





Fecha de recibido: 4/10/2023

Fecha de aceptado: 24/02/2024

DOI: 10.22490/21456453.7235

FENOLOGÍA, RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL FRUTO DE MORA UVA (*Rubus floribundus* Kunth.) EN PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

PHENOLOGY, YIELD AND QUALITY OF THE FRUIT OF MULBERRY GRAPES (*Rubus floribundus* Kunth.) IN PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

Enrique Quevedo García¹

Astrid Celeste Díaz Rodríguez²

Ana Francisca González³

¹ Ingeniero Agrónomo, Doctor, Grupo GIAS, Universidad de Pamplona,
Pamplona Colombia. enriquegarcia@unipamplona.edu.co

² Ingeniera Agrónoma, semillero SISPAS, Universidad de Pamplona,
Pamplona Colombia. astrid.diaz2@unipamplona.edu.co

³ Ingeniera Agrónoma, Doctora, Grupo GIAS, Universidad de Pamplona,
Pamplona Colombia. ana.gonzalez2@unipamplona.edu.co

Autor de correspondencia: enriquegarcia@unipamplona.edu.co

Citación: Quevedo, E., Díaz, A., y González, A. (2025). Fenología, rendimiento y calidad del fruto de mora uva (*Rubus floribundus* Kunth.) en Pamplona, Norte de Santander, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 11 - 31.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7235>

RESUMEN

Contextualización: en Colombia, el área sembrada de mora se ha incrementado en los últimos años, la alta aceptación para el consumo en fresco y procesado la ubica como una alternativa para aumentar la oferta de frutas en la cadena productiva de la mora.

Vacío de conocimiento: en Colombia existe un vacío de conocimiento en relación con el comportamiento fenológico, el rendimiento y la calidad del fruto de especies nativas con características atractivas, tanto para el productor como para el consumidor, como lo es *Rubus floribundus* (Kunth.), con adaptación entre 1.800 y 3.000 m.s.n.m.

Objetivos: evaluar el comportamiento fenológico, el rendimiento agronómico y la calidad del fruto de *Rubus floribundus* (Kunth.) en la vereda Cúnuba, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Metodología: se llevó a cabo una investigación en las fincas Pararrayo ($7^{\circ}23'12,4''$ Norte, $72^{\circ}41'9,2''$ Oeste, 2.800 m.s.n.m.) y Arrayán ($7^{\circ}23'28,3''$ Norte; $72^{\circ}41'12,2''$ Oeste, 2.700 m s.n.m.). Se seleccionaron quince plantas y en tres ramas por planta y se registraron las fases fenológicas según la escala BBCH: botón floral (5), floración (6), formación del fruto (7) y maduración (8), du-

rante 125 días. Se realizó la caracterización fisicoquímica del fruto (masa fresca, diámetro polar y ecuatorial, acidez total titulable, acidez iónica, sólidos solubles totales, índice de madurez y color). Se cosecharon diez muestras de 1 kg de frutos, durante tres muestreos. El rendimiento se registró con una frecuencia semanal (Pararrayo) y quincenal (Arrayán), durante 6 meses. El estudio fue no experimental, observacional, de campo, longitudinal y de medidas repetidas.

Resultados y conclusiones: el periodo de botón floral a cosecha fue 124 y 113 días, en la finca 1 y 2, respectivamente; con menor tiempo en crecimiento y maduración del fruto en la Finca 2 (11 días). En la Finca 2 los frutos registraron mayor masa fresca (5,2 g), diámetro ecuatorial (17,1 mm), sólidos solubles totales (12,29 °Brix), acidez total titulable (0,96 %) y producción (207,87 frutos; 994,31 g y $1.104,68 \text{ kg ha}^{-1}$). Mientras que la Finca 1 registró el mayor diámetro polar (29,0 mm), acidez iónica (3,3) e índice de madurez (11,7 %). En la Finca 2 los frutos fueron de mejor calidad; sin embargo, el mayor índice de madurez se registró en la Finca 1.

Palabras clave: crecimiento, estados de desarrollo, frutos, índice de madurez, rendimiento

ABSTRACT

Contextualization: In Colombia, the area planted with blackberries has increased in recent years; the high acceptance for fresh and processed consumption places it as an alternative to increase the supply of fruits in the blackberry production chain.

Knowledge gap: In Colombia, there is a knowledge gap regarding the phenological behavior, yield, and fruit quality of native species with attractive characteristics for both producers and consumers, such as *Rubus floribundus* (Kunth.), with adaptation between 1,800 and 3,000 m.a.s.l.

Purpose: To evaluate the phenological behavior, agronomic yield, and fruit quality of *Rubus floribundus* (Kunth.), in Cúmuba, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Methodology: Research was carried out at the Pararrayo ($7^{\circ}23'12.4''$ North, $72^{\circ}41'9.2''$ West, 2,800 m.a.s.l.) and Arrayán ($7^{\circ}23'28.3''$ North; $72^{\circ}41'12.2''$ West, 2,700 m asl) farms. Fifteen plants were selected and in 3 branches per plant the phenological phases were recorded according to the BBCH scale: flower bud (5), flowering (6), fruit formation (7) and ripening (8), during 125 days. Phy-

sicochemical characterization of the fruit (fresh mass, polar and equatorial diameter, total titratable acidity, ionic acidity, total soluble solids, maturity index and color) was carried out. Ten samples of 1 kg of fruit were harvested during three samplings. Yield was recorded weekly (Pararrayo) and biweekly (Arrayán), during 6 months. The study was non-experimental, observational, field, longitudinal, repeated measures.

Results and conclusions: The flower bud to harvest period was 124 and 113 days in farms 1 and 2, respectively: with less time in fruit growth and ripening in farm 2 (11 days). In farm 2 the fruits recorded higher fresh mass (5.2 g), equatorial diameter (17.1 mm), total soluble solids (12.29 °Brix), total titratable acidity (0.96 %) and yield (207.87 fruits; 994.31 g and $1,104.68 \text{ kg ha}^{-1}$). While farm 1 had the highest polar diameter (29.0 mm), ionic acidity (3.3) and maturity index (11.7 %). In farm 2 the fruits were of better quality; however, the highest maturity index was recorded in farm 1.

Keywords: developmental stages, fruit, growth, maturity index, yield

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

La producción del género Rubus a nivel mundial se estimó en más de 25.000 ha cultivadas para el año 2014, siendo México el de mayor extensión y producción (248.517 t ha⁻¹), seguido de Colombia e Italia (110.453 y 107.479 t ha⁻¹, respectivamente) (Ayala *et al.*, 2013). En Colombia la producción de mora ha venido aumentando en cifras, de 9,62 t ha⁻¹ en el año 2019 a 11,16 t ha⁻¹ para el año 2020 (Agronet, s.f.). El Ministerio de Agricultura y el Plan Frutícola Nacional señalaron que este frutal registra un permanente crecimiento en área cultivada y producción, con proyecciones de incremento en área sembrada de hasta 94,1

% para el año 2026, equivalente a 20.631 ha sembradas; comportamiento que evidencia las oportunidades del producto tanto para abastecimiento del mercado interno como para exportación (Grijalba *et al.*, 2010).

El aumento de la producción de mora en Colombia está relacionado con la idoneidad de las regiones productoras, según las condiciones agroclimáticas para la producción, que inciden directamente en la calidad, la producción y el rendimiento (Solís-Mera, 2021). En Colombia la variedad de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) es una de las más apetecidas para consumo fresco e industrial (Grijalba *et al.*, 2010), y es la que se siembra

mayormente (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], s.f.); lo que indica que el municipio de Pamplona no es la excepción.

La mora es un fruto climatérico de vida útil muy corta, los pigmentos naturales le dan color y sabor a la fruta, así como propiedades antioxidantes por ser una fuente natural de antocianinas. Es fuente de vitamina A, C, E y ácido málico. La combinación de otros atributos define el sabor y, junto con indicadores externos de madurez, brillo y color, determina la calidad (Quevedo y Zuleta, 2020; Escalante *et al.*, 2017). Las propiedades nutricionales y antioxidantes (potencial para nutracéuticos) del fruto se traduce en grandes oportunidades para la industria agrícola (Solís-Mera, 2021).

En este sentido, existe una búsqueda constante de cultivares mejorados con características atractivas tanto para el productor como para el consumidor, como

la variedad “Tupi y Brazos”; sin embargo, en Colombia y casi todas las regiones del mundo donde *Rubus* es nativo, se han desarrollado industrias prósperas basadas en especies nativas (Ayala *et al.*, 2013). Es por esta razón que los agricultores en Colombia han impulsado la siembra de la mora uva (*Rubus floribundus* Kunth.), como una nueva especie que se ha posicionado en el mercado en los últimos años, la cual hace parte de las cultivadas en menor proporción en el país con adaptación entre los 1.800 y 3.000 m.s.n.m. (Moreno-Medina *et al.*, 2016), a pesar de que aun se desconoce la fenología, el rendimiento agronómico y la calidad de la fruta.

De allí que la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento fenológico, el rendimiento agronómico y la calidad del fruto de *R. floribundus* en la vereda Cúnuba, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se llevó a cabo en la zona rural Cúnuba del municipio Pamplona, Norte Santander, Colombia. Se seleccionaron dos fincas denominadas El Pararrayo (7°23'12,4" Norte, 72°41'9,2 Oeste, 2.800 m.s.n.m.) y El Arrayán (7°23'28,3 Norte, 72°41'12,2 Oeste, 2.700 m.s.n.m.), ubicadas bajo las mismas condiciones de pendiente del terreno y manejo agronómico.

Se seleccionaron plantas de *R. floribundus* de propagación asexual, de 12 meses de edad en plena producción agronómica, sembradas a 3 x 3 m (1.111 plantas ha⁻¹) en sistema de conducción o tutorado “T sencilla” en El Pararrayo (Finca 1) y en “cama doble espaldaderas” en El Arrayán (Finca 2). Sistema mecánico de soporte de la planta, compuesto por madera, alambre, tubos de PVC y otros materiales (Franco y Bernal, 2020), en cuyas

estructuras las ramas de las plantas se fijaron y se condujeron, debido a la morfología postrada del género *Rubus* (Ramírez, 2023).

El desarrollo fenológico se registró en quince plantas y tres ramas femeninas por planta, mediante el análisis cronológico de la aparición de cuatro fases durante la floración y la formación del fruto: botón floral (5, aparición del órgano floral en el tallo principal); floración (6, de inicio de floración a apertura, de apertura de flor a polinización y de polinización a formación de fruto); formación del fruto (7, formación del fruto e inicio de cuajado del fruto) y maduración (8, maduración del fruto), mediante la escala Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt Chemise (BBCH) (Enz y Dachler, 1998), cuyo inicio se consideró cuando el 50 % de las ramas marcadas lo presentaron. La fenología se evaluó frecuentemente por la observación visual del aspecto de la planta tomando fotos a cada rama durante 125 días.

Entre las variables de producción se registró el rendimiento a partir de la masa fresca acumulada (g) de la fruta cosechada por planta, con la ayuda de una balanza electrónica (Lexus, E.U.), capacidad $3.600 \pm 0,01$ g, el número de frutos por planta como componente primario de rendimiento y el rendimiento estimado (kg ha^{-1}), con una frecuencia semanal, Pararrayo y quincenal, Arrayán, durante un ciclo de producción (abril a octubre de 2022).

Para determinar la calidad de la fruta, se seleccionaron 10 plantas por finca y se cosechó 1 kg de fruto por planta en la fase de maduración (fase 8) (Icontec, 1977), durante tres muestreos. Los frutos se trasladaron al laboratorio de industrialización y postcosecha de la Universidad de Pamplona para

almacenarse en refrigeración (1°C) hasta su posterior análisis fisicoquímico.

Se determinaron los parámetros de masa fresca (MF), diámetro polar (DP) y ecuatorial (DE), acidez total titulable (ATT), acidez iónica (AI), sólidos solubles totales (SST), índice de madurez (IM) y color (C). La masa fresca se determinó con una balanza electrónica (Lexus, E.U.), con capacidad de $3.600 \pm 0,01$ g. El diámetro polar y ecuatorial se determinó con un calibrador digital (Ubermann, Chile).

El contenido de acidez total titulable, la acidez iónica y los sólidos solubles totales, se determinaron según la metodología para toma de muestra, reportada por Icontec para Jugos y productos de frutas y hortalizas (Icontec, 1977). La acidez total titulable se determinó según la norma AOAC 942.15 (AOAC, 2005), valor que se expresó en porcentaje de ácido málico y se calculó mediante la **Ecuación 1**.

$$\text{Acidez [\%]} = \frac{V \times N \times C}{W} \times 100 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde V: volumen gastado de NaOH (mL), N: normalidad del NaOH (0,1 N), C: constante del ácido málico (0,067 g meq-1), W: masa de la muestra (g).

La medición del pH se realizó por potenciometría con potenciómetro de mesa pH/EC/TDS Waterproof (Hanna Instruments, Italia) a temperatura de referencia de 20°C , según la metodología descrita por el método 981.12/90 de la AOAC (AOAC, 2005).

Los sólidos solubles totales se determinaron mediante un refractómetro portátil (Brixco FG109, China) de baja (0-32 °Brix, resolución 0,2 %) con compensación au-

tomática de temperatura, siguiendo la metodología descrita por la AOAC 932.12 (AOAC, 1995).

El índice de madurez se determinó relacionando el contenido de SST y ATT, según la Ecuación 2.

$$IM = \frac{SST \text{ [°Brix]}}{ATT \text{ [ácido málico]}} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde SST: sólidos solubles totales, ATT: acidez total titulable.

En cuanto a la determinación del color, se realizó por comparación mediante el Sistema de Notación Munsell. La notación define los valores para los parámetros hue (matiz), value (valor) y chroma (croma), y el color Munsell asigna un nombre de color a una determinada notación (Domínguez *et al.*, 2012). El fruto se colocó sobre una base de cartulina color blanco y se comparó el color predominante del fruto con la mencionada tabla Munsell, tomando el dato con mayor similaridad.

El diseño estadístico fue no experimental, observacional, de campo, longitudinal, de medidas repetidas. Para los datos de producción se utilizaron las estadísticas descriptivas, media, desviación estándar y coeficiente de variación por finca. Para el análisis de calidad se utilizó el análisis de correlación lineal de Spearman, en los tres muestreos y cada finca, debido a que las variables no presentaron distribución normal y el tamaño de la muestra fue bajo (30 observaciones). Además, se calcularon las estadísticas descriptivas, media, desviación estándar y coeficiente de variación. Para el análisis de las relaciones entre las variables de calidad se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple, previa revisión de los supuestos de independencia de los residuales y la normalidad se utilizó el normal probability plot (p-p) con los residuales estandarizados. Para el análisis de los componentes principales se utilizó la prueba de adecuación de la muestra de Kaiser-Meyer-Olkin y el determinante de la matriz de varianzas covarianzas.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología

En la Finca 1, la fase de botón floral se inició el 23 de abril de 2022 y requirió 21 días (estadio 5). Seguidamente, se observó la fase de floración con una duración de 12 días (estadio 6), siendo el menor tiempo entre las fincas evaluadas (Figura 1). Después de la floración, se inició la fase de formación y

cuajado del fruto con un período de 63 días (estadio 7). La maduración se inició el día 96 y continuó hasta los 28 días (estadio 8), para totalizar 124 días a cosecha total con la mayoría de las ramas sin frutos; entre tanto, la fase fenológica de botón floral hasta inicio de la maduración del fruto duró 96 días (Enz y Dachler, 1998).

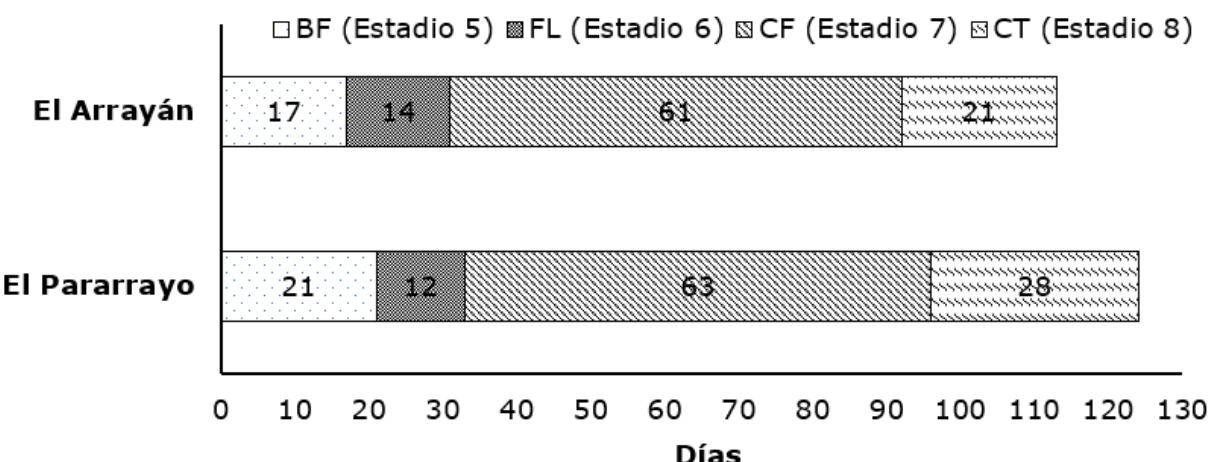


Figura 1. Duración de la fase de botón floral (BF Estadio 5), floración (FL Estadio 6), cuajado (CF, Estadio 7) y cosecha total (CT, estadio 8) del fruto de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Fuente: autores.

En la Finca 2 (Figura 1), la fase de botón floral se inició el 27 de abril de 2022, con una duración de 17 días (estadio 5), menor que en la Finca 1. La fase de floración (estadio 6) duró más tiempo en la Finca 2 (14 días) en comparación con la Finca 1. Seguidamente, se inició la fase de formación y cuajado del fruto y duró hasta 61 días en la Finca 2 (estadio 7). El día 62 se inició la maduración para una duración de 21 días (estadio 8), desde la fase de botón floral a inicio de maduración del fruto se alcanzó 96 días. Mientras que la cosecha total se alcanzó a los 113 días (Enz y Dachler, 1998), con la mayoría de las ramas sin frutos. La fase de cuajado y crecimiento del fruto (estadio 7, BBCN) se produjo en menos tiempo en la Finca 1. Un estudio realizado por Garzón (2019) para determinar la fenología de *Rubus robustus* (C. Presl.) y *R. floribundus* (Kunth.), reportó 25 días desde el inicio de floración hasta cuajado del fruto para *R. floribundus* y en *R. robustus* fue me-

nor (21 días), siendo superior a la registrada para frutos de *R. floribundus* en el presente estudio (Figura 2). Mientras que el desarrollo del fruto de *R. robustus* requirió 42 días, menor tiempo en comparación con los datos registrados en la Finca 1 (63 días) y 2 (61 días) para la misma fase fenológica en *R. floribundus*.

De otra parte, el color es un factor importante para determinar el índice de cosecha durante la maduración del fruto. En el sistema de codificación numérica del color de los frutos de *R. glaucus*, la Norma Técnica Colombiana (Icontec, 1997) define siete etapas de desarrollo. Esta escala es inferior a la necesaria para identificar los frutos de *R. floribundus*, ya que la formación del color durante el proceso de maduración varía de rojizo a púrpura oscuro, resultando en una escala con codificación numérica para diez estados de madurez (Figura 2).

