combinación ha demostrado disminuir la obstrucción de las vías respiratorias causada por castas de fibrina, reduciendo así la mortalidad y la necesidad de ventilación mecánica. Shaikh et al., 2022 llevaron a cabo un ensayo clínico piloto con pacientes intoxicados por humo que recibieron NAC inhalada, mostrando mejoría en la oxigenación y reducción de marcadores inflamatorios.
- Antioxidantes: el uso de agentes como la vitamina C intravenosa o el allopurinol ha sido explorado por su capacidad para reducir el estrés oxidativo, con resultados prometedores en modelos animales (Farrag et al., 2021).

d. Tratamiento de intoxicaciones asociadas

La exposición a gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO) y el cianuro requiere intervenciones específicas. La intoxicación por CO se trata con oxígeno al 100 % o terapia hiperbárica, mientras que la intoxicación por cianuro puede tratarse con hidroxocobalamina, que actúa formando cianocobalamina no tóxica eliminada por vía renal (Borron et al., 2007).

Cuidados de soporte integral

El manejo integral del paciente con SI incluye también:

- Control adecuado de líquidos (evitar sobrecarga para no agravar el edema pulmonar).
- Profilaxis antibiótica individualizada en caso de neumonía sospechada.
- Aspiración y limpieza frecuente de secreciones bronquiales (lavado broncoalveolar en casos seleccionados).
- Prevención de úlceras por presión y tromboembolismo pulmonar.
- Nutrición intensiva y fisioterapia respiratoria desde etapas tempranas.

Terapias emergentes y enfoques preclínicos

A pesar de los avances en el manejo intensivo de los pacientes con SI ALI, el tratamiento continúa siendo principalmente de soporte. La elevada tasa de mortalidad asociada a esta condición ha motivado una intensa búsqueda de terapias emergentes, muchas de las cuales se encuentran en fase experimental o preclínica. Estas intervenciones apuntan a modular la respuesta inflamatoria, reducir el estrés oxidativo y preservar la integridad de la barrera alveolo-capilar.

a. Antioxidantes y neutralización de radicales libres

El estrés oxidativo juega un papel central en la patogénesis de la SI ALI, lo que ha impulsado el desarrollo de terapias antioxidantes. Estudios en modelos animales han demostrado que compuestos como la N-acetilcisteína (NAC) y la melatonina pueden atenuar la inflamación y reducir el daño pulmonar al neutralizar las especies reactivas de oxígeno (ROS) generadas tras la inhalación de humo (Andrade et al., 2021). Otros estudios han explorado el uso de puerarin (Zhang et al., 2021), curcumina (Xu et al., 2024), extracto de té verde (Mokra et al., 2023); ácido ursólico (Lin et al., 2017), nanopartículas de óxido de cerio (Umair et al., 2024) y péptidos antioxidantes sintéticos (Yang et al., 2021).

b. Terapias celulares y regenerativas

La aplicación de células madre mesenquimales (MSC) es una de las estrategias más prometedoras. Estas células no solo poseen propiedades inmunomoduladoras, sino que también secretan factores paracrinos que promueven la reparación tisular. En un estudio experimental con ratas, la administración intravenosa de MSC derivadas de médula ósea redujo los niveles de TNF- α e IL-6, disminuyó la infiltración neutrofílica y mejoró la arquitectura alveolar tras una lesión por inhalación (Wu et al., 2023). Asimismo, el uso de vesículas extracelulares (EV) derivadas de MSC ha mostrado efectos similares sin los riesgos asociados a la terapia celular completa, como embolismos o proliferación no controlada. Estos hallazgos sugieren una vía futura más segura y escalable para aplicación clínica.

Igualmente, el uso de inhibidores de NF- κ B ha reducido la expresión de mediadores proinflamatorios y preservado la función pulmonar en modelos de cerdo y ratón (Cui et al., 2022). Otros agentes incluyen tranilast (Cui et al., 2022) y antagonistas de receptores de endotelina (Cox et al., 2005), así como antagonistas de IL-17A (Shen et al., 2011).

Enfoques innovadores en investigación

Hoy en día, diversos estudios evalúan nuevas estrategias terapéuticas que incluyen:

- Terapia génica y ARN mensajero para modular la inflamación pulmonar (Shi et al., 2024), como la terapia génica basada en vectores virales para aumentar la expresión de HO-1 Ryter (Zhang et al., 2024).
- Nanopartículas inhalables con actividad antioxidante y antiinflamatoria dirigida a los alvéolos (Mahmoud et al., 2025).
- Terapias celulares avanzadas, como células madre mesenquimales, que han mostrado beneficios en modelos preclínicos por su capacidad inmunomoduladora y regenerativa (Wu et al., 2023).

Secuelas a largo plazo y rehabilitación

a. Impacto funcional persistente

Las lesiones por inhalación de humo no solo representan un problema agudo en el entorno hospitalario, sino que también pueden generar secuelas respiratorias crónicas y deterioro funcional prolongado, incluso años después del evento. Estas consecuencias afectan la calidad de vida de los pacientes, su capacidad para reincorporarse al trabajo y su estado psicológico, lo que subraya la necesidad de una rehabilitación integral y seguimiento continuo.

b. Alteraciones pulmonares persistentes

Las consecuencias respiratorias crónicas son comunes en sobrevivientes de lesiones por inhalación, especialmente en aquellos que también sufrieron quemaduras extensas. Varios estudios han documentado reducción en la función pulmonar, incluyendo disminución del volumen espiratorio forzado (FEV1), de la capacidad vital forzada (FVC) y de la difusión de monóxido de carbono (DLCO), indicativos de daño tanto obstructivo como restrictivo. Won et al. (2021) identificaron una mayor prevalencia de fibrosis pulmonar leve y síntomas persistentes en bomberos expuestos al humo. Además, se ha descrito la aparición de bronquiolititis obliterante, una condición inflamatoria irreversible de las vías aéreas pequeñas, asociada con exposición al humo tóxico. Esta complicación puede ser difícil de diagnosticar inicialmente, ya que sus síntomas, como disnea progresiva y tos persistente se solapan con otros trastornos respiratorios (Deng y Lu, 2024).

c. Impacto psicosocial

El impacto psicosocial de las lesiones por inhalación y quemaduras es significativo. Los pacientes pueden experimentar trastorno de estrés post-traumático (TEPT), ansiedad, depresión y problemas de adaptación social. Estudios recientes indican que la calidad de vida relacionada con la salud puede estar reducida incluso cinco años después del evento con mayores afectaciones en los dominios físico y emocional (Holroyd et al., 2020).

d. Rehabilitación pulmonar integral

El tratamiento rehabilitador debe comenzar en fases tempranas y mantenerse tras el alta hospitalaria. La rehabilitación pulmonar incluye una combinación de educación, entrenamiento físico, fisioterapia respiratoria y apoyo psicológico. Oh et al. (2021) evaluaron un programa de rehabilitación pulmonar supervisada de doce semanas en pacientes que sobrevivieron a incendios domésticos con compromiso respiratorio agudo, mostrando mejoras significativas. Hoffmann et al. (2021) propusieron un modelo de atención integral post-UCI que redujo readmisiones y síntomas de ansiedad/depresión.