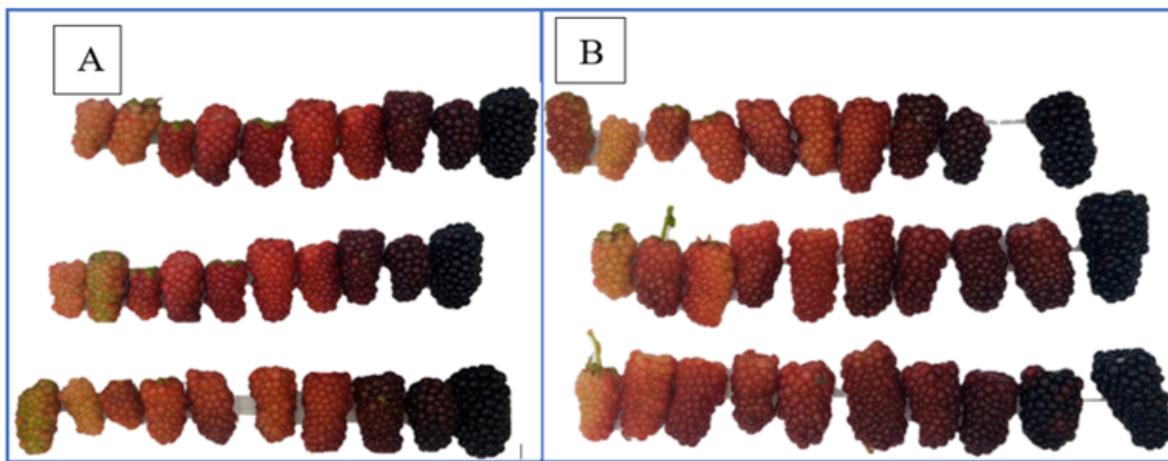


Figura 2. Escala de color del fruto de *Rubus floribundus* (Kunth.) A) Finca 1 y B) Finca 2

Fuente: autores.

Producción

En la Finca 1, se registró la menor media para el componente primario de producción de 171,44 frutos por planta. La media de

producción por planta también fue la menor en la Finca 1 con 721,77g, un rango de 3.668 y valor mínimo y máximo de 3,72 y 50 g, respectivamente; mientras que el rendimiento estimado fue 801,89 kg ha⁻¹ (Tabla 1).

Tabla 1.

Estadísticos descriptivos de producción de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Variables	Media	De	Rango	Mínimo	Máximo	CV (%)
Finca 1 [El Pararrayo]						
Número de frutos	171,44	129,17	671	11	682	75,34
Producción (g)	721,77	582,18	3.668	50,00	3.718	80,86
Rendimiento (kg ha ⁻¹) *	801,89	646,81	4.075,15	55,55	4.130,70	80,66
Finca 2 [El Arrayán]						
Número de frutos	207,87	152,87	885,00	7,00	892,00	73,54
Producción (g)	994,31	792,28	4.309,00	17,00	4.326,00	80,03
Rendimiento (kg ha ⁻¹) *	1.104,68	880,23	4.787,30	18,89	4.806,19	79,68

Nota. Finca 1, n=178, Finca 2, n=365, *: cálculo considerando espacioamiento de 3 x 3 m, con densidad de plantación de 1.111 plantas por hectárea.

Fuente: autores.

En la Finca 2 se registró la media más alta para el componente primario de producción con 207,87 frutos y 994,31 g (Tabla 1), mientras que el valor máximo fue de 892,00 frutos y 4.326,00 g. El rendimiento estimado fue de 1.104,68 kg ha⁻¹, superior al de la Finca 1. El estudio reveló que las condiciones climáticas pueden afectar los resultados de producción en diferentes épocas y sistemas de plantación, conducción y poda, como señalaron Muniz *et al.* (2011) en Lages (SC) y

Lima *et al.* (2010) en Pelotas (RS, Brasil). Por su parte, Vanni *et al.* (2016), señalaron en su investigación que el sistema de conducción sólo afectó las variables involucradas directamente con la producción.

La distribución de la producción en la Finca 1 mostró una alta variación durante la evaluación, con ligeros aumentos hasta los 29 días, ligeros aumentos a los 45 días y una disminución a los 57 días (Figura 3).

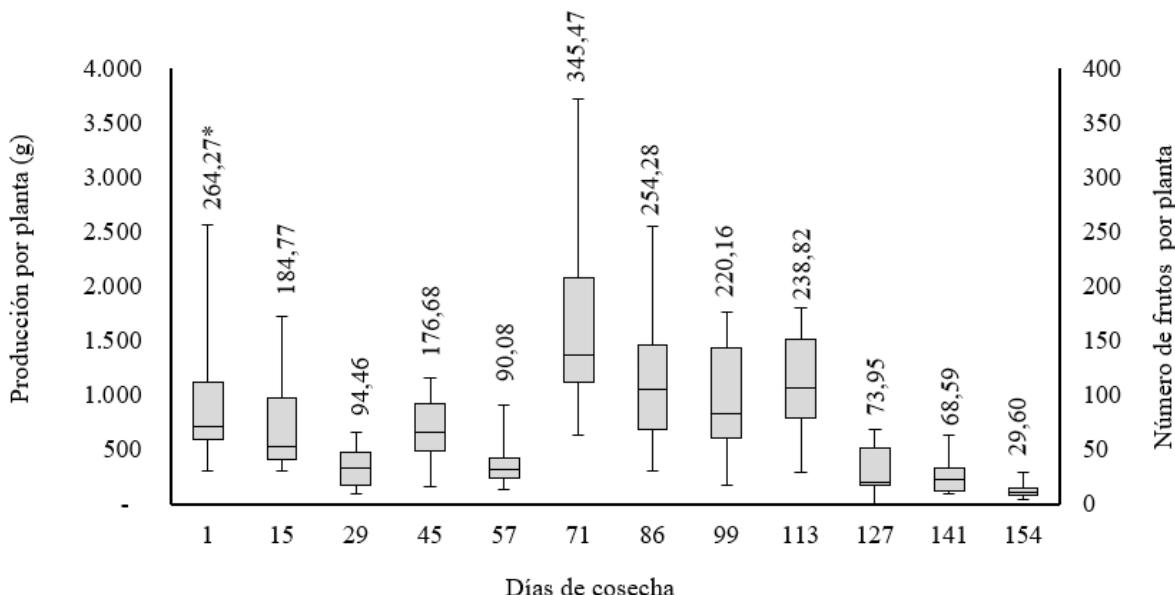


Figura 3. Distribución de la producción y *número de frutos por planta de *Rubus floribundus* (Kunth.), en la Finca 1 [El Pararrayo].

Fuente: autores.

La producción por planta en la Finca 1 fue mayor durante el mes de julio (3.920 g), en respuesta a la práctica de poda realizada por

el productor y la precipitación (74,6 mm; Figura 4) en la zona de estudio.

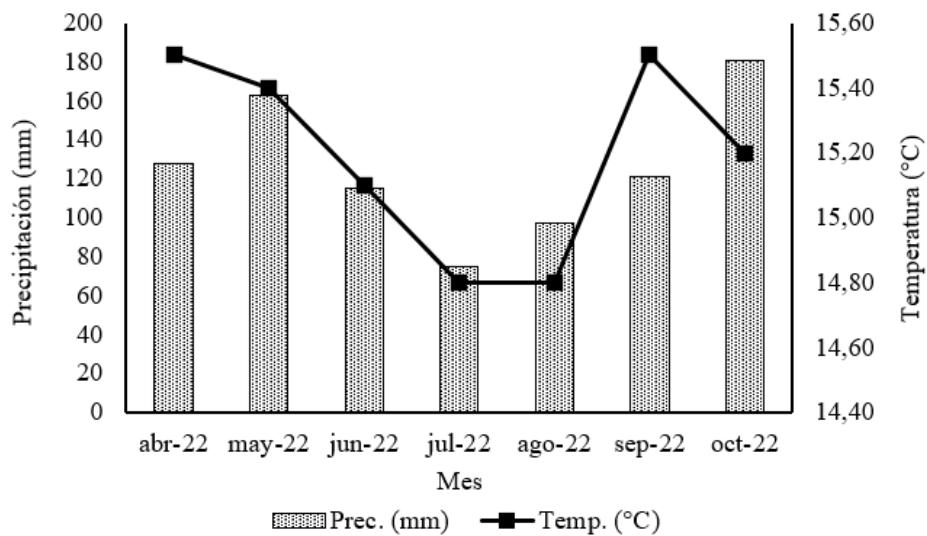


Figura 4. Medias mensuales de precipitación y temperatura en el municipio Pamplona, Norte de Santander, Colombia (Meteobox, s.f.).

Fuente: autores.

En la Finca 2, igualmente se observó variación en la distribución de la producción (Figura 5), con alta variación en relación con

el máximo valor a los 104 días y el menor a los 36 días (389,64 y 45,29 frutos por planta, respectivamente).

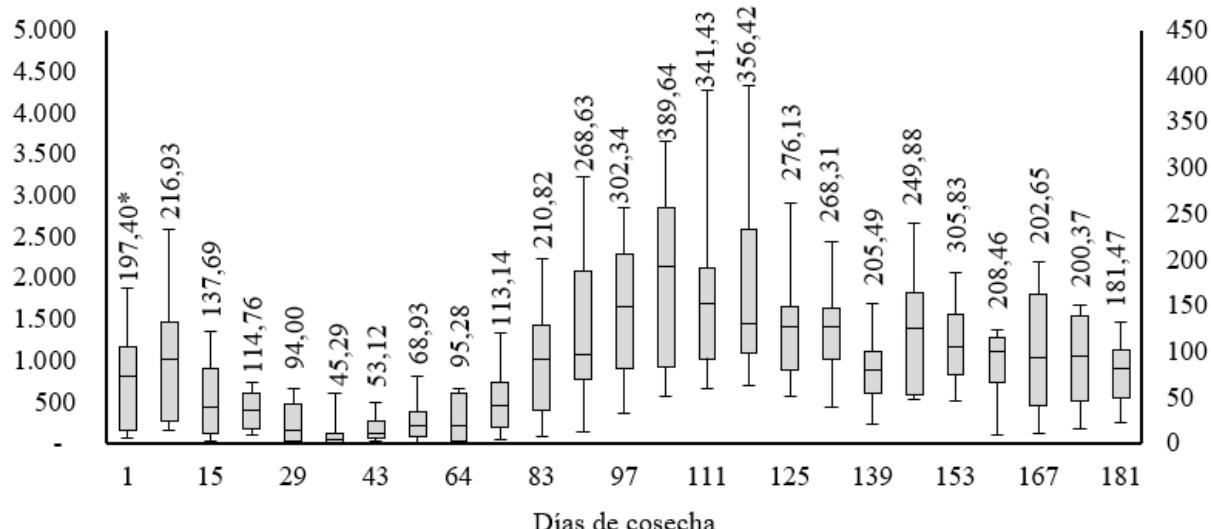


Figura 5. Distribución de la producción y *número de frutos por planta de *Rubus floribundus* (Kunth.), en la Finca 2 [El Arrayán].

Fuente: autores.

Calidad

La producción de mora uva se registró durante los primeros 6 meses de cosecha, por lo tanto, su mayor expresión en producción no alcanzó a registrarse puesto que ésta, de acuerdo con Cardona y Bolaños-Benavides (2019), se obtiene a partir de los 15 a 18 meses después del trasplante de los cultivares.

La masa unitaria varió de 5,20 a 2,85 g, siendo la fruta de la Finca 1 la de menor masa (Tabla 2), sin embargo, presentó mayor DP, AI e IM. Mientras que en la Finca 2, la fruta presentó 1,82 veces mayor masa en comparación con la Finca 1, así como mayor DE, valores que se correspondieron con el mayor número de frutos por planta y producción (Tabla 1).

Tabla 2.

Características fisicoquímicas de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Variables	Estadísticas descriptivas											
	Finca 1 [El Pararrayo]						Finca 2 [El Arrayán]					
	Me-dia	DE	Mín.	Máx.	Ran-go	CV (%)	Me-dia	DE	Mín.	Máx.	Ran-go	CV (%)
Masa (g)	2,85	1,89	0,3	6,0	5,70	66,31	5,20	1,47	2,0	8,0	6,00	28,27
DE (mm)	16,20	0,99	14,1	18,5	4,40	6,11	17,08	1,35	14,4	19,3	4,90	7,90
DP (mm)	28,99	2,37	24,5	35,0	10,50	8,17	28,52	2,08	24,1	33,7	9,60	7,29
AI (pH)	3,27	0,05	3,2	3,3	0,10	1,53	2,97	0,13	2,8	3,3	0,50	4,38
SST (°Brix)	9,87	0,19	9,3	10,1	0,80	1,92	10,29	0,35	10,0	10,9	0,90	3,40
ATT (% Ác. málico)	0,85	0,06	0,7	1,0	0,30	7,05	0,96	0,09	0,8	1,2	0,30	9,37
IM	11,66	0,95	9,5	13,8	4,30	8,15	10,74	1,04	8,7	12,9	4,20	9,68

Nota. n=30, DE: desviación estándar, DE: diámetro ecuatorial, DP: diámetro polar, AI: acidez iónica, SST: sólidos solubles totales, ATT: acidez total titulable, IM: índice de madurez.

Fuente: autores.

Se ha señalado que la masa media de frutas (*Rubus spp.*) es una característica intrínseca del cultivar, pudiendo alcanzar, según Raseira y Franson (2012), de 8 a 10 g en 'Tupy' y cerca de 6 g en 'Xavante', con media superior a la registrada en la presente evaluación. Sin embargo, Vanni *et al.* (2016), indicaron que la con-

dición edafoclimática del lugar de producción tiene una fuerte influencia sobre la respuesta productiva de un determinado cultivar.

El tipo de tutorado empleado puede cambiar la distribución de la radiación solar y la ventilación alrededor de las plantas, modifi-

cando la humedad relativa y la concentración de gas carbónico atmosférico entre y dentro de las hileras (Bessa *et al.*, 2018). Debido a que el sistema de tutorado doble T tenía una mejor distribución de las plantas, se redujo el solapamiento de las hojas de las plantas, lo que permitió la captación de una mayor intensidad de radiación lumínica y, por lo tanto, el crecimiento y el desarrollo se vieron influenciados por mayores tasas fotosintéticas, con la consiguiente mayor producción de biomasa en los órganos y la expansión del área foliar que contribuyó a la producción de frutos con mayor masa y mejor calidad (Taiz *et al.*, 2017).

El estudio encontró que una mayor acidez (AI) en los frutos de la Finca 1 (Tabla 2) estaba relacionada con una menor ATT, con una variación menor de 1,53 % en comparación con la Finca 2,38 %. Esto concuerda con el rango de AI de Memete *et al.* (2023) entre 2,85 y 4,06 en frutos de *Rubus* spp., en Rumanía. La Finca 2 tuvo la media más alta de SST (Tabla 2) al igual que lo reportado por Garazhian *et al.* (2020), en Irán; los SST son el resultado de la conversión de las reservas en azúcares solubles, según Moreno y Deaquiz (2015). La media más alta de ATT en la Finca 2 también fue superior (Tabla 2), lo que sugiere mejores condiciones de almacenamiento y una tasa de respiración más baja (Seibert *et al.*, 2022).

Los frutos de la Finca 1 presentaron el mejor equilibrio entre los sólidos solubles y la acidez, con el mayor IM en comparación con la Finca 2 (Tabla 2). Sin embargo, la fruta cosechada en estado 8, alcanzó un IM que representa el potencial de esta especie a nivel comercial y agroindustrial. Los valores se en-

cuentran entre los reportados por Nogueira *et al.* (2015) para las variedades 'Cainguangue', 'Tupy' y 'Choctaw' (16; 9,7 y 9,5, respectivamente). De acuerdo con los datos registrados, esta fruta debe ser destinada preferiblemente al consumo fresco, ya que la relación SST/ATT obtenida es muy apreciada por los consumidores (Raseira y Franzon, 2012). Según Moreno-Medina *et al.* (2016), el IM es importante para la transformación o consumo del fruto fresco y útil en los procesos de exportación. En Colombia se exige a las industrias procesadoras de fruta un IM de 2,2, inferior al reportado en la presente investigación (Icontec, 1997).

Dada la diferencia de altitud (100 m.s.n.m.) entre las regiones de investigación, las diferencias en las características fisicoquímicas de los frutos podrían haberse producido en detrimento del lugar donde se cultivaron. Investigaciones previas han demostrado que el manejo agronómico precosecha del cultivo, así como las condiciones agroecológicas de las zonas de estudio (Vanni *et al.*, 2016), el grado de madurez y las características genéticas propias del material (Grijalba, 2010), pueden influir en las características organolépticas (Solís-Mera, 2021) y, por tanto, en la aceptación, calidad y vida útil del fruto (Ayala *et al.*, 2013).

Análisis de correlación lineal

La matriz de correlación entre los parámetros fisicoquímicos (Tabla 3), muestra que la correlación lineal entre las variables físicas exhibe valores muy bajos (es decir, correlación débil) y algunas correlaciones estadísticamente significativas ($p<0,05$; $p<0,01$).

Tabla 3.

Matriz de correlación de Pearson para parámetros fisicoquímicos de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Finca /Variable	Finca 1 [El Pararrayo]						Finca 2 [El Arrayán]					
	SST	DP	DE	ATT	IM	Masa	SST	DP	DE	ATT	IM	Masa
AI	-0,50**	0,28	0,07	0,02	-0,11	-0,48**	0,85**	0,03	0,30	-0,23	0,51**	-0,03
SST		-0,36*	0,01	-0,21	0,41*	-0,07		0,10	0,12	-0,14	0,48**	0,21
DP			0,38*	-0,16	0,03	-0,21			0,55**	0,01	0,01	0,04
DE				-0,13	0,14	-0,13				0,02	-0,07	-0,12
ATT					-0,97**	0,60**					-0,93**	0,61**
IM						-0,57**						-0,47**

Nota. AI: acidez iónica, SST: sólidos solubles totales, DP: diámetro polar, DE: diámetro ecuatorial ATT: acidez total titulable, IM: índice de madurez. Correlación bilateral, significancia *: p<0,05, **: p<0,01.

Fuente: autores.

En las variables químicas sólo se encontró una fuerte correlación (p<0,01) entre IM y ATT (fincas 1 y 2) y entre SSS y IA (Finca 2) (resultados esperados). Se observaron correlaciones medias, positivas y negativas (p<0,01) entre las demás variables en función de los resultados. Un patrón similar se observó en un estudio reciente que determinó los cambios e interacciones de la masa, SST y ATT del fruto en cuatro especies del género *Rubus* spp. de origen iraní, con va-

lores que oscilaban entre 0,14 y 1,30 g, 7,9 y 17,8 °Brix, y 0,36 y 0,83 %, respectivamente (Garazhian *et al.*, 2020).

El modelo de regresión múltiple (Tabla 4), muestra que la inclusión del tipo de tutorado como variable binaria, originó el aumento del índice R² e indicó que las varianzas de las variables dependientes son explicadas mayormente por el efecto del tipo de tutorado empleado en cada finca.

Tabla 4.