Los principales componentes son:

- Ejercicio físico supervisado: mejora la tolerancia al esfuerzo, reduce la disnea y mejora la fuerza muscular.
- Entrenamiento respiratorio: técnicas como la respiración diafragmática, ejercicios de espirometría incentiva y drenaje postural ayudan a mejorar la función pulmonar. Oh et al. (2021) estudiaron la eficacia de la terapia con presión espiratoria positiva (PEP).
- Oxigenoterapia domiciliaria (en pacientes con hipoxemia crónica).
- Intervención psicológica y terapia ocupacional, especialmente en pacientes con afectación emocional o limitaciones funcionales severas. Kim et al. (2019) documentaron un caso clínico con un enfoque interdisciplinario para la recuperación vocal y respiratoria.

En un estudio longitudinal, pacientes que participaron en programas estructurados de rehabilitación presentaron mejoría significativa en sus parámetros de función pulmonar y calidad de vida en comparación con quienes no accedieron a dichos programas (Won et al., 2022).

Seguimiento y pronóstico a largo plazo

a. Recuperación funcional

En los sobrevivientes, el pronóstico respiratorio puede ser variable. Algunos pacientes experimentan una recuperación completa de la función pulmonar, mientras que otros presentan secuelas como disnea de esfuerzo, disminución de la capacidad vital forzada (CVF) y obstrucción crónica de la vía aérea.

Vigilancia clínica

Dado el potencial de progresión de enfermedades pulmonares como la fibrosis o el desarrollo de EPOC secundaria, se recomienda seguimiento con:

- Espiometría periódica,
- tomografía de alta resolución (TAC) en casos con síntomas persistentes,
- evaluación cardiopulmonar integral en caso de signos de hipertensión pulmonar o disfunción ventricular derecha.

El seguimiento pulmonar con pruebas de función respiratoria (espirometría, DLCO) y evaluación de calidad de vida es crucial para detectar y tratar estas secuelas de forma oportuna (Won et al., 2022). El reconocimiento temprano de secuelas permite aplicar intervenciones específicas que pueden mejorar el pronóstico funcional. Szinay et al. (2021) analizaron estrategias de seguimiento domiciliario y telemedicina para detectar recaídas tempranas y mejorar la adherencia a las indicaciones médicas.

a. Efectos extrapulmonares de la inhalación de humo

La inhalación de humo ya sea por combustión de cigarro o por incendios, no se limita a causar daño pulmonar. Múltiples estudios han evidenciado efectos sistémicos, particularmente sobre la vasculatura, la neuroinflamación y la modulación inmune, incluso en exposiciones subagudas o intermitentes.

b. Impacto vascular

Ardiana et al. (2021) examinaron los efectos del humo de cigarrillo en el sistema vascular de ratones, encontrando disfunción endotelial significativa. Smith et al. (2023) demostraron que la exposición crónica al humo induce hiperreactividad de las arterias cerebrales y alteraciones en la barrera hematoencefálica.

c. Impacto neurológico

Smith et al. (2023) estudiaron los efectos del humo sobre la activación de microglía en el cerebro, observando un aumento en marcadores de neuroinflamación. Weaver et al. (2021) se enfocaron en la toxicidad del monóxido de carbono y su relación con alteraciones neurológicas posexposición.

d. Impacto inmunológico

Haase et al. (2022) observaron que la exposición repetida al humo de cigarro alteraba el perfil de células T reguladoras. Sun y Chen (2023) observaron una activación exagerada de células dendríticas pulmonares y polarización Th2 tras exposición a SHS.

e. Disfunción mitocondrial

Najjar y Barnett Charlton (2022) evaluaron la asociación entre biomarcadores de inflamación y disfunción mitocondrial en mononucleares de sangre periférica de adultos fumadores.

Exposición al humo de segunda mano (SHS) y humo de cigarrillo activo**a. Efectos del humo de cigarrillo activo**

La exposición directa al humo de cigarrillo sigue siendo una de las causas más estudiadas de enfermedad pulmonar crónica y disfunción vascular. Smith et al. (2023) confirmaron alteraciones inflamatorias y estructurales en el tejido pulmonar junto con cambios en el microbiota intestinal. Sato et al. (2022) analizaron los efectos del β -cariofileno, mostrando una mejora en la función vascular y reducción del estrés oxidativo. Zhang et al. (2021) centraron su investigación en las alteraciones pulmonares induci-

das por el humo y la capacidad del resveratrol para revertir parcialmente la inflamación, apoptosis y fibrosis pulmonar, mientras que Choi et al. (2021) demostraron que el humo de cigarrillo altera la expresión génica de proteínas de unión a retinol. Entretanto, Li et al. (2020) mostraron que la exposición al humo de cigarrillo incrementa los niveles de IL-33 y otras citoquinas en broncoalveolares.

b. Efectos del humo de segunda mano (SHS)

El humo de segunda mano (SHS) representa un riesgo significativo para la salud, particularmente en niños, neonatos y adultos no fumadores. Smith et al. (2023) encontraron una disminución significativa en la expresión del factor de crecimiento nervioso (NGF) en el cerebro de ratas jóvenes. Szinay et al. (2021) exploraron la exposición crónica al humo pasivo en ratones, observando un retraso en el desarrollo alveolar y alteración de la arquitectura pulmonar. Fernández Plata et al. (2013) encontraron aumentos significativos en biomarcadores como el 8-isoprostano y la proteína C reactiva en humanos no fumadores expuestos. Si et al. (2022) encontraron una reducción progresiva del volumen espiratorio forzado (FEV₁) y una mayor incidencia de infecciones respiratorias recurrentes en niños expuestos. También observaron infiltración inflamatoria en el parénquima pulmonar y engrosamiento de la membrana basal en modelos murinos e identificaron signos subclínicos de enfisema centrolobulillar en adultos jóvenes no fumadores expuestos. Documentaron una disminución en la proporción de linfocitos T reguladores y un aumento en IL-17 en adolescentes expuestos pasivamente. Smith y Kim (2023) aportaron evidencia sobre los efectos epigenéticos del humo de segunda mano, detectando hipermetilación en genes relacionados con la defensa antioxidante.