Modelo de regresión múltiple entre las variables de calidad de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Variables		Coeficientes de regresión parcial			R ²
Independiente	Dependiente	B ₀ (intercepto)	B ₁	B ₂	
Masa=x ₁ , Tutorado=x ₂	Acidez iónica	3,29; p<0,001	-0,09; p=0,254	-0,27; p<0,001	0,72
	Acidez total titulable	0,77; p<0,001	0,03; p<0,001	0,05; p=0,01	0,57
	Sólidos solubles totales	9,83; p<0,001	0,01; p=0,51	0,39; p<0,001	0,37

Acidez iónica= x_1 Tutorado= x_2	Sólidos solubles totales	3,89; $p<0,001$	1,83 $p<0,001$	0,96, $p<0,001$	0,61
	Acidez total titulable	1,30; $p<0,001$	-0,14; $p=0,202$	0,07; $p=0,051$	0,38

Fuente: autores.

El análisis de componentes principales (ACP) trata de encontrar los factores que expliquen las correlaciones entre variables, las cuales deben ser altas para que formen componentes relevantes. Para decidir aplicar el ACP, se utilizaron los índices Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett (Tabla 5). El índice de KMO fue 0,6337 (>0,5), medida apropiada

de adecuación de la muestra (Hahs-Vaughn, 2017). Mientras que la prueba de Bartlett condujo al rechazo de la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones era una matriz identidad y el determinante de la matriz estuvo muy cercano a cero (0), aun cuando el número de observaciones y de variables originales fue bajo (60 y 8, respectivamente).

Tabla 5.

Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y Bartlett entre las variables de calidad de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.)

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo	0,51
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado
	gl
	Sig.

Nota. Determinante= 0,003.

Fuente: autores.

La matriz de componente rotado (Tabla 6) sugiere dos grupos únicos entre las variables de calidad de frutos de mora uva en las fincas evaluadas. También se observa que los

dos componentes explicaron el 65,4 % de la variabilidad total de los factores de calidad de la fruta de mora.

Tabla 6.

Contribución de las variables de calidad de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.) a la conformación de los componentes principales

Variables	CP1	CP2
Acidez iónica (pH)	-0,765	-0,196
Sólidos solubles totales (SST)	0,367	-0,002
Diámetro polar (DP)	-0,205	0,814
Diámetro ecuatorial (DE)	0,262	0,844
Acidez total titulable (ATT)	0,938	-0,007
Índice de madurez (IM)	-0,848	0,001
Masa (M)	0,856	-0,080
Valor propio	3,17	1,41
Varianza	45,30	20,15
Varianza acumulada	45,30	65,45

Nota. Método de extracción: análisis de componentes principales. Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser. La rotación ha alcanzado la convergencia en tres iteraciones.

Fuente: autores.

La Figura 6, presenta los componentes en un espacio rotado en dos dimensiones para las variables de calidad de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.) en las fincas evaluadas.

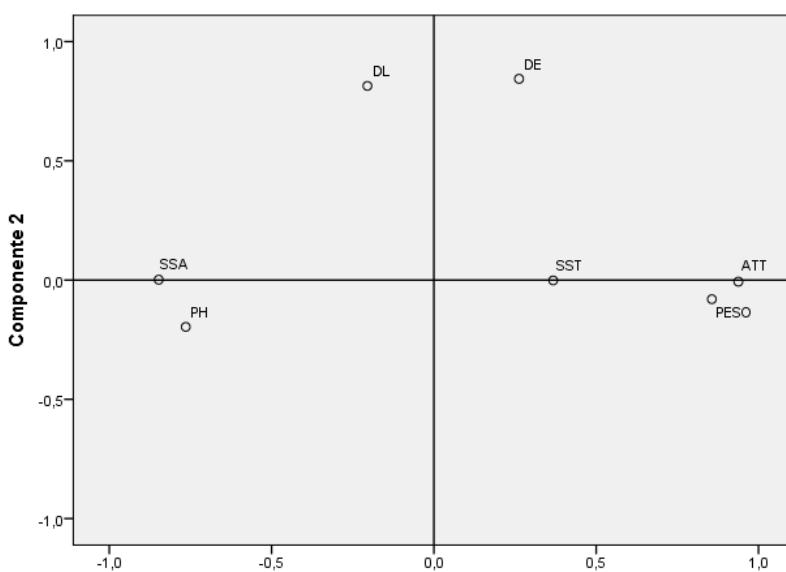


Figura 6. Componentes en un espacio rotado en dos dimensiones para las variables de calidad de frutos de *Rubus floribundus* (Kunth.).

Fuente: autores.

El componente 1 presenta la característica de ser un factor bipolar (Figura 6), que explica o está relacionado con la ATT, con una carga o saturación de 0,938 (Tabla 6); el IM con una carga de -0,848; la masa del fruto con una carga de 0,856 y el pH con una carga de -0,765, son elementos que contribuyen a que el primer componente pueda interpre-

tarse como el “índice de madurez del fruto” de mora uva. El componente 2 se relaciona con el DP (0,814) y el DE (0,844), expresados ambos en mm, el cual se puede interpretar como la “dimensión del fruto”. Las diferencias en la calidad de los frutos de mora uva se deben principalmente al índice de madurez y a la dimensión del fruto.

4 CONCLUSIONES

La formación y cuajado del fruto ocurrió en mayor tiempo en la Finca 1, aunque la floración empezó el mismo día en ambas. La formación del color del fruto varió de rojizo hasta morado oscuro, para una codificación numérica de diez estados de madurez en ambas fincas.

En la Finca 2 se registró la mayor producción y rendimiento de fruta, cuyas características fisicoquímicas (M, DE, AI, SST y ATT) superaron los frutos de la Finca 1. Sin

embargo, los frutos en la Finca 1 presentaron mayor DP e IM.

La variación en las características fisicoquímicas de la fruta fue explicada mayormente por el efecto del tipo de tutorado empleado en cada finca.

Las diferencias en la calidad de los frutos de *R. floribundus*, se deben principalmente al índice de madurez y a la dimensión del fruto.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: Conceptualización: Ideas; formulación o evolución de metas y objetivos generales de la investigación. Visualización: Preparación, creación y/o presentación del trabajo publicado, específicamente visualización/presentación de datos. **Segundo autor:** Investigación: Llevar a cabo el proceso

de investigación y la recopilación de datos. **Tercer autor:** Escritura – borrador original: Preparación, creación y/o presentación del trabajo publicado, específicamente redacción del borrador inicial (incluida la traducción sustantiva).



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los productores de Morauva en la vereda Cúnuba del municipio de Pamplona,

na, Alfredo Jaimes y Evaristo Parada por su acompañamiento y apoyo durante la investigación.

FINANCIAMIENTO

La investigación fue financiada por la Universidad de Pamplona, con el siguiente proyecto: “Determinación de los factores edáficos óptimos para la producción del cultivo de mora mediante modelación en la provincia

de Pamplona, Norte de Santander, Colombia”. Aprobado en la convocatoria Interna del banco de proyectos 2021, de la Vicerrectoría de Investigaciones con Código 096.

LITERATURA CITADA

Agronet. (s.f.). *Estadísticas agrícolas: área, producción, rendimiento y participación 2019*. Recuperado de <http://www.agronet.gov.co/estadistica>

AOAC. (1995). *Official methods of analysis* [16, Ed.]. Association of Official Analytical Chemists.

AOAC. (2005). *Official methods of analysis* [18, Ed.]. Association of Official Analytical Chemists.

Ayala, L. C., Valenzuela, C. P. y Bohórquez, Y. (2013). Caracterización fisicoquímica de mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth.) en seis estados de madurez. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 10-18. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/306>

revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/306

Bessa, L.K., Costa, R.S., Guedes, J.L., de Oliveira, F., Vieira, A., Barbosa, A. y Oliveira, R. (2018). Growth and physiology of cherry tomatoes under organic fertilization in different environments. *Journal of Agricultural Science*, 10(10), 349-359. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n10p349>

Cardona, W.A. y Bolaños-Benavides, M.M. (2019). *Manual de nutrición del cultivo de mora de Castilla (Rubus glaucus Benth.) bajo un esquema de buenas prácticas en fertilización integrada*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual-18>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s.f.). *El cultivo de la*

mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth) frutal de clima frío moderado, con propiedades curativas para la salud humana. DANE. Recuperado el 15 de Julio de 2023 de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_nov_2013.pdf

Domínguez, J., Román, A., Prieto, F. y Acevedo, O. (2012). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(1), 141-155. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1489>

Enz, M. y Dachler, N. (1998). *Compendio para la identificación de los estadios feno-lógicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas. Escala BBCH extendida*. Limburgerhof.

Escalante, S.B., Chiquilín, J.Y. y Saldaña, E. (2017). Identificación botánica y evaluación de los parámetros de calidad de los frutos de zarzamora (*Rubus spp.*), en el distrito de Namora, Cajamarca-Perú. *Revista Caxamarca*, 16(1), 51-61. <http://doi.org/190.116.36.87/index.php/Caxamarca/article/view/29>

Franco, G. y Bernal, J. (2020). *Tecnología para el cultivo de la mora* (*Rubus glaucus* Benth.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403251>

Garazhian, M., Gharaghani, A. y Eshghi, S. (2020). Genetic diversity and inter-relationships of fruit bio-chemicals and anti-

oxidant activity in Iranian wild blackberry species. *Scientific Reports*, 10(1), 18983. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75849-1>

Garzón, Y. (2019). Caracterización agronómica, fenológica y rendimiento del cultivo de mora uva (*Rubus robustus* C. Presl.) en el municipio de Granada (Cundinamarca). [Tesis de grado]. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Cundinamarca, Colombia.

Grijalba, C.M., Calderón, L.A. y Pérez, M.M. (2010). Rendimiento y calidad de la fruta en mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth.), con y sin espinas, cultivada en campo abierto en Cajicá (Cundinamarca, Colombia). *Facultad de Ciencias Básicas*, 6(1), 24-41. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2079>

Hahs-Vaughn, D. L. (2017). Multivariate analysis of variance: Single factor, factorial, and repeated measures design. In *Applied multivariate statistical concepts* (pp. 169-272). Taylor-Francis.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (1977). Norma Técnica Colombiana, *Especificaciones NTC 2191. Frutas y hortalizas frescas. Generalidades*. Norma Disponible en ICONTEC tienda virtual: <https://www.icontec.org> [Último acceso: 2023]

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (1997). Norma Técnica Colombiana, *Especificaciones NTC 4106. Frutas frescas. Mora de Castilla*. Norma Disponible en ICONTEC

tienda virtual: <https://www.icontec.org>
[Último acceso: 2023]

Lima, C.S.M., Gonçalves, M.A., Tomaz, Z.F.P., Rufato, A.D.R. y Fachinello, J.C. (2010). Períodos de replantación y sistemas de conducción de uchuva/Sistemas de tutoramiento e épocas de transplante de physalis. *Ciencia Rural*, 40(12), 2472-2479. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010001200006>

Memete, A.R., Sărac, I., Teusdea, A.C., Budău, R., Bei, M. y Vicas, S.I. (2023). Bioactive compounds and antioxidant capacity of several blackberry (*Rubus* spp.) fruits cultivars grown in Romania. *Horticulturae*, 9(5), 556. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050556>

Meteobox. (s.f.). *Tiempo Pamplona, Norte de Santander Hoy*. Recuperado el 15 de julio de 2023 de <https://meteobox.co/pamplona/>

Moreno, B.L. y Deaquiz, Y.A. (2015). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (*Rubus alpinus* Macfad). *Acta agronómica*, 65(2), 130-136. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45587>

Moreno-Medina, B.L., Casierra-Posada, F. y Blanke, M. (2016). Índices de crecimiento en plantas de mora (*Rubus alpinus* Macfad) bajo diferentes sistemas de poda. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 28-39. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4457>

Muniz, J., Kretzschmar, A.A., Rufato, L., Pelizza, T.R., Marchi, T., Duarte, A.E.,

Fernandes Lima, A.P. y Garanhani, F. (2011). Sistemas de condução para o cultivo de Physalis no planalto catarinense. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33, 830-838. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000083>

Nogueira, P., Pio, R., Abreu, P.H., Tadeu, M.H., Vieira, P. y Pasqual, M. (2015). Produção de amora-preta e amora-vermelha em Lavras-MG. *Ciência Rural*, 45, 1368-1374. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131572>

Quevedo, E. y Zuleta, W. E. (2020). Aspectos fisiológicos del árbol de duraznero relacionados con su manejo agronómico en la Provincia de Pamplona: *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 5(2), 68-78. <https://doi.org/10.24054/cyta.v5i2.845>

Ramírez, F. (2023). *Latin American Blackberries Biology. Mora de Castilla (Rubus glaucus Benth.)*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31750-7_5

Raseira, M.D.C.B. y Franzon, R.C. (2012). Melhoramento genético e cultivares de amora-preta e mirtilo. *Informe Agropecuario*, 33(268), 11-20. <https://core.ac.uk/download/pdf/45508445.pdf>

Seibert, E., Pereira, A., Raupp, T., Cerbaro, F., Santos, J., Amorim, C. y Tomazelli, D. (2022). Conservação pós colheita de cultivares de amoreira-preta (*Rubus* sp.) em bandejas plásticas sob armazenamento refrigerado. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(1), 47-55. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81371861004>

Solís-Mera, J.A. (2021). Respuesta de tres cultivares de *Rubus* spp. en sus etapas de crecimiento vegetativo y reproductivo bajo macrotúneles. *Acta Agronómica*, 70(4), 394-406. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.92460>

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M. y Murphy, A. (2017). *Fisiología e Desenvolvimento Vegetal*. [6, Ed]. Artmed. Porto Alegre.

Vanni, L., Picolotto, L., Cocco, C., Finke-nauer, D. y Corrêa L.E. (2016). Produção de amoreira-preta sob diferentes sistemas de condução. *Ciência Rural*, 46(3), 421-427. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140601>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 23-10-2023

Fecha de aceptado: 17/05/2024

DOI: 10.22490/21456453.7268

POTENCIAL NUTRICIONAL DE UN BIOFERTILIZANTE A BASE DE EQUINAZA EN EL CRECIMIENTO DE DOS SOLANÁCEAS AGROALIMENTARIAS

EVALUATION OF AN ECHINACEA-BASED BIOFERTILIZER ON THE GROWTH OF TWO AGRI-FOOD SOLANACEOUS PLANTS

Álvaro Isaac Díaz Alvarado ¹

Martha Liliana Pinzón Herrera ²

Camilo Andrés Cárdenas Burgos ³

¹ Agrónomo. Subdirección Científica–Sanidad Vegetal,
Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia.
adiaz@jbb.gov.co

² Bióloga y Microbióloga, magíster en Gerencia Ambiental. Subdirección Científica–Sanidad Vegetal, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia.
mpinzon@jbb.gov.co

³ Biólogo, magíster en Ciencias Biológicas. Subdirección Científica–Propagación in vitro, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia. Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente-ECAPMA. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
cacardenas@jbb.gov.co

Citación: Díaz-Alvarado, A., Pinzón-Herrera, M., y Cárdenas-Burgos, C. (2025). Potencial nutricional de un biofertilizante a base de equinaza en el crecimiento de dos solanáceas agroalimentarias. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 33 - 57.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7268>

RESUMEN

Contextualización: las prácticas agroecológicas de manejo como la biofertilización son herramientas viables para mejorar la productividad de los cultivos de pequeños y medianos productores de especies vegetales alimenticias. Estas prácticas aumentan la disponibilidad de nutrientes para las plantas, haciendo uso de recursos propios de la naturaleza como los desechos orgánicos de origen animal y vegetal, así como minerales y microorganismos que solos o combinados, en formas líquidas o sólidas, ayudan a mejorar el suelo y la nutrición vegetal.

Vacío de conocimiento: ante el efecto negativo de las prácticas intensivas de fertilización inorgánica, surge la necesidad de implementar estrategias agroecológicas de biofertilización dirigidas a una producción de alimentos más eficiente. Esto en el marco de sistemas ajustados a requerimientos de calidad, inocuidad y sostenibilidad ambiental, con los que se logre una mayor aceptación para su comercialización y consumo.

Propósito: el principal objetivo de este estudio fue evaluar el potencial del caldo microbiano orgánico-mineralizado y los efectos de su aplicación sobre el crecimiento y desarrollo de *Capsicum pubescens* Ruiz y Pav., y *Solanum muricatum* Aiton, especies altoandinas promisorias de Bogotá D.C.

Metodología: se elaboró y caracterizó química y microbiológicamente un caldo

microbiano obtenido de una fermentación aeróbica en soporte orgánico mineral con equinaza (CMOON). El caldo se aplicó a plántulas de *C. pubescens* y *S. muricatum* de forma edáfica (*drench*) en concentración del 10% a los 21, 42, 63, 85 y 106 días del trasplante. Se evaluaron 4 tratamientos y 30 réplicas. Las variables evaluadas fueron altura de la planta, número de hojas, diámetro del tallo e incidencia de afectaciones foliares. El experimento se analizó a través de un diseño en bloques completamente aleatorizado, en el que el factor de bloqueo correspondió a los días en los que se realizó la aplicación y seguimiento de los tratamientos; y la validación de los supuestos del modelo se realizó para cada una de las variables de respuesta.

Resultados y conclusiones: se encontró que el biofertilizante a base de equinaza contiene una gran variedad de nutrientes, macro y microelementos en concentraciones altas con respecto a los valores críticos propuestos por el IGAC, así como microorganismos benéficos como *Geotrichum* sp., que determinan al CMOON con alta efectividad en el equilibrio de la nutrición de las plantas. En el efecto sobre el crecimiento, desarrollo y sanidad de las plantas, el biofertilizante mostró ser el segundo mejor tratamiento después del testigo químico. Para una mayor efectividad, los caldos microbianos orgánicos -mineralizados conviene aplicarlos periódicamente para asegurar la multiplicación y activación de los microorganismos

introducidos y promover la actividad microbiana nativa. El AC indica que la aplicación del biofertilizante favorece el crecimiento y desarrollo vegetal en *C. pubescens*, pero no en *S. muricatum*.

Palabras clave: biofertilización, caldos microbianos, fermentación, fitoprotección, microorganismos, nutrición vegetal

ABSTRACT

Contextualization: Agroecological cultivation practices such as biofertilization are a viable tool for improving the productivity of small and medium-sized producers of food crops. These practices increase the availability of nutrients for plants, making use of nature's own resources such as organic wastes of animal and vegetable origin, as well as minerals and microorganisms that alone or combined, in liquid or solid forms, help to improve soil and plant nutrition.

Knowledge gap: in view of the negative effect of intensive inorganic fertilization practices, there is a need to implement agroecological biofertilization strategies aimed at more efficient food production, within the framework of production systems that meet quality, safety, and environmental sustainability requirements, to achieve greater acceptance for marketing and consumption.

Purpose: the main objective of the study was to evaluate an organic-mineralized microbial broth and the effects of its application on the growth and development of *Capsicum pubescens* Ruiz & Pav. and *Solanum muricatum* Aiton, promising high Andean species in Bogotá D.C.

Methodology: a microbial broth obtained from an-aerobic fermentation in an organic mineral support was elaborated and characterized chemically and microbiologically. The broth was applied to *C. pubescens* and *S. muricatum* seedlings in edaphic form (drench) at a 10% concentration 21, 42, 63, 85 and 106 days after transplanting. Four treatments and 30 replicates were evaluated. The variables evaluated were plant height, number of leaves, stem diameter and incidence of leaf damage. The experiment was analyzed using a completely randomized block design, in which the blocking factor corresponded to the days on which the treatments were applied and monitored; and the assumptions of the model were validated for each of the response variables.