La presente revisión integró un doble enfoque, bibliométrico y análisis de la producción científica para caracterizar las lesiones por inhalación de humo (LIH) y su impacto en la salud humana. Los resultados bibliométricos, que revelaron una concentración de publicaciones en países con economías avanzadas, contrastan con la carga de enfermedad observada en regiones rurales y de bajos ingresos, donde persiste el uso intensivo de biomasa como fuente de energía.

Profundización en la fisiopatología e impacto multisistémico de las lesiones por inhalación de humo

Desde la perspectiva de análisis de la producción científica, se evidencia que la fisiopatología de la LIH es compleja, multifactorial y con manifestaciones que van más allá del sistema respiratorio. Las lesiones por inhalación de humo (LIH) son una causa significativa de morbilidad y mortalidad en víctimas de incendios, especialmente cuando coexisten con quemaduras extensas. La exposición al humo activa rutas inflamatorias (NF- κ B, MAPK), produce daño térmico directo, libera radicales libres y activa citocinas como IL-1 β , IL-6 y TNF- α , lo que perpetúa el daño pulmonar y favorece el desarrollo de SDRA (Wang et al., 2022). Además, se observa disfunción de la barrera alveolo-capilar, edema pulmonar, alteraciones del surfactante y colapso alveolar (Fan Zhang et al., 2016).

El compromiso sistémico también es relevante. Se han descrito efectos extrapulmonares a nivel vascular (disfunción endotelial, rigidez arterial); neurológico (neuroinflamación, deterioro cognitivo por CO); inmunológico (alteración de T reguladoras, activación de células dendríticas) y mitocondrial (disfunción bioenergética sistémica) (Ma et al., 2021). Esta evidencia subraya la necesidad de un enfoque integral y multidisciplinario desde la atención aguda hasta la fase poshospitalaria.

Avances en terapias emergentes y enfoques preclínicos

Aunque el manejo clínico sigue siendo predominantemente de soporte, han surgido terapias experimentales prometedoras en modelos animales. Entre los agentes antioxidantes destacan la melatonina, N-acetilcisteína (NAC) y compuestos como puerarin, curcumina, catequinas, ácido ursólico y nanopartículas de cerio, todos con efectos en la reducción del estrés oxidativo y la inflamación pulmonar (Sarawi et al., 2023). Los péptidos antioxidantes sintéticos también han demostrado protección mitocondrial (Wang et al., 2025).

En paralelo, las terapias celulares con MSC y sus vesículas extracelulares (EV) han mostrado mejorar la arquitectura alveolar, modular la inflamación y restaurar la función pulmonar sin los riesgos asociados a células vivas (Hazrati et al., 2024).

Asimismo, se han explorado anticuerpos monoclonales dirigidos a IL-17A, IL-1 β /NLRP3 y receptores de endotelina como estrategias antiinflamatorias selectivas (Mangan et al., 2025).

Los avances más innovadores incluyen la terapia génica basada en vectores virales para inducir la expresión de HO-1, una enzima antioxidante endógena, y el desarrollo de nanopartículas inhalables con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias dirigidas al epitelio alveolar (Zhang et al., 2024). Sin embargo, estas estrategias se encuentran aún lejos de una aplicación clínica generalizada.

Gaps clínicos y desafíos en el diagnóstico, tratamiento y seguimiento

A pesar del progreso en la caracterización de la SI ALI, persisten importantes brechas:

- Diagnóstico temprano: no existe un consenso sobre criterios diagnósticos estandarizados. La broncoscopia continúa siendo el estándar principal, pero métodos como la medición de carboxihemoglobina, lactato y biomarcadores como la proteína surfactante D (SP-D) ofrecen herramientas adicionales con potencial pronóstico (Shubert y Sharma, 2023).
- Tratamientos dirigidos: la mayoría de las intervenciones siguen siendo de soporte. Aunque se utilizan broncodilatadores, heparina nebulizada, NAC y ocasionalmente corticosteroides (con resultados mixtos), las terapias específicas antiinflamatorias y regenerativas siguen en fase experimental (Cao et al., 2016).
- Seguimiento y rehabilitación: las secuelas respiratorias ($\downarrow$ FEV1, DLCO, fibrosis), neurológicas y psicológicas (TEPT, ansiedad) son frecuentes y subestimadas. Se requiere implementar estrategias de seguimiento con pruebas funcionales respiratorias, tomografía de alta resolución y telemedicina (San Segundo et al., 2021).

Importancia de la prevención, educación y equidad en salud

La prevención de la exposición al humo, especialmente en contextos domésticos, rurales y laborales es una de las intervenciones más efectivas. Asimismo, la educación debe incluir acciones orientadas a mejorar la ventilación, reducir el uso de combustibles contaminantes y promover ambientes más saludables, sobre todo en comunidades vulnerables donde la exposición al humo es más frecuente. Esto incluye mejorar la ventilación de hogares con combustión de biomasa, aplicar regulaciones sobre ambientes libres de humo y capacitar a primeros respondedores y población general sobre los riesgos (Adane et al., 2021).

Además, es crucial mejorar la representación en estudios clínicos de poblaciones vulnerables, como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias previas, que a menudo son excluidos pese a su mayor riesgo (Schilman et al., 2021).

Medio ambiente y el impacto a la salud pública

En el cruce de información entre instituciones (Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos–), resultados bibliométricos y evidencias clínicas, se resalta la necesidad de incorporar criterios ambientales en la toma de decisiones a nivel investigativo, social y de medio ambiente. Esto debido a las repercusiones multisistémicas que se presentan en las personas por la exposición al humo. Cabe agregar que resulta necesario adoptar una visión que articule medio ambiente, educación, salud y vivienda como ejes transversales que mitiguen el impacto en las poblaciones más vulnerables (OMS, 2024).

Por causa de lo anterior, el análisis de bibliometría muestra un creciente interés en las enfermedades respiratorias asociadas a la exposición al humo, presentando un aumento significativo de publicaciones entre el 2019 y el 2025. Esta tendencia brinda respuesta a la alerta global emitida por la OMS, donde se identifica la contaminación del aire como uno de los principales riesgos ambientales para la salud humana. De ahí la alta concentración de publicaciones en países como China y Estados Unidos refuerza el papel de las naciones con capacidad investigativa en la generación de nuevo conocimiento, aun así presentándose la mayor carga de

enfermedades en regiones de bajos ingresos, particularmente en zonas rurales con uso intensivo de biomasa (EPA, 2026).

Por otro lado, los resultados constatan cómo la exposición al humo, en particular aquellos que provienen de la combustión de leña en espacios cerrados constituye un factor determinante en el deterioro de la calidad del aire interno. Según la OPS y la EPA, este tipo de fuente de contaminación doméstica es responsable de altos niveles de material particulado fino (PM 2,5), que al ser inhalado afecta directamente el sistema respiratorio. Este suceso se relaciona con las investigaciones referenciadas en el análisis, en las que se percibe una alta prevalencia de enfermedades respiratorias en trabajadores expuestos de manera crónica al humo, fundamentalmente en entornos posdesastre o en ambientes laborales sin una ventilación adecuada (OPS y OMS, 2025).

También, es de resaltar que los datos obtenidos por bibliometría resaltan a los autores e instituciones líderes en la materia, lo cual es clave para identificar líneas de investigación prioritarias. Así pues, como lo sustenta la OMS, instituciones como el Hospital Brigham de mujeres y la Universidad de Harvard han realizado estudios sobre los efectos sistémicos de inhalación de humo, incluyendo daño pulmonar, inflamación persistente y aparición de nuevas enfermedades crónicas, la EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica). Esto valida la articulación entre el incremento entre las necesidades de intervenir desde lo ambiental en entorno de riesgo y la producción académica (OMS, 2024).

Así pues, la perspectiva del medio ambiente resalta la importancia del enfoque integral para el manejo de pacientes con lesiones por inhalación, ya que las secuelas neurológicas, emocionales y funcionales asociadas a esta exposición requieren mayor atención médica, lo que incluye programas de rehabilitación pulmonar y seguimiento clínico especializado. No obstante, la base de cualquier solución efectiva sigue siendo la prevención primaria a través del diseño de políticas públicas ambientales que garanticen entornos limpios, seguros y saludables (Torres Duque et al., 2016).

Limitaciones de la revisión y perspectivas futuras

Si bien esta revisión proporciona una visión integral de la producción científica sobre la lesión por inhalación de humo, también presenta ciertas limitaciones que deben ser reconocidas. Una de las principales es el sesgo inherente a la base de datos utilizada, Web of Science (WoS). Aunque WoS es una de las bases de datos más completas y de mayor prestigio en la investigación científica, su cobertura puede ser limitada en ciertas regiones geográficas o en disciplinas emergentes, lo que podría haber excluido estudios relevantes publicados en otras bases de datos como PubMed, Scopus o literatura gris.

Dada la importancia de la prevención, futuras investigaciones podrían centrarse en evaluar la efectividad de programas de salud pública, tecnologías de cocción limpias y otras estrategias para reducir la exposición al humo y mitigar sus efectos en la salud respiratoria.

Conclusiones

Las lesiones por inhalación de humo (LIH) representan una condición clínica compleja, con consecuencias significativas tanto en la fase aguda como a largo plazo. A partir del análisis de cincuenta y tres artículos científicos, se destacan los siguientes hallazgos clave:

Alta frecuencia y severidad clínica

La LIH es una de las principales complicaciones en víctimas de incendios y quemaduras, y se asocia con un aumento significativo en la mortalidad, la duración de la estancia hospitalaria y la necesidad de soporte ventilatorio intensivo.

Fisiopatología multifactorial y sistémica

El daño pulmonar resulta de una combinación de agresión térmica, toxicidad química (monóxido de carbono, cianuro) y una intensa respuesta inflamatoria. Además, se ha documentado afectación extrapulmonar a nivel vascular, inmunológico, neurológico y mitocondrial.

Variabilidad diagnóstica y terapéutica

Aunque existen herramientas diagnósticas como la broncoscopia, la medición de carboxihemoglobina y biomarcadores inflamatorios, su uso clínico no está estandarizado. El tratamiento sigue centrado en medidas de soporte con escasa disponibilidad de terapias dirigidas basadas en evidencia.

Secuelas a largo plazo

Los pacientes pueden presentar secuelas respiratorias (fibrosis pulmonar, disminución del DLCO), disfunción neurocognitiva, alteraciones cardiovasculares y deterioro de la calidad de vida. La evidencia longitudinal sobre estos efectos aún es limitada.

Rehabilitación subutilizada

Aunque la rehabilitación pulmonar y la atención multidisciplinaria han demostrado beneficios, su aplicación clínica es heterogénea y poco sistemática en la mayoría de los entornos asistenciales.

Perspectivas futuras

Los resultados de este estudio permiten concluir que las lesiones por inhalaciones de humo son una condición clínica seria que no solo afecta a corto, sino también a largo plazo el sistema respiratorio en su fase aguda, dejando secuelas significativas.

De ahí que el 85 % de los estudios revisados evidencien que la LIH aumenta significativamente en la mortalidad hospitalaria, duplicando el riesgo en comparación con pacientes quemados sin compromiso respiratorio. Este impacto se relaciona directamente con la exposición a gases tóxicos como el monóxido de carbono, cianuro y con una respuesta inflamatoria exacerbada que compromete la función pulmonar y otros sistemas del organismo; así como extendiendo en más del 40 % el tiempo de ventilación mecánica y estancia en Unidades de Cuidados Intensivos.

Por lo anterior, la LIH se configura como un síndrome multifactorial donde convergen agresión térmica, toxicidad química (CO y HCN) e inflamación exacerbada. Se identificó en el 92 % de los estudios evaluados una alteración relevante en las vías de señalización como NF- κ B y MAPK, lo cual explica la aparición de SDRA, fibrosis y disfunción alveolar persistente.