Results and conclusions: Regarding the chemical and microbiological composition of the biofertilizer based on echinacea, it was found that it contains a great variety of nutrients, macro, and microelements, as well as microorganisms essential for the balance in plant nutrition. In the effect on plant growth, development, and health, the biofertilizer proved to be the second-best treatment after the chemical control. For greater effec-

tiveness, the organic-mineralized microbial broths should be applied periodically to ensure the multiplication and activation of the introduced microorganisms and to promote native microbial activity.

Keywords: biofermentation, microbial broths, microorganisms, plant nutrition, phytoprotection

RESUMEN GRÁFICO

La aplicación del caldo microbiano orgánico-mineralizado mostró ser una alternativa agroecológica complementaria en

la nutrición vegetal, ideal para disminuir la contaminación de agroecosistemas y el uso de fertilizantes de síntesis química.



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Se prevé que para el año 2030 las condiciones naturales serán menos propicias para la producción de la mayoría de los cultivos agrícolas, esto mediado por el cambio climático y agudizado por el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados que aumentarían un 50% las emisiones de óxido nitroso

(N₂O) a nivel mundial (González-Estrada y Camacho, 2017). Así, en la dinámica de oferta y demanda de especies vegetales agroalimentarias, influenciadas por el crecimiento demográfico, se proyecta un aumento de 56% para el 2050 (Van Dijk *et al.*, 2021), incrementando el uso de fertilizantes de sín-

tesis química para dar alcance a los requerimientos de producción de cultivos y de sus derivados para la alimentación (Seenivasagan y Babalola, 2021).

En esta línea, la agricultura convencional ha transformado el uso de recursos naturales como el suelo, en una fórmula universal enfocada en la fertilización inorgánica como única fuente para la nutrición vegetal, dejando de lado aspectos fundamentales como la interacción entre los microbiomas nativos y la agricultura sostenible (Singh *et al.*, 2020; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021). De acuerdo con Pradel y Aissani (2019) el uso generalizado de fertilizantes inorgánicos ha generado graves impactos negativos como la degradación del suelo, eutrofización, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y del aire, además de desequilibrios biológicos a nivel de la fauna y flora que inducen a la reducción de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos.

Por lo anterior, es urgente reorganizar el sistema agroquímico de manejo y promover la agroecología como alternativa para aprovechar de mejor manera los recursos de la agrobiodiversidad, a fin de hacer más eficiente la producción de alimentos en torno al resguardo de la salud humana y la conservación de los ecosistemas.

Según Jacoby *et al.* (2017) la elaboración, evaluación y uso de caldos microbianos como biofertilizantes en la producción vegetal, además de mejorar la forma en cómo se nutren las especies agroalimentarias, son una estrategia de fitoprotección sostenible, ya que los materiales orgánicos y microorganismos benéficos pueden remediar las di-

námicas microbianas del suelo afectadas por el continuo uso de agroquímicos (Areeshi, 2022). Adicionalmente, los biopreparados obtenidos de la fermentación aeróbica o anaeróbica con microorganismos benéficos, minerales de polvos de roca y otros compuestos orgánicos, son insumos respetuosos con el ambiente y bastante empleados en sistemas de producción orgánica y agroecológica (Trivedi *et al.*, 2020).

Dentro de los residuos orgánicos sólidos aprovechables, la equinaza tiene potencial para usarse en la elaboración de biopreparados líquidos fermentados, ya que, así como el estiércol vacuno, es rica en celulosa, nitrógeno y tiene la capacidad de eliminar bacterias fitopatógenas, evitar el crecimiento de arvenses y mejorar la estructura del suelo cultivable (Téllez *et al.*, 2019). Además, puede utilizarse como fuente de nutrientes para cultivos agroalimentarios, aumentando su ciclo y reduciendo los costos relacionados con la adquisición de fertilizantes industriales (Loss *et al.*, 2019).

Dentro de los cultivos agroalimentarios, Solanaceae es una de las familias botánicas más grandes y extensas del mundo (Hernández *et al.*, 2019), abarcando muchas especies básicas de la dieta humana (Murillo-Pérez y Rodríguez, 2021; Añíbarro-Ortega *et al.*, 2022); dentro de ellas, el ají *Capsicum pubescens* Ruiz y Pav. y el pepino dulce *Solanum muricatum* Aiton. Estas se caracterizan por su bajo contenido calórico y altos niveles de vitamina C y potasio, entre otros compuestos de importancia nutraceutica y medicinal (Botrel *et al.*, 2020). Además, se usan como remedios naturales valiosos para la preven-



ción y tratamiento de enfermedades y problemas de salud (Duranova *et al.*, 2022).

De acuerdo con Fischer *et al.* (2021), las condiciones climáticas de la región altoandina en países como Chile, Perú, Ecuador y Colombia son favorables para su cultivo y producción anual; sin embargo, también fomentan el desarrollo de limitantes fitosanitarias como plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales que afectan su crecimiento y desarrollo (CyD), obligando al uso intensivo de agroquímicos para la fitoprotección durante su cultivo (Qi *et al.*, 2021).

Por lo anterior, para contribuir con el mejoramiento de la capacidad productiva del suelo y reducir el impacto negativo sobre el ambiente, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar un biopreparado microbiano orgánico-mineralizado de elaboración artesanal y los efectos sobre el crecimiento y desarrollo de dos solanáceas de interés agroalimentario; esto como una aproximación a la implementación de prácticas agroecológicas que reduzcan y complementen, en lo posible, el uso de fertilizantes e insumos de síntesis química en la producción agrícola.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y material vegetal

El experimento se desarrolló bajo condiciones controladas (20 °C y HR 58%) en el Banco Plantular de la Subdirección Científica, ubicado en el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (JBBJCM), con coordenadas 4°39'57.9"N 74°05'58.8"W y 2550 m de altitud. La obtención de las plantas de *C. pubescens* (Cp) y *S. muricatum* (Sm) se realizó por propagación tradicional, mediante la siembra de semillas extraídas de frutos maduros de plantas madre establecidas en el Jardín Agroecológico (4°40'03.0"N 74°06'03.6"W) del JBBJCM. Cuando las plantas desarrollaron entre cuatro y ocho hojas verdaderas, se trasplantaron a bolsas plásticas de 1 kg que contenían una mezcla de tierra negra y cascarilla de arroz en relación 4:1, donde permanecieron por un pe-

riodo de 20 días para su adaptación; las plantas se regaron tres veces por semana.

Preparación del bioinsumo

El Caldo Microbiano Orgánico Mineralizado (CMOM) se elaboró en el JBBJCM a partir de un proceso de fermentación aeróbica en soporte orgánico mineral y microbiano, utilizando como biodigestor la adaptación de un contenedor plástico con capacidad de 500 litros. Se emplearon insumos locales entre estos equinaza como fuente de materia orgánica (MO), así como la adición continua y programada de glucosa en forma de melaza, microorganismos lácticos y diferentes sales minerales (Anexo 1).

El proceso de fermentación del biopreparado estuvo determinado por la temperatura

ambiental de Bogotá D.C. Antes de su aplicación, el CMOM se analizó química, biológica y microbiológicamente, para este último la identificación de fitopatógenos bacterianos la realizó el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) , mientras que la caracterización de hongos microscópicos se llevó a cabo en el laboratorio de microbiología del JBBJCM mediante la técnica de diluciones seriadas y siembra directa en Agar Papa Dextrosa

(PDA), Agar Extracto de Malta (EM), Agar Dextrosa Sabouraud (SDA) y Base de Agar Glucosa Oxitetraciclina (OGYE).

Montaje del experimento

Se definieron cuatro tratamientos compuestos por agua, fertilizante químico, caldo microbiano comercial y CMOM, cuyas composiciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tratamientos evaluados durante el Crecimiento y Desarrollo (CyD) de *C. pubescens* y *S. muricatum*

Tratamiento	Composición
T1	Control: Agua
T2	Químico®: NPK 15-15-15 y microelementos FORZA®, 6g/l de agua (equivalente a una aplicación de 1.000 kg.ha ⁻¹)
T3	Caldo microbiano EM® al 10% (100 ml/900 ml de agua)
T4	Caldo Microbiano Orgánico Mineralizado-CMOM al 10% (100ml/900 ml de agua)

Fuente: autores.

Se aplicaron 200 ml de cada tratamiento a las especies vegetales, utilizando diez plantas de cada especie (unidad experimental, UE) con tres repeticiones. El seguimiento se llevó a cabo a los 21, 42, 63, 85 y 106 días después del trasplante, registrando altura total de la planta (cm), diámetro en la base del tallo (mm), **número de hojas totales por planta** (unidades foliares) e incidencia de alteraciones foliares (presencia - ausencia); al tiempo que se realizó el seguimiento se efec-

tuó la aplicación edáfica (*drench*) de los tratamientos. Por la similitud en los patrones de afectación en Cp y Sm, la incidencia de las alteraciones se caracterizó a partir de la evaluación de tres síntomas foliares: amarillamiento, necrosis y entorchamiento. Con base en esas afectaciones, se realizó la medición del porcentaje (%) de incidencia cumplidos los 106 días de evaluación utilizando la Ecuación 1:

$$\% \text{ Incidencia} = \frac{\text{Número de plantas con afectaciones}}{\text{Número total de plantas en la muestra}} \times 100$$

(Ecuación 1)

Análisis estadístico

El experimento se analizó a través de un diseño en bloques completamente aleatorizado, en el que el factor de bloqueo se consideró los días en los cuales se realizó la aplicación y el seguimiento a los tratamientos; para ello, se utilizó el software gratuito R versión 4.2.1 (The R Foundation for Statistical Computing, 2022). Con los datos que no se ajustaron a una distribución normal (supuesto de normalidad, test Kolmogórov-Smirnov $p \leq 0,05$) o sus varianzas no eran constantes (supuesto de homocedasticidad, Test de Levene), se utilizó la trasformación de campos

grandes de variación a través del $X' = \log(x)$. Se realizó un Análisis de Varianza ANOVA de dos factores, en donde se compararon los tratamientos aplicados y las observaciones registradas que corresponden a los días de aplicación de los tratamientos, a fin de establecer efectos en las variables evaluadas (Anexo 2); con el propósito de hallar diferencias significativas entre los tratamientos se utilizó la diferencia mínima significativa del test de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$). En los casos en los que la trasformación no fue significativa se usaron pruebas no paramétricas (Prueba de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$); finalmente, para observar el comportamiento multivariable de los tratamientos ensayados, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las librerías “ggplot” y “ggplot2”.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base orgánica del proceso de fermentación aeróbica del CMOM fue estiércol fresco de caballo y su producción se realizó en un biodigestor simple, al igual que en otros estudios en los que emplearon excretas de bovinos y residuos de leguminosas (Cando y Malca, 2016); este tipo de sistemas resultan efectivos para obtener productos con propiedades funcionales como biofertilizantes compatibles para su uso en la agricultura ecológica (Jara-Samaniego *et al.*, 2021). Pasados 150 días de co-digestión aeróbica, el biopreparado llegó al punto de maduración para su aplicación y el producto final presen-

tó color ámbar, olor de fermentación alcohólica y en el fondo algunos sedimentos; aspectos que, de acuerdo con Restrepo (2007), indican buena calidad y estabilidad en este tipo de biofermentados.

Composición química

El análisis químico determina que el CMOM contiene una gran variedad de macro y microelementos esenciales para el equilibrio en la nutrición de las plantas. Ahora, dado que no existe un sistema preestableci-

do para categorizar el contenido nutricional de productos agroecológicos empleados como biofertilizantes (González y Pumaré, 2008), para la interpretación, a cada uno

de los resultados de las determinaciones del análisis químico se le asignó un nivel crítico de referencia tomando como base los rangos establecidos por IGAC (Tabla 2).

Tabla 2.

Composición química del caldo elaborado como biofertilizante en el JBBJCM

Determinación	Caldo Microbiano Orgánico Mineralizado		
	Contenido	Rangos de referencia	Nivel crítico*
pH	6.20	6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
N Total (%)	3.15	>0,5	Alto
P (P_2O_5) (ppm)	1116.53	>40	Alto
K ($meq \cdot 100 g^{-1}$)	78.07	>0,4	Alto
Ca ($meq \cdot 100 g^{-1}$)	81.72	>3,0	Alto
Mg ($meq \cdot 100 g^{-1}$)	35,67	>1,5	Alto
Mn (ppm)	5.83	5 – 10	Medio
Fe (ppm)	62.80	>50	Alto
Cu (ppm)	45.86	>3,0	Alto
B (ppm)	131.27	>0,4	Alto
S Total (%)	1.34	>1,2	Alto
C Total (%)	36.53	>8,1	Alto
B.T. ($meq \cdot 100 g^{-1}$)	207.32	>7,5	Alto

*Valor asignado según los niveles críticos establecidos por el IGAC
 para la interpretación de análisis químicos de suelos.

Fuente: adaptado del análisis emitido por el Laboratorio Nacional de Suelos IGAC.

De acuerdo con los niveles críticos y siguiendo las consideraciones generales para la interpretación de los resultados de análisis de suelos (IGAC, 2014), los contenidos en el CMOM de N Total, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, B, así como el S, C y Base Totales (B.T.) resultan altos, a excepción del Mn cuyo contenido se encuentra por debajo de 15–30 ppm. La variación de elementos nutricionales, cuyos contenidos superan los niveles críticos, permite inferir que el biopreparado

elaborado en el JBBJCM puede caracterizarse y utilizarse como suplemento de la fertilización química aplicada generalmente a los cultivos, ya que contiene altas dosis de N, P y K, y otros elementos nutricionales (Mengmeng *et al.*, 2021), por lo que este producto, de tipo orgánico, puede ser una alternativa a los problemas en torno a la producción de cultivos agroalimentarios tanto para el agricultor como para el consumidor.

La variedad de elementos que el biopreparado presentó en el análisis químico es concordante con su elaboración, ya que además del estiércol de caballo como principal fuente orgánica de NPK (Raksun *et al.* 2021), se adicionaron sales minerales como sulfato de zinc, magnesio, sodio y cobre, nitrato de potasio y amonio, fosfato de potasio, amonio y hierro, amonio molibdato, azufre y harina de rocas, ingredientes que en gran medida le conceden su riqueza y potencial nutricional. Además, gracias al proceso bioquímico que ejerce la carga microbiana también incorporada, los nutrientes se transforman en hormonas como adeninas, purinas, auxinas, giberelinas y citoquininas (Sánchez-Llevat *et al.*, 2022) que sin duda le confieren mayor capacidad nutricional al biopreparado.

Análisis microbiológico

En el análisis microbiológico se identificaron bacterias gram negativas como *Escherichia coli* y gram positivas como *Coryne-*

bacterium xerosis (Tabla 3), cuya presencia puede asociarse a los cultivos lácticos utilizados como fuente de probióticos durante la preparación del caldo, además se considera no patógena y por ende poco probable que impacte la salud humana y el medio ambiente (Hahne *et al.*, 2018). Aunque el análisis detectó coliformes totales y fecales, los valores ($<0,2$ NMP/ml) se ubican muy por debajo de los permitidos para el agua de uso agrícola 5.000 y 1.000 NMP/ml respectivamente (Decreto 1594 de 1984). Este tipo de microorganismos comúnmente se usan para evaluar la contaminación fecal en aguas superficiales (Aram *et al.*, 2021) y en este caso sirven como indicadores de la calidad microbiana del CMOM. Cuando el contenido de microorganismos Clase B con restricción para uso agrícola se encuentran presentes posterior al finalizar el ciclo de fermentación del biofertilizante, conviene realizar la estabilización alcalina para mejorar su calidad microbiológica empleando cal (hidratada o viva)(Sánchez *et al.*, 2020).

Tabla 3.

Análisis microbiológico del caldo elaborado como biofertilizante en el JBBJCM

Microorganismo - ensayo	Caldo Microbiano Orgánico Mineralizado	Unidad
Bacterias <i>Corynebacterium xerosis</i>	D.	Gram-
Coliformes totales	<0.2	NMP/ml
Coliformes fecales	<0.2	NMP/ml
<i>Escherichia coli</i>	<0.2	NMP/ml
<i>Salmonella</i> spp.	N.D.	NMP/ml

Nota. NMP Número Más Probable: 95%. El dato del análisis se expresa en un intervalo:

Límite inferior < NMP < Límite superior

D: Detectado; N.D: No detectado.

Fuente: autores.

Por otra parte, a partir de los crecimientos obtenidos en las diluciones seriadas, se cuantificaron las unidades formadoras de colonias fúngicas (UFC), teniendo en cuenta el rango recomendado entre 30 y 300 colonias por dilución para el recuento de $\text{UFC}\cdot\text{ml}^{-1}$. Las diluciones 10^{-4} y 10^{-5} arrojaron el crecimiento de hongos levaduriformes con densidades de población en PDA: 1.11×10^8 , EM: 9.80×10^7 , SDA: 1.08×10^8 y OGY: 8.20×10^7 UFC/ml; resultados que de acuerdo con Delgado *et al.* (2023) y Viteri *et al.* (2008) se ajustan a las normas de control de calidad de biofertilizantes que establecen una densidad mínima de $10^8 \text{ UFC}\cdot\text{g}^{-1}$ para que la población de microorganismos introducidos por estos tenga posibilidad de colonizar el suelo.

A nivel macroscópico se describieron colonias de crecimiento rápido y circular casi cubriendo todo el medio, color crema por el anverso y reverso, apariencia húmeda levaduriforme y desarrollo en la periferia de hifas sumergidas en el medio (Anexo 2). Microscópicamente se identificaron hifas gruesas vegetativas y tabicadas, con abundante producción de artroconidios hialinos unicelulares rectangulares en cadena y tamaño variable (Figura 1), lo que coincide con descripciones macro y micro morfológicas del género *Geotrichum* Link. (Bonifaz, 2012; Walsh *et al.*, 2018; Perkins *et al.*, 2020).

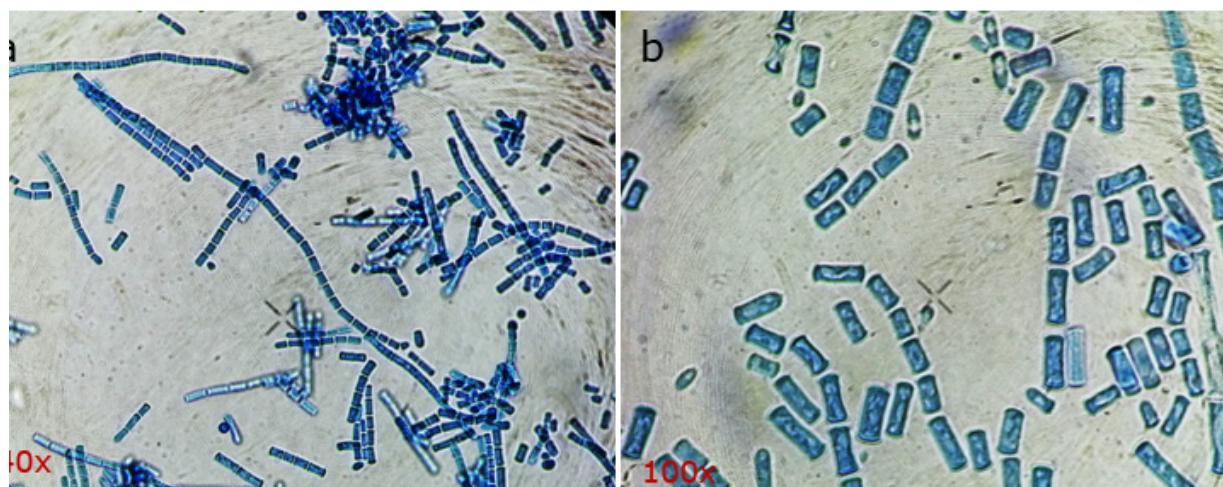


Figura 1. Estructuras fúngicas: artroconidios unicelulares en cadena de *Geotrichum* sp., observados en 40x (a) y en 100x (b)

Fuente: autores.