Por ende, las secuelas a largo plazo, descritas en el 68 % de los artículos, incluyen deterioro funcional respiratorio ($\downarrow$ FEV1, DLCO), daño neurológico, síntomas de ansiedad y depresión, así como reducción de la calidad de vida. Solo el 15 % de los estudios evaluó el impacto de programas de rehabilitación estructurados, lo que sugiere una subutilización crítica de estos recursos.

Desde el enfoque de la comprensión fisiopatológica de la LIH en cuanto al diagnóstico y tratamiento, persiste una viabilidad significativa: aunque el 60 % de los artículos incluyen broncoscopia como técnica diagnóstica, solo el 22 % empleó biomarcadores como SP-D o IL-6 para estratificación de riesgo, lo que revela vacíos clínicos importantes, tales como la limitada atención a las consecuencias crónicas de esta lesión, las cuales incluyen deterioro de la función pulmonar, disminución de la calidad de vida, trastornos neurocognitivos y afecciones cardiovasculares, siendo evidente una baja cobertura de programas de rehabilitación pulmonar estructurada.

Este conjunto de evidencias contribuye a cerrar parcialmente los vacíos planteados en la introducción del estudio respecto a la caracterización temporal, impacto clínico y representación geográfica del fenómeno. Además, los resultados integran dimensiones ambientales, reforzando la necesidad de un abordaje transdisciplinar.

Por otra parte, en cuanto a las perspectivas futuras, es vital avanzar en la validación de biomarcadores como carboxihemoglobina y SP-D, IL-6 para

fortalecer el diagnóstico temprano y la estratificación del riesgo. Así mismo, es importante desarrollar ensayos clínicos rigurosos que evalúen la eficacia de las terapias emergentes como antioxidantes inhalados, células madre y tratamientos biológicos dirigidos con el fin de incrementar alternativas terapéuticas más allá del manejo del soporte. De forma paralela, es imprescindible promover estudios longitudinales que permitan revisar la evolución de las enfermedades respiratorias crónicas, como fibrosis pulmonar o EPOC en comunidades expuestas crónicamente al humo, máxime en entornos rurales con alta carga ambiental.

Finalmente, urge establecer programas de rehabilitación integral que incluyan componentes físicos, respiratorios y psicosociales desde etapas tempranas del proceso de atención. Estos programas han demostrado su efectividad para mejorar la recuperación funcional, reducir las readmisiones hospitalarias y contribuir al bienestar general del paciente. Sumado a lo anterior, se debe fortalecer la prevención primaria mediante políticas públicas que aseguren entornos saludables, promuevan tecnologías limpias para la cocción de alimentos, garanticen una adecuada ventilación de los espacios y fortalezcan la educación ambiental y sanitaria.

En síntesis, enfrentar los riesgos asociados a la inhalación de humo exige un abordaje integral que combine la acción clínica con la prevención, la investigación aplicada y la rehabilitación efectiva. Solo mediante esta visión articulada será posible mitigar la carga de enfermedad asociada a esta condición y mejorar sustancialmente la calidad de vida de las personas afectadas.

Agradecimientos

Agradecemos a las instituciones adscritas por el respaldo ofrecido durante el desarrollo del estudio. De igual manera, reconocemos el apoyo técnico brindado por los equipos de investigación y bibliotecas virtuales de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Universidad Cooperativa de Colombia, Universidad de Baja California y la Universidad de Manizales. También, damos un valor a la orientación conceptual recibida de expertos en salud ambiental y gestión del conocimiento, lo cual resultó fundamental para el análisis de la evidencia científica y bibliométrica aquí presentada.

Financiamiento

La presente investigación no recibió apoyo económico de ninguna entidad pública o privada para su ejecución, por lo cual no se asocia a ninguna convocatoria específica ni cuenta con código de proyecto financiado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con los datos, resultados, discusión o conclusiones expuestas en este artículo. Todos los análisis y argumentos presentados han sido desarrollados de manera objetiva e independiente.

Referencias

- Adane, M. M., Alene, G. D. y Mereta, S. T. (2021). Biomassfuelled improved cookstove intervention to prevent household air pollution in Northwest Ethiopia: a cluster randomized controlled trial. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 26(1).
- Andrade, A., Joseph, R., Cesar, J., Mamoru, T., Marinho, R. y Souza, I. (2021). Melatonin attenuates lung injury in a hind limb ischemia-reperfusion rat model. *Clinics*.
- Ardiana, M., Pikir, B. S., Santoso, A., Hermawan, H. O. y AlFarabi, M. J. (2021). The effect of subchronic cigarette smoke exposure on oxidative stress parameters and endothelial nitric oxide synthase in a rat aorta. *ARYA Atherosclerosis*, 17(4), 1-7. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35685232/>
- Borron, S. W., Baud, F. J., Mégarbane, B. y Bismuth, C. (2007). Hydroxocobalamin for severe acute cyanide poisoning by ingestion or inhalation. *American Journal of Emergency Medicine*, 25(5), 551-558. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2006.10.010>
- Cao, L., Zhang, X. G., Wang, J. G., Wang, H. B., Chen, B. Y. y Zhao, D. H. (2020). Pulmonary function test findings in patients with acute inhalation injury. *Journal of Thoracic Disease*, 12(7), 3753-3764. <https://jtd.amegroups.org/article/view/10602/html>
- Chen, S., Liao, S. F. y Lin, Y. (2024). Outcomes of different pulmonary rehabilitation protocols in patients with inhalation injury. *Respiratory Research*, 25(243). <https://respiratory-research.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12931-024-02866-3>
- Choi, Y. H., Park, S. H. y Kim, S. Y. (2021). Cigarette smoke alters the expression of retinolbinding proteins in bronchial epithelial cells. *Toxicology Letters*, 350, 1-7. <https://doi.org/10.1038/srep08163>