Geotrichum es considerado un microorganismo cosmopolita y saprótrofo, aislado frecuentemente de plantas, en especial de frutas, así como de leche y sus derivados (Cepero *et al.*, 2012), los cuales son utilizados en

el CMOM para favorecer la fermentación. Este generó cuenta con una proyección de uso en el crecimiento de sistemas productivos agrícolas, ya que, recientemente Bonilla *et al* (2021), mencionaron a *Geotrichum* pe-

nicillatum como uno de los microorganismos benéficos utilizados en formulaciones de inoculantes biológicos para la inducción de crecimiento vegetal, pues una vez fermentados potencializan su capacidad para incrementar la disponibilidad de nutrientes en el suelo como el nitrógeno y el fósforo (Glick, 2012).

Efecto del caldo microbiano sobre el CyD

A partir del seguimiento realizado al crecimiento y desarrollo vegetal, se encontró

que la altura, el diámetro en la base del tallo y el número de hojas en las dos especies vegetales fueron influenciados significativamente ($P < 0,0001$) por los tratamientos (Tabla 4 y Anexo 3). Donde claramente el mayor efecto lo registró el tratamiento Químico® (T2), seguido por el CMOM (T4), evidenciando cómo los fertilizantes químicos están diseñados para proveer los nutrientes esenciales que las plantas necesitan para crecer y aumentar su productividad (Pahalvi *et al.*, 2021).

Tabla 4.

Influencia de los tratamientos sobre el CyD vegetal de *S. muricatum* y *C. pubescens*

Tratamientos	<i>Solanum muricatum</i>			<i>Capsicum pubescens</i>		
	Altura	Diámetro	Hojas	Altura	Diámetro	Hojas
T1-H ₂ O	16,83 ± 09,67 c	3,23 ± 0,77 b	11,83 ± 4,25 b	13,67 ± 6,13 b	3,61 ± 1,26 c	17,09 ± 9,75 c
T2-Químico®	46,56 ± 35,33 a	4,12 ± 1,55 a	25,45 ± 20,31 a	24,70 ± 13,39 a	5,72 ± 2,76 a	29,98 ± 23,87 a
T3-EM®	21,87 ± 14,86 b	3,28 ± 0,77 b	13,23 ± 5,23 b	12,49 ± 5,81 b	3,41 ± 1,08 c	16,40 ± 10,26 c
T4-CMOM	28,78 ± 21,85 b	3,60 ± 1,11 b	15,45 ± 6,90 b	13,86 ± 5,45 b	4,12 ± 1,36 b	21,76 ± 14,55 b

Nota. Los valores se presentan como promedio ± desviación estándar; promedios con letras diferentes entre la misma columna son significativamente diferentes (Tukey's HSD, $\alpha = 0,05$).

Fuente: autores.

En cuanto a la fertilización química T2, aplicada para el mantenimiento de los cultivos de pepino dulce (Sm), Jana (2019) encontró que la mayor demanda de NPK en el crecimiento y desarrollo vegetal ocurre en las primeras ocho semanas del cultivo. No

obstante, algunas investigaciones han demostrado que este tipo de fertilización, además de aumentar los costos de producción, debe ser inevitablemente suprimida para enfrentar la crisis climática actual (Billen *et al.*, 2013).

En *C. pubescens* se encontró que la altura de las plantas en los tratamientos T1, T3 y T4 no presentó diferencias significativas (Tabla 4), sin embargo, en términos del diámetro en la base del tallo y número de hojas, el T4 resultó mejor que T3 y T1 (Tabla 4), posicionándose de segundo después del tratamiento químico. Esta respuesta parece relacionarse con el ciclaje de nutrientes asociado a los biofermentados durante su mineralización, que mediante la secreción de hormonas de crecimiento de las plantas (por ejemplo, T4) se presenta como el segundo que indujo un mayor crecimiento y desarrollo vegetal en *C. pubescens*, contribuyendo con el aumento significativo de la productividad (Tian *et al.*, 2022; Kai-lou *et al.*, 2018), en el presente estudio, mediado probablemente por el incremento de la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes para el CyD vegetal.

Lo anterior coincide parcialmente con lo reportado por Anggraheni *et al* (2019), quienes concluyeron que el mayor rendimiento de ají se produce cuando se aplica al suelo

una fuente inorgánica completa de nutrientes mezclada con una fuente de materia orgánica, generando una biofertilización como complemento de la fertilización química. También para el ají (Cp), Tlelo-Cuautle *et al.* (2020) revelaron que el crecimiento y desarrollo de tallos, hojas, flores, frutos y semillas generó mayor rendimiento cuando se combinó la fertilización química y orgánica. Según reportes de la FAO (2017), los fertilizantes sintéticos están vinculados con una mayor producción de alimentos a nivel mundial, principalmente en países en desarrollo, por lo tanto, más allá de combinar productos, es urgente sustituirlos por fuentes orgánicas desde un enfoque agroecológico de aprovechamiento de nutrientes naturales a favor de los cultivos.

El efecto de los tratamientos mostró diferencias significativas respecto a los parámetros de crecimiento vegetal en *S. muricatum* y *C. pubescens*, medidos en cinco fechas de observación: 21, 42, 63, 85 y 106 días después del trasplante respectivamente (Figura 2).

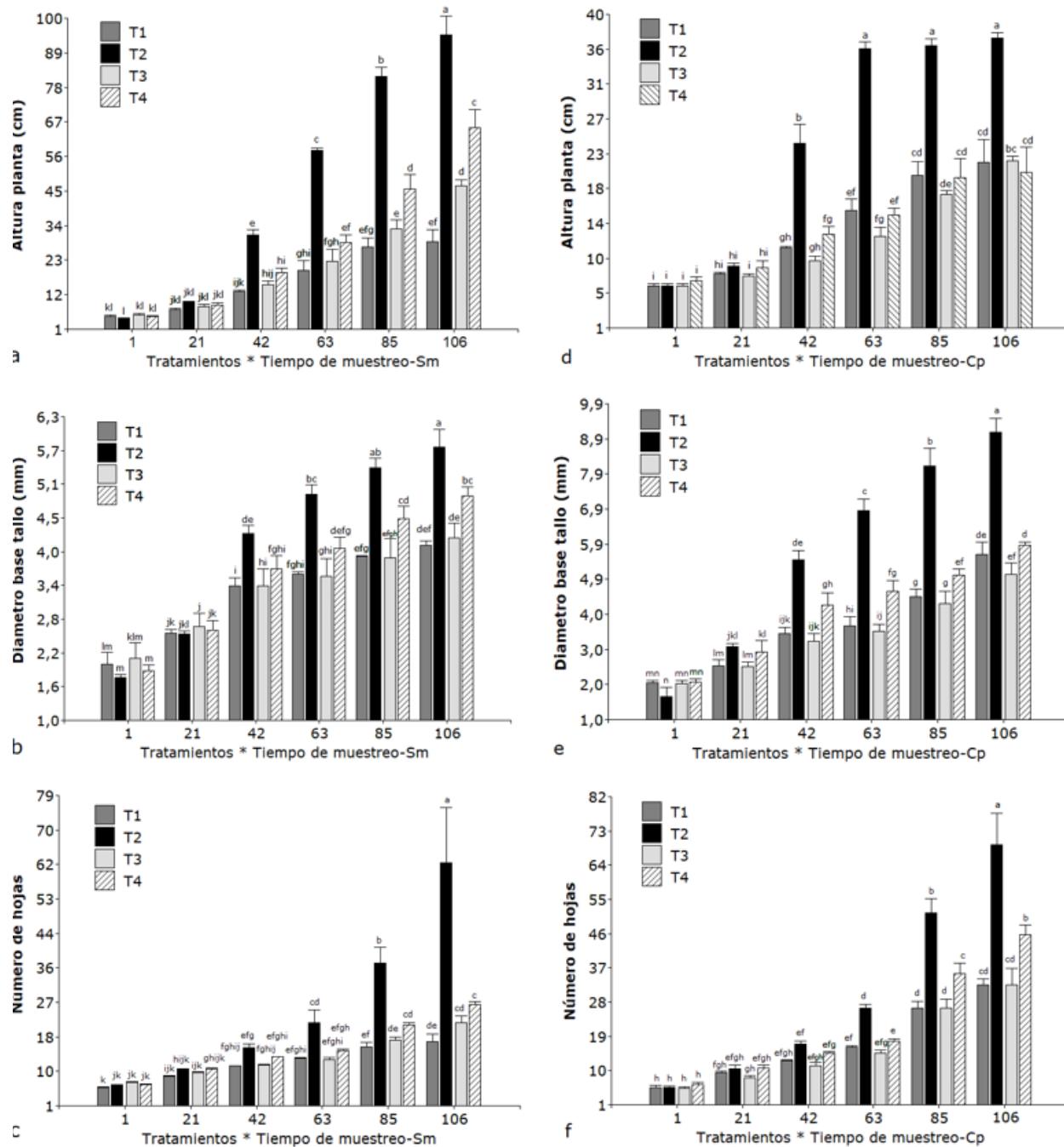


Figura 2. Interacción entre tratamientos y entre tiempos de muestreo en el crecimiento vegetal de *S. muricatum* (Sm) y *C. pubescens* (Cp) durante 21, 42, 63, 85 y 106 días de seguimiento. T1, T2, T3 y T4: tratamientos. Test: Tukey Alfa=0,05, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa, según Tukey, entre tratamientos ($p \leq 0,05$)

Fuente: autores.

El análisis de varianza permitió determinar que la interacción entre los tratamientos y los días de observación fue significativa sobre la altura, el diámetro de la base del tallo y el número de hojas en las plantas de Sm y Cp ($p<0.0001$, Anexo 2). Durante los primeros 21 días el aumento en la altura, diámetro en la base del tallo y número de hojas de las plantas fue similar tanto en Sm como en Cp, por lo tanto, no presentaron diferencias significativas; no obstante, para el día 42 se evidenció un aumento en todas las variables de CyD vegetal por efecto de la aplicación del T2, patrón que se mantuvo a los 63, 85 y 106 días de la evaluación (Figura 3). Peirce *et al.* (2019), indican que el momento de la aplicación y el tipo de compuesto nutricional son importantes en la absorción y translocación de los nutrientes, incidiendo en un mejor desarrollo de los diferentes tejidos vegetales, de tal forma que, para este estudio la integración de soluciones biofertilizantes al suelo promovieron el crecimiento de las plantas en su etapa temprana e intermedia de desarrollo vegetativo. Aunque muchos estudios de nutrición vegetal indican que la suficiente disponibilidad de nutrientes contribuye a la acumulación de biomasa y una mayor capacidad fotosintética de las hojas (Chen *et al.*, 2018), la aplicación excesiva de fertilizantes inorgánicos produce también una baja disponibilidad de agua debido a altas condiciones osmóticas en el suelo, generando desordenes fisiológicos en el desarrollo vegetal (Du *et al.*, 2021).

Pese a que el T2 incrementó todas las variables estimadas a un ritmo más acelerado durante todo el tiempo de evaluación, el CMOM (T4) también se presentó como in-

ductor del CyD en Sm y Cp, a diferencia de T1 y T3. Este hallazgo se puede relacionar con la existencia en el caldo de cepas microbianas funcionales que, aplicadas en estas especies como biofertilizantes, proporcionaron ambientes para intensificar el crecimiento de las plantas en diferentes momentos y condiciones de campo (Pirttilä *et al.*, 2021). Incluso se revela el potencial nutricional del CMOM, constituido precisamente mediante un proceso de fermentación, donde microorganismos y materia orgánica enriquecida con minerales, generan un biofertilizante compuesto y completo (Schütz *et al.*, 2018) con interesantes características para estimular el incremento vegetal de estas dos solanáceas.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con la capacidad que se atribuye a sustancias bioactivas en la nutrición vegetal (Rana *et al.*, 2020), puesto que muchos hongos y bacterias son capaces de mejorar la absorción de macronutrientes, micronutrientes y de la materia orgánica del suelo, aumentando el suministro de estos para el crecimiento de las plantas (Barón y Rigobelo, 2021).

Incidencia de las afectaciones foliares

Se encontró que para Sm (Figura 3, a, b, c) el amarillamiento fue la afectación que expresó el menor índice en todos los tratamientos en comparación con el entorchamiento y la necrosis foliar. Aquí, T1 mostró el índice más bajo (60%), seguido T3=63% y T4=87%. El entorchamiento foliar en Sm

fue uno de los índices con mayor afectación T1=100%, T2=97% y T3=93%, frente a T4 que mostró una notable reducción (30%); también se observó una alta incidencia en el

necrosamiento foliar principalmente en los tratamientos T1, T2 y T3, mientras que el CMOM (T4) reveló una incidencia del 87%.

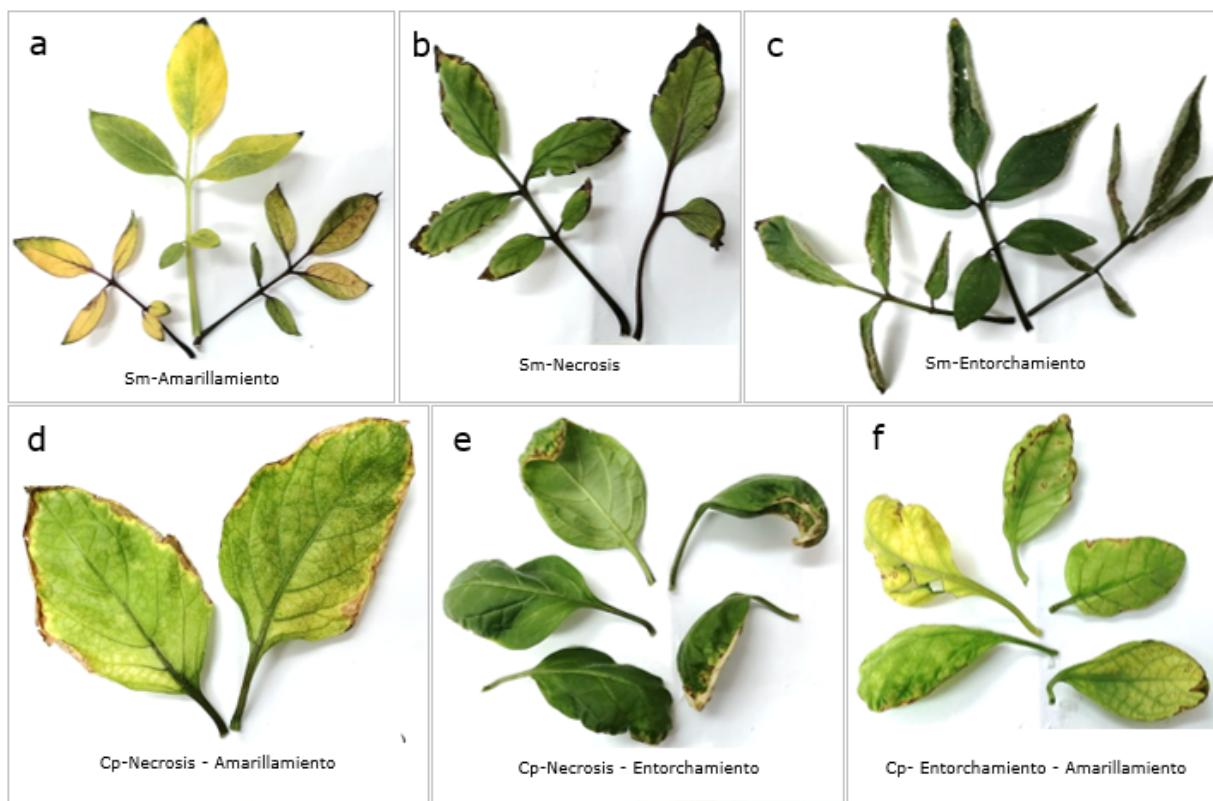


Figura 3. Afectaciones foliares en *S. muricatum* (a, b, c) y *C. pubescens* (d, e, f)

Fuente: autores.

Por su parte, en Cp (Figura 3, d, e, f), el amarillamiento se evidenció fuertemente en T1 (100%) y T4 (73%). El testigo absoluto presentó la mayor incidencia de afectación (100%) relacionada con el entorchamiento foliar, seguido por T2 y T3=97%. La necrosis foliar en T1 y T2 exhibió un 100% de afectación, mientras que en T3 y T4 se observó una leve disminución al 93%.

Los resultados y valores porcentuales dejan ver que T1 y T2 son los tratamientos con

mayores índices de afectaciones foliares, y T4 el que registra en su mayoría la afectación más baja. El que se haya presentado una mayor incidencia en el tratamiento químico, puede relacionarse con una correlación positiva o negativa (punto crítico) entre la tasa de fertilizantes (aumento o disminución) y el impacto en las enfermedades de las plantas (Akanmu *et al.*, 2021). Según Veresoglou *et al.* (2013), aunque la fertilización química promueve significativamente el crecimiento vegetativo de las plantas, puede también au-

mentar la aparición de enfermedades o afectaciones foliares, coincidiendo precisamente con lo observado en este estudio.

Al correlacionar las variables de respuesta, el análisis de componentes principales

(PCA) señala en *S. muricatum* una diferenciación en el CyD vegetal, así como en la incidencia de las afectaciones foliares en relación con los tratamientos evaluados, exhibiendo ~99,6% de la variación (Figura 4a).

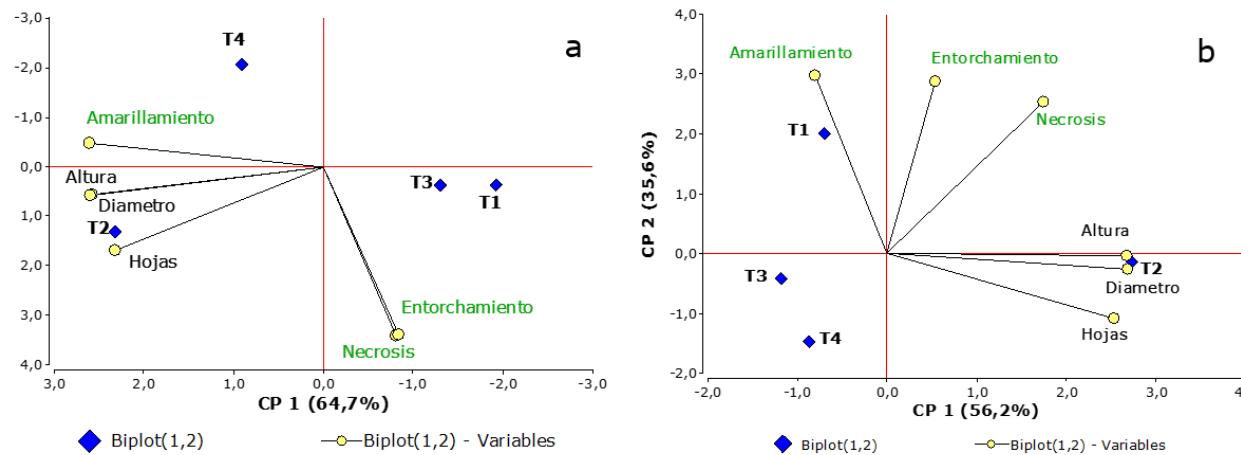


Figura 4. Gráfico correlación entre tratamientos y entre variables de respuesta en *S. muricatum* (izquierda) y *C. pubescens* (derecha)

Fuente: autores.