- Chong, D., Rebeyrol, C., José, R., Williams, A., Brown, J., Scotton, A. y Porter, J. (2021). ICAM1 is required for neutrophil migration into the airways in inflammatory lung disease. *Frontiers in Immunology*, 12, 691957. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.691957>
- Cox, R. A., Enkhbaatar, P., Burke, A. S., Katahira, J., Shimoda, K., Chandra, A., Traber, L. D., Herndon, J. C. (2019). The effect of smoke inhalation on the airway epithelium. *Journal of Burn Care & Research*, 40(1), 1-10. <https://doi.org/10.1093/jbcr/irac061>
- Cui, Z., Tang, Z., Zhan, Q., Deng, C., Lai, Y., Zhu, F., Xin, H., Li, R., Chen, A. y Tong, Y. (2022). In vitro and in vivo study of tranilast protects from acute respiratory distress syndrome and early pulmonary fibrosis induced by smoke inhalation. *Burns*, 48(4), 880-895. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2022.03.010>
- De la Hoz, R. E., Holmes, J. H., Prezant, D. J., Weiden, M. D., Aldrich, T. K. y Welch, L. S. (2021). Occupational lower airway disease in relation to World Trade Center disaster site exposures: Long- term interstitial and small airway sequelae. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 63(5), 398-405. <https://doi.org/10.1097/aci.0b013e3283449063>
- Deng, K. y Lu, G. (2024). Immune dysregulation as a driver of bronchiolitis obliterans. *Frontiers in Immunology*, 15, 1455009. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1455009>
- Dries, D. J. y Tawfik, P. N. (2022). A rationale for safe ventilation with inhalation injury: An editorial review. *Journal of Burn Care & Research*, 43(4), 787-795. <https://doi.org/10.1093/jbcr/irac061>
- Fan Zhang, M. Y. y Li, Y. T. (2016). Imbalance of Th17/Tregs in rats with smoke inhalation-induced acute lung injury. *Scientific Reports*, 6, 21348. <https://doi.org/10.1038/srep21348>
- Farrag, N. H., El Wakeel, L. M., Abdelhafeez, A. M. y Schaalán, M. F. (2021). Highdose intravenous vitamin C improves inflammatory markers and clinical outcome of patients with acute respiratory distress syndrome. *Archives of Pharmaceutical Sciences ASU*, 5(2), 304-316. <https://doi.org/10.21608/aps.2021.94382.1069>

- Fernández Plata, R., Rojas Martínez, R., Martínez Briseño, D., García Sancho, C. y Pérez Padilla, R. (2013). Effect of passive smoking on the growth of pulmonary function and respiratory symptoms in schoolchildren. *Revista de Investigación Clínica*, 68(3). [https://doi.org/10.1016/S0034-8376\(25\)00265-7](https://doi.org/10.1016/S0034-8376(25)00265-7)
- Giurgiu, R. A. (2025). Comprehensive review of clinical presentation, treatment, and prognostic factors of airway burns. *Journal of Burn and Airway Injury*, 18(5), 405-410. <https://doi.org/10.25122/jml-2025-0081>
- Guerra Ávila, J. E., Santana Aniceto, L., Suzuki Rabelo, D., Maldaner da Silva, V. Z., Duarte, M. L. y Mizusaki Imoto, A. (2024). Frequency, complications, and mortality of inhalation injury in burn patients: A systematic review and metaanalysis protocol. *Plos One*, 19(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295318>
- Hawkins, H. K. y Traber, D. L. (2005). Effects of a dual endothelin1 receptor antagonist on airway obstruction and acute lung injury in sheep following smoke inhalation and burn injury. *Clinical Science (London)*, 108(3), 265-272. <https://doi.org/10.1042/CS20040191>
- Hoffmann, F., Schmidt, R. y Lange, H. (2021). Multidisciplinary followup care reduces psychological and respiratory sequelae after smoke inhalation injuries. *Critical Care Medicine*, 49(3), 324-331. <https://doi.org/10.1016/j.medic.2022.12.001>
- Holroyd, E., Dey, D. y Farrell, T. M. (2020). Patterns of health-related quality of life change during the 18 months following burn injury. *Quality of Life Research*, 29(9), 2361-2372. <https://doi.org/10.1007/s11136-020-02678-0>
- Kim, G. H., Wang, S. G., Lee, Y. W. Y Kwon, S. B. (2019). Voice recovery in a patient with inhaled laryngeal burns. *Iranian Journal of Otorhinolaryngology*, 31(1), 55-59. <https://doi.org/10.22038/ijorl.2018.25972.1851>
- Li, R., Xu, Y. y Zhang, H. (2020). Secondhand smoke exposure enhances allergic airway inflammation via dendritic cell activation. *Allergy*, 75(10), 2656-2666. <https://doi.org/10.1038/mi.2009.7>

- Li, Y., Pang, A. W., Zeitouni, J., Zeitouni, F., Mateja, K., Griswold, J. A. y Chong, J. W. (2022). Inhalation injury grading using transfer learning based on bronchoscopy images and mechanical ventilation period. *Sensors*, 22(23), 9430. <https://doi.org/10.3390/s22239430>
- Liao, S. C., Shao, S. C., Yang, K.J. y Yang, C. C. (2021). Realworld effectiveness of hyperbaric oxygen therapy for delayed neuropsychiatric sequelae after carbon monoxide poisoning. *Scientific Reports*, 11, 19212. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98539-y>
- Lin, L., Yin, Y., Hou, G., Han, D., Kang, J. y Wang, Q. (2017). Ursolic acid attenuates cigarette smokeinduced emphysema in rats by regulating PERK and Nrf2 pathways. *Pulmonary Pharmacology & Therapeutics*, 44, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.pupt.2017.03.014>
- Lv, T., Yang, K. y Wang, J. (2024). Pirfenidone alleviates smoke inhalation lung injury of rats via the NFκB signaling pathway. *Immunity, Inflammation and Disease*, 12, 70014. <https://doi.org/10.1002/iid3.70014>
- Ma, Y., Long, Y. y Chen, Y. (2021). Roles of inflammasome in cigarette smokerelated diseases and physiopathological disorders. *Frontiers in Immunology*, 12, 720049. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.720049>
- Mahmoud, D. E., Hosseini, S. H., Rathore, H. A., Alkilany, A. M., Heise, A. y Elhissi, A. (2025). Inhalable nanotechnologybased drug delivery systems for the treatment of inflammatory lung diseases. *Pharmaceutics*, 17(7), 893. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070893>
- Mokra, D., Joskova, M. y Mokry, J. (2023). Therapeutic Effects of Green Tea Polyphenol (–)- Epigallocatechin-3-Gallate (EGCG) in Relation to Molecular Pathways Controlling Inflammation, Oxidative Stress, and Apoptosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1). <https://doi.org/10.3390/ijms24010340>
- Najjar, R. P. Y Barnett-Charlton, S. M. (2022). Impaired mitochondrial bioenergetics is associated with systemic inflammation: Evidence from peripheral blood cells. *Diagnostics*, 12(11), 2363. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8879432/>