De acuerdo con la Figura 4a, el primer componente expone 64,7% de la variación y en relación con el CyD vegetal (altura, diámetro y número de hojas) señala una correlación fuerte con T2 y T4. Según los resultados, una aplicación equilibrada de nutrientes utilizando fertilización química y orgánica es una estrategia de manejo clave para mejorar el CyD vegetal en *S. muricatum*. De manera similar Tlelo-Cuautle *et al.* (2020) sugieren que las características agromorfológicas de los diferentes órganos vegetativos y reproductivos en solanáceas agroalimentarias es mayor al aplicar ambos tipos de fertilización.

En este mismo componente, las afectaciones foliares (entorchamiento y necrosis) manifestaron una correlación alta con T3 y T1 y los aleja de los demás tratamientos (Figura 4a). El segundo componente, explica 34,9% de la varianza y correlaciona notoriamente el amarillamiento foliar con T2 y T4; aquí la interacción de las afectaciones foliares en relación con los tratamientos aplicados posiblemente responde a efectos adversos expresados cuando la concentración de los elementos nutricionales aumenta o disminuye más allá de su rango permisible en el suelo (Shrivastav *et al.*, 2020).

En términos de *C. pubescens*, el PCA mostró diferencias en el CyD vegetal, así como en la incidencia de las afectaciones foliares en relación con los tratamientos aplicados, explicando ~91,8% de la variación (Figura 4b). El primer componente expresa un 56,2% de la variación y muestra también una correlación alta con el T2, pero lo distancia ampliamente de los demás tratamientos. Esta respuesta en parte coincide con lo reportado por Mantja *et al.* (2020) quienes mediante la aplicación de fertilización química de NPK, comparado con la aplicación de biofertilizante, observaron un mayor CyD vegetal en varias especies del género *Capsicum*. El componente número dos describe un 35,6% de la variación y correlaciona claramente en términos de las afectaciones foliares con T1 (Figura 4b).

A diferencia de lo observado en el primer componente, la aplicación del biofertilizante en Cp no fue mejor en términos del CyD vegetal, ya que sí disminuyó la incidencia de las afectaciones foliares. Al respecto, Callisaya y Fernández (2017) indican que los biofertilizantes aplicados en los cultivos, además de solubilizar nutrientes, producen sustancias bioactivas que compiten con patógenos del suelo e inciden sobre la filósfera de las plantas. Igualmente, estos compuestos solubilizan nutrientes que promueven el desarrollo vigoroso de las plantas (Guerrero, 2022); esto evidencia que, aunque los biofertilizantes pueden ser efectivos al interactuar con la rizosfera de las plantas y mejorar su condición fitosanitaria, por si solos no configuran una fuente ideal para la nutrición vegetal, en comparación al momento en que son aplicados junto o complementando enmiendas y minerales para la fertilización (Mejía, 2016).

4 CONCLUSIONES

Desde el punto de vista químico y microbiológico, el Caldo Microbiano Orgánico Mineralizado contiene no solo una variedad de elementos para el balance en la nutrición de las plantas sino además microorganismos benéficos esenciales que, mediante procesos específicos, contribuyen activamente a su CyD, por lo que puede utilizarse como suplemento en la fertilización química. En general, las materias primas que se utilizan en la fabricación de biopreparados como el CMOM son de fácil adquisición y su aprovechamiento no representa

una carga contaminante para el ambiente, además su elaboración puede adaptarse a la disponibilidad de recursos locales.

Se encontró una fuerte relación (99,6%) entre el crecimiento y desarrollo vegetal y los tratamientos evaluados, lo que infiere que el CMOM cuenta con un equilibrio en cuanto a nutrientes químicos y orgánicos, manifestado en el aumento del diámetro ($Sm=3,60$ mm, $Cp= 4,12$ mm), la altura ($Sm=2,78$ mm, $Cp= 13,86$ mm) y el número de hojas ($Sm=15,45$ $Cp= 21,76$) de las especies evaluadas.

La obtención y aplicación de biopreparados, como el CMOM elaborado en el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, utilizando como base orgánica equinaza, enriquecida con microorganismos y minerales, pone a disposición una práctica de bajo impacto ambiental y una alternativa agroecológica para fertilizar las plantas, reduciendo

el uso de fertilizantes industriales y con esto los costos en la producción de especies vegetales como las solanáceas agroalimentarias. No obstante, es necesario profundizar en diferentes formulaciones y dosis de aplicación de los biopreparados que promuevan el crecimiento y rendimiento vegetal.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Álvaro Isaac Díaz Alvarado: Conceptualización, desarrollo investigación, análisis de datos, escritura borrador original.

Martha Liliana Pinzón Herrera: concep-

tualización, revisión y edición. **Camilo Andrés Cárdenas Burgos:** conceptualización, análisis de datos, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, especialmente a la Subdirección Científica por facilitar los espacios e insu- mos experimentales y por el apoyo brindado a la línea de investigación en Sanidad Vege-

tal para el desarrollo de este estudio. En general agradecemos a todo el equipo del componente de investigación de Uso Sostenible por su acompañamiento y apoyo durante el proceso de ejecución del proyecto.

FINANCIAMIENTO

Proyecto de inversión 7679 – Investigación para la conservación de los ecosis-

temas y la flora de la Región y Bogotá, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

LITERATURA CITADA

Akanmu, A., Babalola, O., Venturi, V., Ayilara, M., Adeleke, B., Amoo, A., ... & Glick, B. (2021). Plant disease management: leveraging on the plant-microbe-soil interface in the biorational use of organic amendments. *Frontiers in Plant Science*, 12, 700507. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.700507>

Anggraheni, Y., Nuro, F., & Paradisa, Y. (2019). Effect of organic fertilizer on growth and yield of chili pepper. *Proceedings The SATREPS Conference*, 2(1), 30-37.

Añibarro-Ortega, M., Pinela, J., Alexopoulos, A., Petropoulos, S., Ferreira, I., & Barros, L. (2022). The powerful Solanaceae: Food and nutraceutical applications in a sustainable world. *Advances in Food and Nutrition Research*, 100, 131–172. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.03.004>

Aram, S., Saalidong, B., & Osei, P. (2021). Comparative assessment of the relationship between coliform bacteria and water geochemistry in surface and ground water systems. *Plos one*, 16(9), e0257715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257715>

Areeshi, M. (2022). Recent advances on organic biofertilizer production from anaerobic fermentation of food waste: Overview. *International Journal of Food Microbiology*, 374, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109719>

Barón, N., & Rigobelo, E. (2022). Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agri-

culture. *Mycology*, 13(1), 39-55. <https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699>

Bonifaz, A. (2012). Hongos Contaminantes. En *Micología Médica Básica*. [4 edición]. McGraw Hill.

Bonilla, R., González, L., y Pedraza, R. (2021). *Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7405019>

Botrel, N., & Melo, R. (2020). Quality aspects of pepino dulce fruits in distinct ripening stages, packaging forms and storage conditions. *Brazilian Journal of Food Technology*, 23. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.30018>

Billen, G., Garnier, J., & Lassaletta, L. (2013). The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130123. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0123>

Callisaya, Y. y Fernández, C. (2017). Evaluación del efecto que tienen los microorganismos eficientes (EM), en el cultivo de pepinillo (*Cucumis sativus l.*), municipio de Achocalla. *Apthapi*, 3(3), 652–666.

Cando, S., y Malca, L. (2017). Desarrollo de un abono orgánico líquido tipo biol usan-

- do un proceso anaerobio en bio-reactores simples. *Manglar* 13(1), 35-40. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2016.005>
- Chen, Z., Tao, X., Khan, A., Tan, D., & Luo, H. (2018). Biomass accumulation, photosynthetic traits and root development of cotton as affected by irrigation and nitrogen-fertilization. *Frontiers in plant science*, 9, 173. <https://10.3389/fpls.2018.00173>
- Cepero, M., Restrepo, S., Franco-Molano, A., Cárdenas, M., y Vargas, N. (2012). Hongos Anamórficos, Conidiales, Mitosporicos o “Deuteromycetes”. En *Biología de Hongos* (pp. 155–156). Ediciones Uniandes.
- Cruz-Cárdenes, C., Zelaya, L., Sandoval, G., Santos, S., Rojas, E., Chávez, I., & Ruíz, S. (2021). Using microorganisms for a sustainable agriculture in Mexico: considerations and challenges. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 899-913. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2905>
- Delgado, L., Alvarado, W., Freile, M., y Mestanza, R. (2023). Evaluación de caldos microbiales en el rendimiento del cultivo de maní (cultivar INIAP-380). *Revista InGenio*, 6(2), 63-71. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v6i2.589>
- Du, Q., Xiao, H., Li, J., Zhang, J., Zhou, L., & Wang, J. (2021). Effects of different fertilization rates on growth, yield, quality and partial factor productivity of tomato under non-pressure gravity irrigation. *PLoS One*, 16(3), e0247578. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0247578>
- Duranova, H., Valkova, V., & Gabriny, L. (2022). Chili peppers (*Capsicum spp.*): The spice not only for cuisine purposes: An update on current knowledge. *Phytochemistry Reviews*, 21(4), 1379-1413. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09789-7>
- Fischer, G., Balaguera-López, H., & Magntskiy, S. (2021). Review on the eco-physiology of important Andean fruits: Solanaceae. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1). <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1701>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2017). *World fertilizer trends and outlook to 2020*. Summary Report.
- Glick, B. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, artículo 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- González-Estrada, A., & Camacho , M. (2017). Emission of greenhouse gases from nitrogen fertilization in Mexico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), 1733-1745. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>
- Gonzálvez, V., y Pomares, F. (2008). *Manual técnico fertilización y balance de nutrientes en sistemas agroecológicos*. Sociedad española de agricultura ecológica, SEAE.
- Guerrero, R. (2022). Efecto de microorganismos eficaces (em) aplicados en diferentes dosis sobre el cultivo de la soja. *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, 6(1),

1653 – 2345. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1653

Hahne, J., Kloster, T., Rathmann, S., Weber, M., & Lipski, A. (2018). Isolation and characterization of *Corynebacterium* spp. from bulk tank raw cow's milk of different dairy farms in Germany. *PLoS One*, 13(4), e0194365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194365>

Hernández, A., Argüelles, A., Cortez, A., & Díaz, H. (2019). Effect of 2,4-dichlorophenoxyacetic concentration on in vitro callus induction using cotyledons of ro-coto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.). *The Biologist*, 17(2), 327-334. <https://doi.org/10.24039/rtb2019172368>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). *Instructivo códigos para levantamiento de suelos*. Grupo interno de trabajo de levantamientos agrológicos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Frontiers in plant science*, 8, 1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>

Jana A., C. (ed.). (2019). El cultivo del pepino dulce. *La Serena, Boletín INIA*, 410. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6825>

Jara-Samaniego, J., Gallegos, J., y Cruz, A. (2021). Elaboración y caracterización de bioles de residuos orgánicos. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, XXII(45),

189-203. <https://doi.org/10.15517/ISU-CR.V22I45.46013>

Kai-lou, L., Ya-zhen, L., Li-jun, Z., Yan, C., Qing-hai, H., Xi-chu, Y., & Da-ming, L. (2018). Comparison of crop productivity and soil microbial activity among different fertilization patterns in red upland and paddy soils. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3), 262-267. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.08.003>

Loss, A., Couto, R., Brunetto, G., Veiga, M., Toselli, M., & Baldi, E. (2019). Animal manure as fertilizer: changes in soil attributes, productivity and food composition. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 7(9), 307-331. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v7.i9.2019.615>

Mantja, K., Haring, F., Mahendra, W., Syam'un, E., Asrul, L., Sahur, A., & Ridwan, I. (2020). Growth and production of cayenne pepper (*Capsicum frutescens* L.) on various concentrations of bio-fertilizer and NPK fertilizer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 575(1), 012109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/575/1/012109>

Mejía, K. (2016). La fertilización mineral, orgánica y biológica sobre la producción de frijol común en Santa Rosa de Copán. *Revista Ciencia y Tecnología*, 19, 181-194. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i19.4280>

Mengmeng, C., Shirong, Z., Lipeng, W., Chao, F., & Xiaodong, D. (2021). Organic fertilization improves the availability and adsorptive capacity of phosphorus in saline-alkaline soils. *Journal of Soil Science*

- and Plant Nutrition*, 21, 487-496. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00377-w>
- Murillo-Pérez, G., & Rodríguez, A. (2021). Dichotomous keys to the species of *Solanum* (Solanaceae) in Mexico. *Botanical Sciences*, 99(2), 413-446. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.127.34326>
- Pahalvi, H., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. (2021). Chemical fertilizers and their impact on soil health. In: Dar, G.H., Bhat, R.A., Mehmood, M.A., Ha-keem, K.R. (eds) *Microbiota and Biofertilizers*, Vol 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1
- Peirce, C., McBeath, T., Priest, C., & McLaughlin, M. (2019). The timing of application and inclusion of a surfactant are important for absorption and translocation of foliar phosphoric acid by wheat leaves. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1532. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01532>
- Perkins, V., Vignola, S., Lessard, M., Plante, P., Corbeil, J., Dugat-Bony, E., ... & Labrie, S. (2020). Phenotypic and genetic characterization of the cheese ripening yeast *Geotrichum candidum*. *Frontiers in Microbiology*, 11, 737. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00737>
- Pirttilä, A., Mohammad, H., Baruah, N., & Koskimäki, J. (2021). Biofertilizers and biocontrol agents for agriculture: How to identify and develop new potent microbial strains and traits. *Microorganisms*, 9(4), 817. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040817>
- Pradel, M., & Aissani, L. (2019). Environmental impacts of phosphorus recovery from a “product” Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. *Science of The Total Environment*, 656, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.356>
- Qi, P., Wang, J., Liu, Z., Wang, Z., Xu, H., Di, S., ... & Wang, X. (2021). Integrated QuEChERS strategy for high-throughput multi-pesticide residues analysis of vegetables. *Journal of Chromatography A*, 1659, 462589. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462589>
- Rana, K., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Yadav, N., ... & Saxena, A. (2020). Endophytic microbes: biodiversity, plant growth-promoting mechanisms and potential applications for agricultural sustainability. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 113, 1075-1107. <https://doi.org/10.1007/s10482-020-01429-y>
- Raksun, A., Ilhamdi, M., Merta, I., & Mertha, I. (2021). Vegetative Growth of Sweet Corn (*Zea mays L. Saccharata*) Due to Difference Doses of Horse Manure Compost and NPK Fertilizer. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(SpecialIssue), 168-174. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v7iSpecialIssue.863>
- Restrepo R. J. 2007. Manual el ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas. 1a ed. Managua: SIMAS, 262 p
- R Core Team (2022). *The R Project for Statistical Computing*. R Foundation for Statistics

- tical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- República de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 1984, 26 de junio de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. *Diario Oficial* 36700, 26 de julio de 1984.
- Sánchez-Llevat, I., Fuerte-Góngora, L., Ravelo-Ortega, R., y Ávila-García, O. (2022). Estado del arte de los biopreparados por digestión anaerobia como biofertilizantes y bioestimulantes. *Ingeniería Agrícola*, 12(4). <https://cu-id.com/2284/v12n4e07>
- Sánchez, J., Saltos, L., Obando, M., y Rizo, H. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista Riemat*, 5(1), 23-28. <https://doi.org/10.33936/riemat.v5i1.2499>
- Seenivasagan, R., & Babalola, O. (2021). Utilization of Microbial Consortia as Biofertilizers and Biopesticides for the Production of Feasible Agricultural Product. *Biology*, 10(11), 1111. <https://doi.org/10.3390/biology1011111>
- Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2204. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>
- Shrivastav, P., Prasad, M., Singh, T., Yadav, A., Goyal, D., Ali, A., & Dantu, P. (2020). Role of nutrients in plant growth and development. *Contaminants in agriculture: Sources, impacts and management*, 43-59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_2
- Singh, B., Trivedi, P., Egidi, E., Macdonald, C., & Delgado-Baquerizo, M. (2020). Crop microbiome and sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 601-602. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00446-y>
- Téllez, L., Ortiz, L., Calle, J., Jorge, P., Cesare, M., y Visitación, L. (2019). Estabilización de la bosta de caballo mediante un proceso aeróbico similar al compostaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 25-33. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i1.233>
- Tian, S., Zhu, B., Yin, R., Wang, M., Jiang, Y., Zhang, C., ... & Liu, M. (2022). Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108533. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108533>
- Tlelo-Cuautle, A. M., Taboada-Gaytán, O., Cruz-Hernández, J., López-Sánchez, H., y López, P. (2020). Efecto de la fertilización orgánica y química en el rendimiento de fruto de chile Poblano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(3), 238-238. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.238>
- Trivedi, P., Leach, J., Tringe, S., Sa, T., & Singh, B. (2020). Plant–microbiome interactions: from community assembly to

plant health. *Nature reviews microbiology*, 18(11), 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>

Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M., & Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>

Veresoglou, S., Barto, E., Menexes, G., & Rillig, M. (2013). Fertilization affects severity of disease caused by fungal plant pathogens. *Plant Pathology*, 62(5), 961-969. <https://doi.org/10.1111/ppa.12014>

Viteri, S., Granados, M. y González, A. (2008). Potencial de los caldos rizósfera y súper cuatro como biofertilizantes para la sostenibilidad del cultivo de cebolla de bulbo (*Allium cepa*). *Agronomía Colombiana*, 26(3), 517 – 524. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/12030>

Walsh, T., Hayden, R., & Larone, D. (2018). *Larone's medically important fungi: A guide to identification*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1128/9781555819880>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 25-10-2023

Fecha de aceptado: 21/05/2024

DOI: 10.22490/21456453.7272

MAPEO DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO EN LA CADENA PRODUCTIVA DE LA GUAYABA (*Psidium guajava L.*) EN COLOMBIA

MAPPING OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE IN THE GUAVA (*Psidium guajava L.*) PRODUCTION CHAIN IN COLOMBIA

Ligia Inés Melo-Torres¹

Laura Tatiana Ortiz Melo²

Dora Esther Fonseca Pinto³

¹ Doctorado en Proyectos, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia. ligia.melo@uptc.edu.co

² Magíster (c) en Mercadeo. Investigadora Grupo Cide UPTC, Tunja, Colombia. lauratatiana.ortiz@uptc.edu.co

³ Doctora (c) Administración Gerencial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama Colombia. dora.fonseca@uptc.edu.co

Citación: Melo-Torres, L., Ortiz, L., y Fonseca, D. (2025). Mapeo del conocimiento científico en la cadena productiva de la guayaba (*Psidium guajava L.*) en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 59 - 80.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7272>

RESUMEN

Contextualización: la guayaba es una fruta de gran importancia comercial en más de 70 países. Se consume en fresco o procesada y es usada en la agroindustria por diversos derivados del fruto, semillas y hojas. La producción mundial en 2020 fue de 2.075.000 toneladas, siendo Pakistán el principal productor con participación del 22%, Brasil 17%, India 16%, México 15% y Colombia 8%. Es producto de interés dentro del Programa Mundial de Alimentos, Plan de Acción Mundial de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, Agenda 2030 y recurso alternativo para abordar la crisis alimentaria y el desempleo en países en desarrollo. En Colombia está organizada su cadena productiva e identificadas necesidades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), que se pueden relacionar por eslabones y sirven de guía para su análisis, donde el conocimiento es recurso vital para el desarrollo y transformación social.