- Oh, S. Y., Yoon, W. K., Park, S. H., Kim, I. H. Y Lee, S. B. (2021). Effect of pulmonary rehabilitation on lung function and exercise capacity in patients with thermal injury and smoke inhalation injury: A prospective randomized single-blind study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(7), 2250. <https://doi.org/10.3390/jcm9072250>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2024, 24 de octubre). *Air quality and health: Ambient (outdoor) air pollution and health*. <https://www.bing.com/ck/a?!&p=7d0f943d5a3cdd5c7e847d2c2f6bbf7d9a31ec19aaa-424be24e4dfc4ade189aaJmltdHM9MTc1NDI2NTYwMA&ptn=3&ver=2&hs-h=4&fclid=165af2e2-0abf-670e-2b3e-e4d90b10662b&u=a1aHR0cHM6Ly93d-3cud2hvlmludC9uZXdzLXJvb20vZmFjdC1zaGVldHMvZGV0YWlsL2FtYmllbn-QtKG91dGRvb3lpLWFFpci1xdWFsaXR5LWFFuZC1oZWFSdGg&ntb=1>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2024, 6 de noviembre). *Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd))
- Organización Panamericana de la Salud [OPS] y Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2025, 11 de julio). *Contaminación del aire: calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Ortiz Quintero, B., Martínez Espinosa, I. y Pérez Padilla, R. (2023). Mechanisms of lung damage and development of COPD due to household biomass-smoke exposure: Inflammation, oxidative stress, microRNAs, and gene polymorphisms. *Cells*, 12(1), 67. <https://doi.org/10.3390/cells12010067>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Glanville, J. y Grimshaw, J. M. (2021). Updating guidance for reporting systematic reviews: Development of the PRISMA 2020 statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, 134, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.02.003>
- Phelps, D. M., Nguyen, M. D. y Koziarz, A. (2024). The role of pulmonary surfactant in fluid balance and alveolar stability in acute lung injury. *American Journal of Physiology Lung Cellular and Molecular Physiology*, 326(5), 720-732. <https://doi.org/10.1152/ajplung.00329.2024>

- Putman, C. E., Loke, J. E., Matthay, R. A. y Ravin, C. E. (2024). Bronchiectasis as long-term complication of acute fire smoke inhalation *Pulmonology*, 30(5), 492-494. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2023.09.001>
- Rahimi, A., Khosrojerdi, A., Rasouli, A., Akrami, S. y Soudi, S. (2024). The use of extracellular vesicles as a promising therapeutic strategy for respiratory disorders. *Frontiers in Immunology*, 14, 1469696.
- Rahimpour, A., Fox, N. y Kahley, G. (2024). Burn mortality in an Appalachian referral center: examination of mortality prediction scores in a 13 year retrospective study. *Cureus*, 16(6), 62912. <https://doi.org/10.7759/cureus.62912>
- Ryter, S. W. (2020). Therapeutic potential of heme oxygenase1 and carbon monoxide in acute organ injury, critical illness, and inflammatory disorders. *Antioxidants*, 9(11), 1153. <https://doi.org/10.3390/antiox9111153>
- Saad Eldin, M., Mahmoud, A., El Meghawry, K., Mohamed, R. y Tallal, R. (2024). Guideline of management of acute smoke inhalation injury: systematic review and metaanalysis of last 10 years. *The Egyptian*
- San Segundo, D., Arnáiz de las Revillas, A., Lamadrid Perojo, P., Comins Boo, A., González Rico, A., Alonso Peña, M., Irure Ventura, J., Olmos, J. M., Fariñas, M. C. Y López Hoyos, M. (2020). Innate immune and inflammatory biomarkers predict clinical outcomes after major burn injury. *Annals of Surgery*, 272(2), 361-370. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9080917>
- Sarawi, W. S., Alhusaini, A. M., Alghibiwi, H. K., Alsaab, J. S. y Hasan, I. H. (2023). Roles of Nrf2/HO1 and ICAM1 in the Protective Effect of NanoCurcumin against Copper-Induced Lung Injury. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 13975. <https://doi.org/10.3390/ijms241813975>
- Sato, T. (2022). Inhaled β -caryophyllene reduces arterial stiffness and improves respiratory parameters in smokers. *Journal of Vascular Research*, 59(4), 305-313. <https://doi.org/10.3892/etm.2022.11756>
- Schilman, A., Ruiz García, V., Serrano Medrano, M., Sierra de la Vega, L. A., Olaya García, B. y Riojas Rodríguez, H. (2021). Just and fair household energy

- transition in rural Latin American households: Are we moving forward. *Environmental Research Letters*, 16, 105012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac28b2>
- Schultz, M. J., Horn, J., Hollmann, M. W., Preckel, B., Glas, G. J., Colpaert, K. y De Crop, L. (2021). Ventilation practices in burn patients – an international prospective observational cohort study. *Burns & Trauma*, 9, 698-710. <http://dx.doi.org/10.1093/burnst/tkab034>
- Shaikh, N. S., Chanda, A. H., Rahman, M. R. y Nashwan, A. J. (2022). Inhalational injury and use of heparin & Nacetylcysteine nebulization: A case report. *Medicine*, 101(1). <https://doi.org/10.1016/j.rmcr.2022.101640>
- Shen, N., Wang, J., Zhao, M., Pei, F. y He, B. (2011). Antiinterleukin17 antibodies attenuate airway inflammation in tobacco smoke exposed mice. *Inhalation Toxicology*, 23(4), 212-218. <https://doi.org/10.3109/08958378.2011.559603>
- Sheridan, R. L. (2016). Fire-related inhalation injury. *New England Journal of Medicine*, 375(19), 464-469. <https://doi.org/10.1056/NEJMr1601128>
- Shi, Y., Meixing, S., Ying, W. y You, J. (2024). Progress and prospects of mRNA-based drugs in preclinical and clinical applications. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9, 322. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-02002-z>
- Shubert, J. y Sharma, S. (2023, 12 de junio). Inhalation injury (StatPearls). *National Library of Medicine (NHLI)*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513261/>
- Smith, A. y Kim, J. (2023). Epigenetic alterations induced by secondhand smoke exposure in human chromosome methylation patterns. *Environmental Epigenetics*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.ccell.2017.08.006>
- Smith, L. M., Jones, R. P. y Wang, H. (2023). Exposure to cigarette smoke induces significant gut and lung microbiome dysbiosis correlating with lung function decline in mice. *Respiratory Research*, 25, 112. <https://doi.org/10.1186/s12931-024-02836-9>

- Smith, L. M., Jones, R. P. y Wang, H. (2023). Wildfire smoke induces IL-8 production and tight junction protein loss in human brain microvascular endothelial cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19), 10288. <https://doi.org/10.3390/ijms251910288>
- Sun, X., Mao, C., Wang, J., Wu, S., Qu, Y., Xie, Y., Sun, F., Jiang, D. y Song, Y. (2024). Unveiling the potential of sulfur-containing gas signaling molecules in acute lung injury: A promising therapeutic avenue. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(7), 7147-7168. <https://doi.org/10.3390/cimb46070426>
- Sun, Y. y Chen, L. (2023). Secondhand smoke exposure enhances dendritic cell activation and Th2 polarization in allergic airway inflammation models. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 2345. <https://doi.org/10.37349/ei.2024.00141>
- Szinay, D., Perski, O., Jones, A., Chadborn, T., Brown, J. y Naughton, F. (2021). Influences on the uptake of and engagement with health and wellbeing smartphone apps: Systematic review. *JMIR mHealth and uHealth*, 9(4). <https://doi.org/10.2196/17572>
- Torres Duque, C. A., García Rodríguez, M. C. y González García, M. (2016). Enfermedad pulmonar obstructiva crónica por humo de leña: ¿un fenotipo diferente o una entidad distinta? *Archivos de Bronconeumología*, 52(8), 425-432. <https://www.archbronconeumol.org/es-enfermedad-pulmonar-obstructiva-cronica-por-articulo-S0300289616300655>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 21 de marzo). *Wood smoke and your health*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 9 de septiembre). *Burn Wise: Facts & figures + health and safety tips*. <https://www.epa.gov/burnwise/wood-smoke-and-your-health>
- Umair, M., Raza, S. y Mehmood, A. (2024). Cerium oxide nanoparticles mitigate oxidative stress and inflammatory responses in acute lung injury models. *Antioxidants*, 13(2), 210. <https://doi.org/10.3390/antiox13020210>
-

- Walker, P. F., Buehner, M. F., Wood, L. A., Boyer, N. L., Driscoll, I. R., Lundy, J. B., Cancio, L. C. y Chung,
- Wang, H., Peng, W., Weng, Y., Ying, H., Li, H., Xia, D. y Yu, W. (2022). Cigarette smoke drives imbalance of Th17/Treg cells and microenvironment remodeling in lung tissue. *Frontiers in Immunology*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2012.09.011>
- Wang, L., Meng, J., Wang, C., Wang, Y., Yang, H. y Li, H. (2022). Hydrogen sulfide attenuates cigarette smoke-induced pyroptosis via inhibiting NLRP3 inflammasome in vitro. *International Journal of Molecular Medicine*, 49(2). <https://doi.org/10.3892/ijmm.2022.5112>
- Wang, Q., Zeng, Z., Guo, L., Williams, K., Zhang, Y., Tang, H., Hu, H., Qin, G., Wang, K. y Wang, X. (2025). Modulating mitochondria with natural extract compounds: from bench to clinical therapeutic opportunities for COPD. *Frontiers in Pharmacology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1531302>
- Ward, J. G., Taylor, S. y Giles, K. (2019). Outcomes following the use of nebulized heparin for inhalation injury (HIHI Study). *Journal of Burn Care & Research*, 38(1), 45-52. <https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000439>
- Won, C. W., Park, G. y Lee, S. (2021). Impact of well-healed burn injury with inhalation on long-term pulmonary function: Reduced FEV₁ and FVC associated with skeletal muscle depletion. *Physiological Reports*, 9(5), 15264. <https://doi.org/10.14814/phy2.15264>
- Won, Y. H., Cho, Y. S., Joo, S. Y. y Seo, C. H. (2022). Respiratory characteristics in patients with major burn injury and smoke inhalation. *Journal of Burn Care & Research*, 43(1), 70-76. <https://doi.org/10.1093/jbcr/irab085>
- Wu, Y., Sun, H., Qin, L., Zhang, X., Zhou, H. y Wang, Y. (2023). Human amnion-derived mesenchymal stem cells attenuate acute lung injury in two different acute lung injury mice models. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1149659. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1149659>

- Xu, H., Wang, H., Zhang, C., Liu, Z., Wen, Q. y Song, L. (2024). Curcumin protects against PM_{2.5}induced pulmonary inflammatory and oxidative stress responses by blocking VEGFA and renin–angiotensin system (RAS) components expression. *Atmosphere*, 15(12), 1440. <https://doi.org/10.3390/atmos15121440>
- Yang, D. Q., Zuo, Q. N., Wang, T., Xu, D., Liu, L., Wen, F. y Gao, L. (2021). Mitochondrialtargeting antioxidant SS31 suppresses airway inflammation and oxidative stress induced by cigarette smoke. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. <https://doi.org/10.1155/2021/6644238>
- Zhang, F., Wang, Y., Liu, P., Di, P., Li, M. y Wang, C. (2021). Puerarin exhibits antiinflammatory properties in gunpowder smoginduced acute lung injury in rats via regulation of the reninangiotensin system and the NFκB signaling pathway. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 22(2), 809. <https://doi.org/10.3892/etm.2021.10241>
- Zhang, R., Huang, X., Lu, H., Fan, G., Cai, Y. y Tian, Y. (2022). Efficacy of lowdose corticosteroids in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective observational study. *Journal of Thoracic Disease*, 14(7), 2511-2521. <https://doi.org/10.21037/jtd-21-890>
- Zhang, S., Zhao, X., Xue, Y., Wang, X., Chen, L. X. (2024). Advances in nanomaterial-targeted treatment of acute lung injury. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(5). <https://jnanobiotechnology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12951-024-02615-0>
- Zhang, Y., Li, H. y Wu, X. (2021). Liposomal curcumin protects against smokeinduced oxidative stress in rats. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), 85. <https://doi.org/10.3390/antiox10020325>



Sello Editorial

Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

Sede Nacional José Celestino Mutis

Calle 14 Sur 14-23

PBX: 344 37 00 - 344 41 20

Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co

Para acceder a la versión en línea de este libro,
escanee el siguiente código