Vacío de conocimiento: pese al reconocimiento de beneficios a nivel mundial y que Colombia tiene identificadas demandas de I+D+i, la producción científica no se encuentra consolidada, por tanto, se desconoce el estado de avance.

Objetivos: determinar el estado del conocimiento sobre la cadena productiva de la

guayaba en Colombia, frente a las necesidades de I+D+i, consignadas en el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación y aportes a problemáticas de interés.

Metodología: para realizar el mapeo del conocimiento de la cadena productiva de la guayaba se implementó la guía PRISMA, con búsquedas en las bases de datos Web of Science, Scopus, ScienceDirect, PubMed y en el buscador Google Académico, utilizando las palabras clave “guava”, “guajava”, “*Psidium guajava L.*”, “guayaba”, “Colombia”, para el periodo 2010 a 2022.

Resultados y conclusiones: 138 publicaciones cumplieron con los criterios de selección. La mayor productividad científica se centró en los eslabones de producción y transformación, aportando de alguna forma a las necesidades de I+D+i. Las brechas corresponden a temas de innovación, economía circular, contribución a los ODS, calidad, inocuidad, desarrollo empresarial, estudios socioeconómicos, comercialización y exportación.

Palabras clave: alimentación, consumo, eslabones, nutrición, revisión sistemática

ABSTRACT

Contextualization: The guava is a fruit of great commercial importance in more than sixty countries. It is consumed fresh or processed and is used in agribusiness for various derivatives of the fruit, seeds, and leaves. World production in 2020 was 2,075,000 tons, with Pakistan being the main producer with 22% share, Brazil 17%, India 16%, Mexico 15%, and Colombia 8%. It is a product of interest within the World Food Program, Global Plan of Action for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture, Agenda 2030, and an alternative resource to address the food crisis and unemployment in developing countries. Colombia has organized its production chain and identified research, development, and innovation (R&D&i) needs, which can be related by links and serve as a guide for analysis, where knowledge is a vital resource for development and social transformation.

Knowledge gap: despite the recognition of benefits worldwide, and despite having identified R&D&I demands in Colombia, scientific production is not consolidated, so the state of progress is unknown.

Purpose: Determine the state of knowledge on the guava production chain in Colombia, in relation to the R&D&i needs set forth in the Strategic Plan for Science, Technology and Innovation, and contributions to problems of interest.

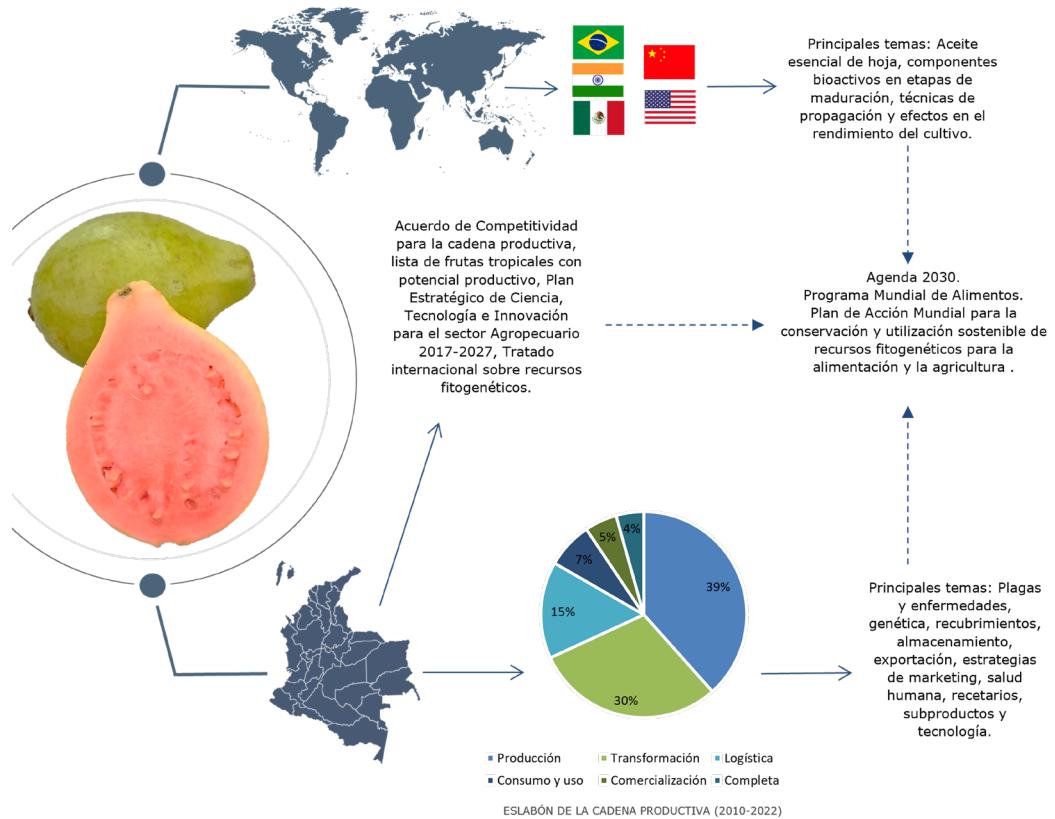
Methodology: To map the knowledge of the guava production chain, the PRISMA guide was implemented with searches in the databases Web Of Science, Scopus, ScienceDirect, PubMed and Google Scholar, using the keywords "guava", "guajava", "Psidium guajava L", "guava", "Colombia"; for the period 2010 to 2022.

Results and conclusions: 138 publications met the selection criteria. The greatest scientific productivity was focused on the production and transformation links, contributing in some way to R&D&i needs. The gaps correspond to topics of innovation, circular economy, contribution to the SDGs, quality, safety, business development, socioeconomic studies, marketing, and exports.

Keywords: consumption, food, links, nutrition, systematic review

RESUMEN GRÁFICO

Mapeo del conocimiento científico de la Guayaba



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe interés en aportar a la solución de diferentes problemáticas como la pobreza, desempleo, desigualdad, salud, bienestar y hambre; para abordarlas es necesario hacer consensos y acuerdos

globales con objetivos en común, como la Agenda 2030, el Programa Mundial de Alimentos y el Plan de Acción Mundial para la conservación y utilización sostenible de recursos fitogenéticos para la alimentación y

la agricultura (FAO, 2012). De igual forma considerando el crecimiento poblacional y el aumento de la demanda de alimentos, los sistemas agrícolas deben adaptarse para responder a patrones de consumo cambiantes y desempeñar un rol relevante en la promoción de la salud y el bienestar (FAO, 2012; CEPAL, FAO e IICA, 2021), con estrategias proactivas y de prevención para enfrentar las crisis alimentarias (FAO, 2022), así como disponer de información y conocimientos útiles para fortalecer sistemas alimentarios, al igual que de inversiones sólidas, para mejorar la seguridad alimentaria, aspectos nutricionales y reducir del hambre.

Dentro de este contexto, la guayaba presente de forma silvestre o tecnificada en regiones tropicales y subtropicales en Centro y sur América, Asia y Australia (Singh *et al.*, 2019), aporta a la solución de esta problemática. Además, la guayaba hace parte de las frutas tropicales con potencial productivo (Departamento Nacional de Planeación, 2008), reconocida como producto alternativo para superar crisis alimentarias y desempleo en países en desarrollo (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2015), convirtiéndose en un recurso de interés mundial por su alto valor nutritivo, propiedades medicinales y antioxidantes de frutos, hojas, flores, raíces, corteza y tallos (Indecopi, 2019).

Colombia cuenta con un Acuerdo de Competitividad para su cadena productiva, donde incorpora componentes de asociatividad, investigación, mercadeo, desarrollo tecnológico e innovación, visión de desarrollo sostenible, equidad social y liderazgo empresarial (Mesa gestora cadena produc-

tiva de la guayaba, 2007). La producción nacional supera las 165 mil toneladas, concentrada en los departamentos de Santander, Boyacá, Atlántico, Meta, Caldas y Valle del Cauca; así, los destinos de exportación son Aruba, España, Estados Unidos, Países Bajos, Canadá, Bélgica y Emiratos Árabes (MADR, 2021) y ocupa el tercer lugar en frutas consumidas con el 14% (Sociedad de Agricultores de Colombia, 2021). Asimismo, la experiencia en industrialización del bocadillo Veleño en Santander y Boyacá por más de 200 años (Ortiz, Melo y Nova, 2020) les permitió obtener la protección de Denominación de Origen, otorgada mediante resolución 35076 de 2017, también reconocida por la Unión Europea en noviembre de 2022, dentro del Acuerdo Comercial con Colombia (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2022).

En el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación para el sector Agropecuario 2017-2027, se identificaron 22 demandas de I+D+i para la cadena productiva, referidas a: transferencia de tecnología, mejoramiento genético, manejo fitosanitario, manejo en cosecha, postcosecha y transformación, aspectos socioeconómicos, inteligencia competitiva y desarrollo empresarial (MADR, 2016). En enero del 2023, a través de la Ley 2285, Colombia aprobó el tratado internacional sobre recursos fitogenéticos. Acciones que trazan un marco base que puede contribuir al cumplimiento de la agenda 2030, al igual que planes de alimentación mundial, atendiendo a lo manifestado por Schot y Steinmueller (2018) quienes abogan por un cambio transformativo so-

ciotécnico para responder a desafíos sociales y ambientales, como los ODS.

Las publicaciones científicas a nivel mundial sobre guayaba, del 2015 a 2020, se registraron en Brasil, India, México, Estados Unidos y China. Las temáticas de investigación fueron: actividades antibacterianas y antiproliferativas del aceite esencial de hoja fresca de guayaba, composiciones bioactivas en guayaba en diferentes etapas de maduración; efecto del tiempo, técnicas y entorno de propagación sobre rendimiento de guayaba (Garavito, 2020); efecto de recubrimientos y determinación de compuestos fenólicos foliares de guayaba mediante técnicas cromatográficas (González Cerón, 2021).

El MADR (2015) y la FAO (2019), manifiestan que el acceso y producción de información, así como datos de mercado mundial sobre la guayaba son restringidos. Razón por la cual amerita estudios rigurosos, generación de informes específicos, desde el enfoque de cadena productiva, que comprende los procesos de generación de un producto para ser entregado al consumidor, así como la interacción que se da entre los actores, donde se distinguen eslabones que añaden valor en todo el proceso hasta llegar al punto de venta final o consumo del producto terminado (Florez *et al.*, 2019). Por lo general, los eslabones considerados en las cadenas productivas son: producción, transformación, comercialización y consumo (MADR, 2021).

El eslabón de producción comprende todas las actividades y temas inherentes al cul-

tivo hasta la cosecha del producto (MADR, 2021), tales como provisión de insumos y equipos, siembra, propagación, mejoramiento genético, plagas, enfermedades, fertilización, riego, poda, buenas prácticas agrícolas y estudios socioeconómicos, entre otros. El eslabón agroindustrial o de transformación incorpora lo referente a procesamiento de productos y sus derivados del fruto u otro componente, así como sus actividades conexas en suministro de equipos, métodos de procesamiento, tecnología y estudios socioeconómicos (Nieto, 2020). El eslabón de logística según Cardona *et al.* (2019) engloba estrategias, tácticas y actividades para el correcto funcionamiento de la cadena de suministro, además de agregar valor y aportar a la competitividad, integra lo concerniente a empaques, en este caso los recubrimientos para conservación del producto y prolongación de vida útil.

El eslabón de comercialización relacionado con inteligencia competitiva abarca la recopilación y análisis de información de competidores, clientes, tendencias, oportunidades y desafíos para la distribución y oferta del producto a diferentes destinos, bien sea en fresco o procesado, también estudios socioeconómicos. Finalmente el eslabón de consumo y uso, integrado por temas como preparaciones, recetarios, usos atribuidos a sus bondades nutricionales, salud y bienestar, el uso de subproductos derivados del fruto, hojas, semillas y otras partes de la planta (Indecopi, 2019; Angulo *et al.*, 2021).

② OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Determinar el estado del conocimiento sobre la cadena productiva de la guayaba en Colombia, frente a las necesidades de

I+D+i, consignadas en el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación y aportes a problemáticas de interés.

③ MATERIALES Y MÉTODOS

El mapeo científico es un proceso genérico que facilita el análisis y visualización del conocimiento y su evolución en el tiempo, desde una perspectiva de estructura intelectual en un ámbito de disciplina científica, un campo de investigación o áreas temáticas relacionadas con preguntas de investigación específicas, que se evidencia a través de una colección agregada de contribuciones de miembros de una comunidad científica o especialidades definidas con mayor precisión (Chen, 2017). El protocolo de investigación se basó en la guía PRISMA que integra la identificación, selección, extracción y registro de datos, evaluación, síntesis y presentación de resultados en revisiones sistemáticas (Bravo, 2021), presente en la Figura 1. Así, se buscó literatura en las bases de datos especializadas Web of Science, Scopus, Science-

Direct, PubMed y en Google académico, utilizando ecuaciones compuestas por palabras clave “guava”, “guajava”, “*Psidium guajava L.*”, “guayaba”, “Colombia” y operadores “and” y “or”; para el periodo 2010 a 2022, atendiendo a su posterioridad a la firma del Acuerdo de Competitividad y otros reconocimientos.

Se analizaron 138 productos científicos, organizados por eslabones: producción, transformación, logística, comercialización, consumo y uso. Dentro de estos se identificaron áreas temáticas asociadas al campo del conocimiento de las demandas de I+D+i, así como a la conservación, manejo y aprovechamiento sostenible del producto. Mediante los programas informáticos NVivo y VOSviewer se obtuvieron nubes de palabras, de textos, resúmenes, palabras clave, objetivos e instituciones filiaciones de autores.

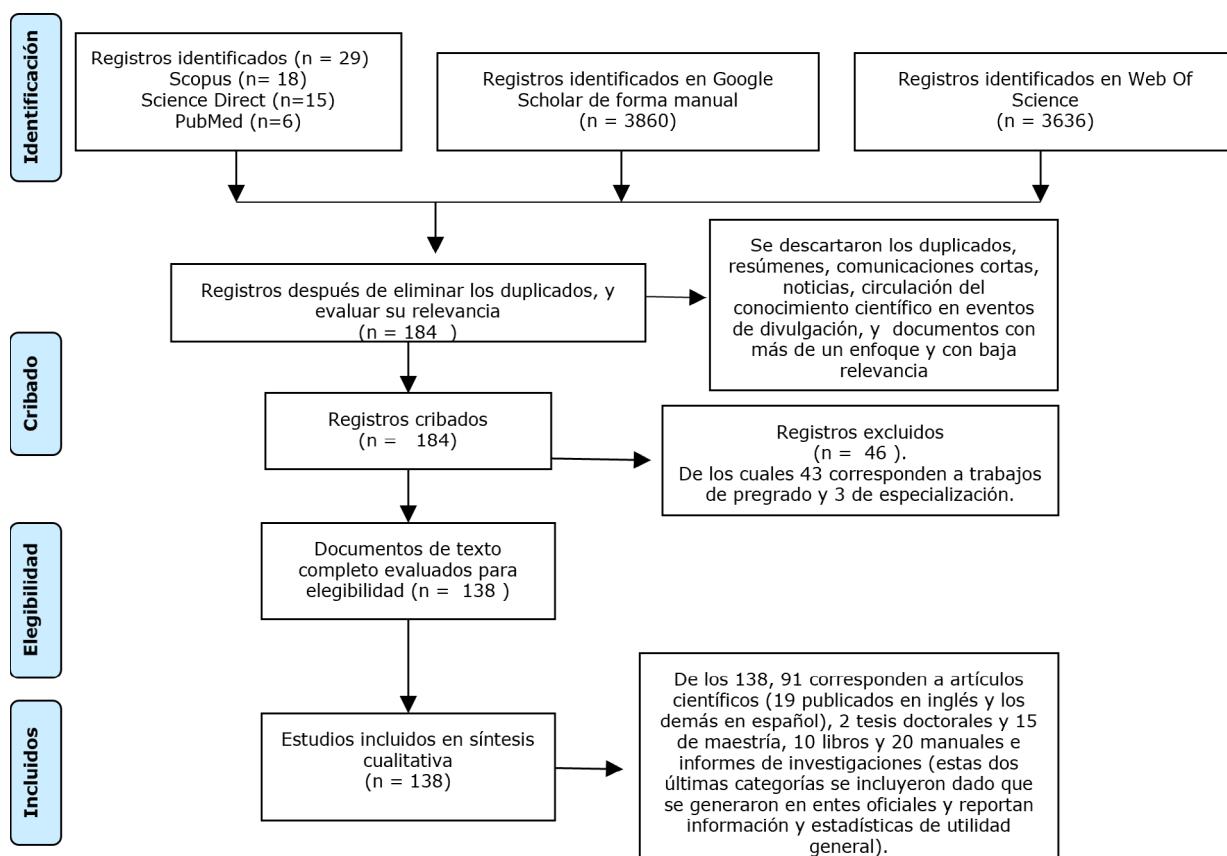


Figura 1. Proceso metodológico de la investigación

Fuente: autoras

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se inicia mostrando el comportamiento de la productividad científica en el país por eslabones y años; así, en la Figura 2 se aprecia en los años 2020 y 2021 el mayor número de publicaciones. Un 4% hace referencia a la cadena completa y se encuentra entre los años 2014 y 2019, comprende manuales e informes de investigación generados en instituciones como el MADR y Agrosavia y un artículo,

cuyo tema abordado fue la globalización e importancia de la tecnología para el desarrollo rural en la provincia de Vélez, región en la cual se originó el bocadillo veleño que cuenta con denominación de origen. Un 5% se evidencia en el eslabón de comercialización que se inició hasta el año 2015; 39% sobre producción, 30% para transformación, 15% referido a logística y 7% sobre consumo y uso.

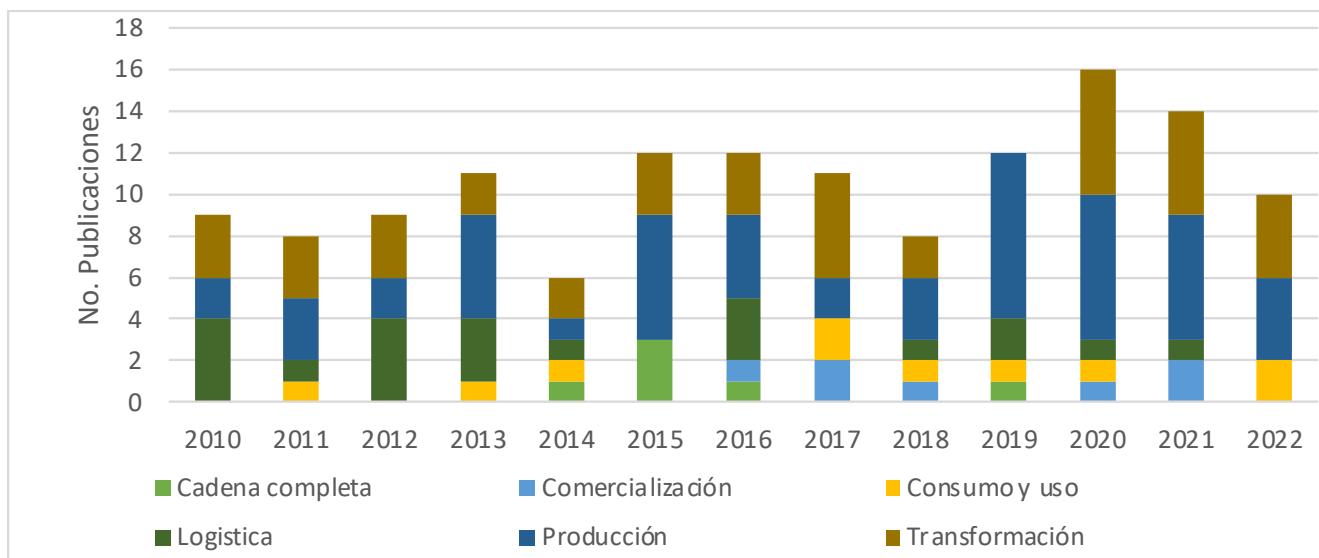


Figura 2. Productividad científica por eslabones de la cadena productiva de la guayaba en Colombia.

Fuente: autoras

Mapeo de conocimiento científico para el eslabón de producción

En este eslabón se encontró el mayor número de publicaciones científicas correspondiente a 53, en la Tabla 1 se observan las temáticas aspectos fitosanitarios en especial el manejo integrado de plagas y enfermedades, referente a estrategias posibles y sostenibles para prevenir, visualizar presencia y mitigar daños, como monitoreo y vigilancia

fitosanitaria, podas, control biológico, químico y cultural (Carabalí *et al.*, 2021). A esto se suma el conocimiento del ciclo biológico y su relación con estados climáticos (Amat *et al.*, 2022), dichos campos que guardan relación con las demandas de I+D+i descritas en el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación para la cadena productiva de la guayaba (MADR, 2016) y que se enmarcan en las acciones contempladas en el Plan de Acción Mundial para los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2012).

Tabla 1.

Áreas temáticas de conocimiento para el eslabón de producción de la guayaba

Área temática	Frecuencia	%	Área temática	Frecuencia	%
Plagas y enfermedades	17	32,1	Genética	9	17
Estudio integral	9	17,0	Fruto	5	9,4
Agua (riego, huella hídrica)	3	5,7	Fertilización	3	5,7
Desarrollo empresarial	3	5,7	Uso tecnología	3	5,7
Malezas	1	1,9			
Total				53	100

Fuente: autoras

En mejoramiento genético las publicaciones hacen referencia a producción clonal de materiales de siembra, ampliación de diversidad genética con mejores rendimientos, valor nutricional y calidad industrial (Rodríguez *et al.*, 2022), estudio de la estructura genética de variedades de guayaba mediante marcadores microsatélitales (Begambre, 2022), caracterización y viabilidad de semillas (Guevara *et al.*, 2020) y transferencia de tecnología para un mejor manejo. Los estudios integrales incluyen recomendaciones generales sobre manejo del cultivo, variedades de guayaba con cifras de producción, valor nutricional, fertilización, riego y socioeconomía del cultivo (Carabali *et al.*, 2019; Aguilera *et al.*, 2020). Respecto al fruto se encontraron caracterizaciones de peso, diámetro, calidad, compuestos volátiles, capacidad antioxidante, perfiles olfativos y efecto de la altitud sobre la calidad (Solarte *et al.*, 2014).

En desarrollo empresarial se mencionan investigaciones de impacto tecnológico y socioeconómico del cultivo, la asociatividad

para la productividad y necesidades de avance en cuanto a competitividad del sector (Buenhombre y Mariño, 2022). En relación con el riego, la innovación fue lo crucial para su realización incorporando energías alternativas, también se analizó la determinación de huella hidrica verde, azul y gris (Corba *et al.*, 2018). En tecnología la utilización de imágenes provenientes de sensores para establecer correlación entre las características locales y regionales que afectan directa e indirectamente la producción de la guayaba (Becerra *et al.*, 2016).

Resultados alineados con las temáticas a nivel mundial (Garavito, 2020), que responden a tendencias y factores de cambio en I+D+i (Florez *et al.*, 2019; Schot y Steinmueller, 2018), al aportar a la conservación y mejoramiento de materiales de siembra, buenas prácticas en manejo del cultivo, que impactan en el rendimiento, calidad y afectación ambiental en los sistemas agrícolas. A esto se suma que dichos resultados ayudan a la conservación y mejoramiento sostenible de los recursos fitogenéticos, desde una

perspectiva agroalimentaria, con beneficios tangibles para diferentes stakeholders al tener conocimiento disponible, además de incrementar rendimientos e ingresos.

Mapeo de conocimiento científico para el eslabón de transformación

Este eslabón ocupó el segundo lugar con 41 publicaciones científicas. En la Tabla 2 se muestra en número y porcentaje por áreas temáticas identificadas; en primer lugar, las relacionadas con la obtención de subproductos, entre estos la harina de semillas de guayaba y sus diferentes usos en panadería y bebidas (Ordoñez *et al.*, 2018), extracción

de aceites y elaboración de bioadsorbentes para descontaminar aguas residuales; harina de guayaba utilizada para ligar carnes frías (Pineda, 2020), así como en la elaboración de alimento para peces (Gutiérrez y Merino, 2021). Además de la obtención de diferentes alimentos funcionales y los tradicionales dulces de guayaba, se han adelantado investigaciones para dar otro valor agregado a este producto en la preparación de licores (Cabrera *et al.*, 2012). Lo referenciado muestra que no solo se usa el fruto para consumo humano, sino que son variados los productos, subproductos y usos que se obtienen de la guayaba, acorde con lo descrito por Indecopi (2019) y Angulo-López *et al.* (2021), por mencionar algunos referentes.

Tabla 2.

Áreas temáticas de conocimiento para el eslabón de transformación de la guayaba

Área temática	Frecuencia	%	Área temática	Frecuencia	%
Subproductos	24	58,5	Encapsulación	2	4,9
Tecnología	7	17,1	Salud humana y animal	2	4,9
Propiedades del fruto	5	12,2	Desarrollo empresarial	1	2,4
Total				41	100

Fuente: autoras

En tecnología se encuentra la evaluación de diferentes métodos de secado y determinación de compuestos de interés nutracéutico, fibra, calcio y vitamina C, antes y después de estos procesos (Estrada *et al.*, 2018). Igualmente, se mostraron alternativas de extracción de licopeno reconociendo sus beneficios para la salud del ser humano (Rosero *et al.*, 2017). En encapsulado se propuso un medio novedoso para incorporar caro-

tenoides de guayaba, colorante natural con alta capacidad antioxidante y contenido de fibra dietética en la fabricación de productos funcionales que pueden ser de interés para la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Otalora *et al.*, 2022). Finalmente, en el eslabón de transformación se presentaron estudios sobre el efecto de compuestos de guayaba para la salud humana (Cuadrado *et al.*, 2022) y ensayos en ratas con diabetes,

obteniendo buenos resultados (Púa *et al.*, 2020).

Las temáticas identificadas responden a tendencias y factores de cambio propuestos por Flórez *et al.* (2019) y Schot y Steinmuller (2018), en especial en el factor de generación de valor agregado compuesto por investigación en superfrutas, fortalecimiento de diferenciadores y alimentos biofortificados, en función de aportar a problemas de nutrición, salud y bienestar. También representan avances significativos en descubrir más subproductos procurando el uso completo de todos los residuos, para generar el menor impacto posible al ambiente (Angulo *et al.*, 2021) e ir avanzando en la aplicación del concepto de economía circular (Vetroni *et al.*, 2020), ampliando mercado, demanda y beneficiarios.

Mapeo de conocimiento científico para el eslabón de logística

Para esta agrupación se encontraron 21 publicaciones enmarcadas en las temáticas de almacenamiento, poscosecha, recubrimientos y madurez del fruto. Acorde con Cardona *et al.* (2019), se trata de actividades que agregan valor y a la vez aporten a la competitividad. La mayoría de estas publicaciones hacen alusión a observación y evaluación de características o cambios que se pueden dar en el fruto bajo determinadas condiciones de almacenamiento y conservación, al igual que métodos de limpieza como el protocolo presentado por Medina (2019),

calificado de eficiente y práctico que contribuye a un manejo adecuado en postcosecha.

Dieciséis publicaciones analizan atributos del fruto, referentes a contenidos de vitamina C, betacaroteno, compuestos fenólicos y calidad, bajo diferentes condiciones de almacenamiento, teniendo en cuenta las variables, tiempo, temperatura y refrigeración; así, variados estados de madurez en recolección permitieron observar la continuación del proceso aún después de cosechado. Dos estudios analizaron el contenido de residuos de pesticidas organofosforados en la fruta y de metales pesados en su pulpa, alertando sobre la calidad del producto en determinados lugares cercanos a actividades humanas (Gómez *et al.*, 2019). Tres publicaciones muestran las bondades de recubrimientos comestibles que presentan una excelente oportunidad para prolongar la vida útil del fruto, conservando firmeza y evitando la pérdida de peso (González *et al.*, 2016; González-Chavarro *et al.*, 2021). De igual forma, la aplicación de nanocontenedores evidenció una mejor apariencia en los frutos tratados respecto a los sin tratar, hasta los 12 días de almacenamiento (Macias y Reyes, 2020).

Las pocas publicaciones encontradas permiten sentar bases sólidas para continuar con estudios a fin de incrementar la productividad científica y aportar con mayor ahínco sobre el tema; en ese sentido, la guayaba al ser un producto perecedero requiere investigaciones robustas a fin de lograr una mayor vida útil, conservando sus propiedades al máximo, al igual que evitar la pérdida y desperdicio que representan un alto porcentaje, según informe de la FAO (2019).

Además de coincidir con tendencias a nivel mundial (Gómez, 2021), las investigaciones sobre estas temáticas representan beneficio para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios, propósitos que no pueden dejarse de lado, en un momento de aumento del hambre y la malnutrición en el mundo, sumado al alza en precios de los alimentos (FAO, 2022).

Mapeo de conocimiento científico para el eslabón de comercialización

La comercialización es de gran relevancia para la cadena productiva de la guayaba, puesto que no solo se trata de producir y transformar productos, sino de llegar a un significativo número de destinos y clientes, es hacer inteligencia competitiva; sin embargo, para este eslabón solo se encontraron siete publicaciones, este bajo número ratifica lo manifestado por el MADR (2016), que señala que la comercialización es una de las mayores problemáticas de la cadena productiva y, al mismo tiempo, es el eslabón menos investigado; por tanto, la información sobre el mercado mundial de la guayaba es restringido (MADR, 2015; FAO, 2019), lo cual limita muchas posibilidades para el producto y sus stakeholders.

Las áreas temáticas de interés son exportación, estrategias de marketing, demanda del producto, precio, consumo y factores de integración de mercado. En exportación se muestran las posibilidades de establecer tra-

tados entre Colombia y los socios comerciales de la Alianza Pacífico para llevar frutas a donde no hay acuerdos comerciales vigentes con Colombia, así como determinar las oportunidades del producto en diferentes mercados internacionales (Vergara *et al.*, 2021). Se desarrollaron estrategias de marketing para las empresas vinculadas al bocadillo veleño, identificando debilidades en la planeación vista a corto plazo y bajo uso de internet, lo cual dificulta proyectar imagen y llegar a un mayor número de mercados; no obstante, se tienen fortalezas al contar con direccionamiento estratégico y oportunidades potenciales debido al reconocimiento de denominación de origen, que se utiliza como estrategia de diferenciación competitiva y que además contribuye al desarrollo regional (Peña *et al.*, 2017; Ortiz *et al.*, 2020).

Mapeo de conocimiento científico para el eslabón de consumo y uso

La guayaba es un producto de interés mundial dentro del Programa Mundial de Alimentos, el Plan de Acción Mundial para los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, Agenda 2030 y considerado alternativo para superar la crisis alimentaria en países en desarrollo, por su alto valor nutricional, además del reconocimiento de atributos medicinales y usos alternativos (MADR, 2015; Indecopi, 2019; Angulo-López *et al.*, 2021), al igual que aportar a soluciones basadas en la naturaleza (FAO,

2022); sin embargo, para este eslabón se encontraron solo diez publicaciones, donde las áreas temáticas de interés hacen alusión a salud humana, alimentación animal, descontaminante de agua y recetario.

A la guayaba se le atribuyen beneficios para la salud humana, siendo complemento en casos de desnutrición por su contenido de vitaminas, propiedades medicinales en problemas gastrointestinales y de colesterol. Según Franco *et al.* (2019) el consumo a mediano plazo de compota a base de guayaba mejora la presión arterial en pacientes diabéticos e hipertensos, considerado de esta manera como una alternativa medicinal natural. También se destaca que las plantas de guayaba aportan en alto grado a la obtención de polen para la apicultura (Muñoz, 2022); otros usos de este producto son en la alimentación de peces en cautiverio como la sabaleta, con el fin de mejorar color, peso y conversión alimenticia (Espinal *et al.*, 2022).

Por su parte las semillas de guayaba son usadas en la remoción de plomo en aguas residuales, mediante tecnologías no convencionales se encontró la mayor eficiencia con un 100 % (Esteban *et al.*, 2020) y, finalmente, pero no menos importante se encontró un recetario de preparaciones con guayaba agria. En ese sentido, la guayaba al ser un producto con gran número de beneficios, se requiere de creatividad y estrategias de innovación

vación alimentaria sustentable, en el diseño, preparación y presentación para el consumo de productos alternativos, que respondan a tendencias y factores de cambio (Florez *et al.*, 2019; Schot y Steinmueller, 2018).

Mapeo de instituciones a partir de la filiación de los autores

Identificar instituciones a las cuales pertenecen los autores es de crucial relevancia, puesto que permite reconocer pioneros, liderazgo y especialización en determinadas áreas o temas, así como el establecimiento de redes de conocimiento y mayores aportes en creación, circulación y apropiación del conocimiento. Respecto a instituciones-filiación de los autores, en la nube de palabras (Figura 3) se observa centralidad y tamaño en relación con mayor número de publicaciones. La Universidad Nacional de Colombia (UNAL) es líder con 45, donde 10 fueron en coautoría nacional y 6 en coautoría internacional de España, Honduras, Brasil y Países Bajos. Seguida por Agrosavia con 21 publicaciones, 8 en coautoría nacional y 1 en coautoría internacional con Brasil. Luego la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) con 9 publicaciones, 4 en coautoría nacional. Continua la Universidad de Córdoba (Unicordoba) con 8 publicaciones, 3 en coautoría nacional.

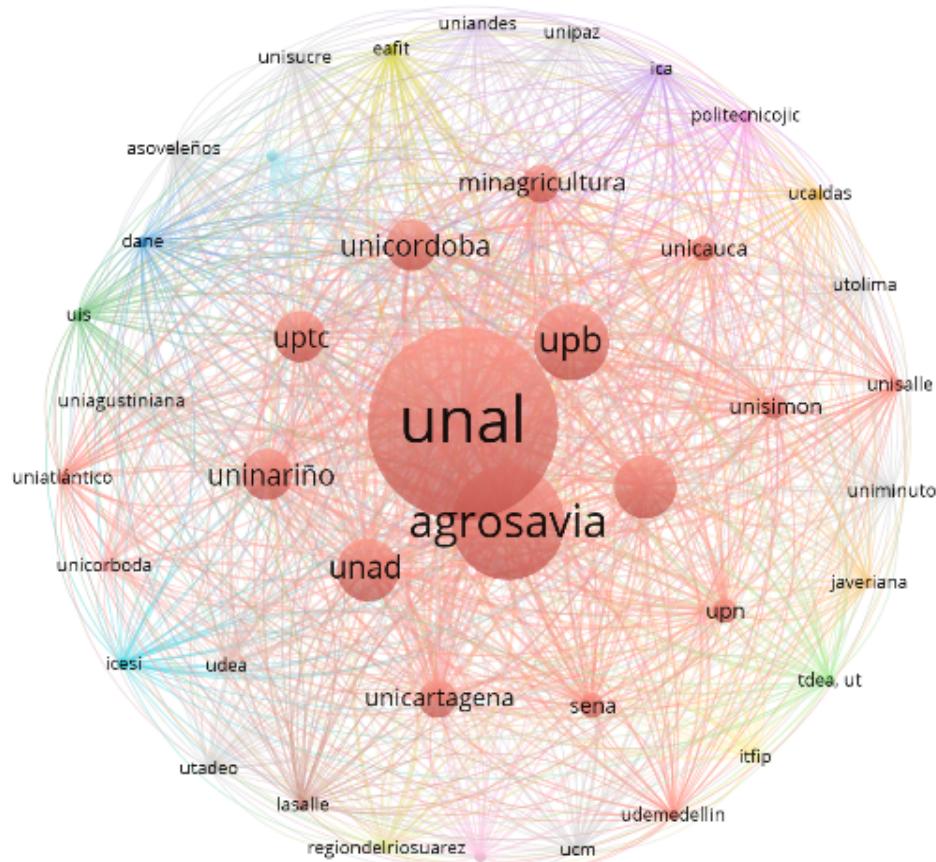


Figura 3. Nube de palabras de instituciones filiación de autores

Fuente: autoras

4 CONCLUSIONES

El mapeo del conocimiento sobre la cadena productiva de la guayaba en Colombia para el periodo 2010 a 2022 con análisis por eslabones, permitió identificar temáticas abordadas, brechas, desarrollo e innovación y potencialidades de este producto, así como la evolución del conocimiento sobre este sistema agroalimentario, en función de interpretar, utilizar, trasmitir, replicar y aprovechar cooperativamente las experiencias,

formalizar redes de conocimiento y proyectar nuevos estudios, a fin de incentivar la visibilidad de la incidencia del ecosistema productivo en el desarrollo de las regiones, disminución de disparidades, así como en los beneficios a la salud y nutrición, en especial en los países en desarrollo con mayor repercusión de la pobreza y donde menos se consume el producto.

Este estudio destaca la importancia de la investigación continua sobre la cadena de la guayaba en Colombia, con una clara necesidad de esfuerzos de investigación enfocados en comunicar mejor las cualidades nutricionales y potenciales, así como posibles efectos benéficos para la salud, inversión en I+D+i de nuevos productos alimenticios, terapéuticos y cosméticos a base de guayaba, gestión de información de variables agroclimáticas de interés y su aplicación. A esto se suma la adaptación a patrones y tendencias de consumo, que sin duda conllevan a cambios en la producción con mayor incursión en conocimiento e implementación de la agricultura de precisión, agricultura orgánica, aporte a los ODS, asistencia técnica y extensión agropecuaria, biotecnología, economía circular, mitigación y adaptación al cambio climático y sostenibilidad. Esto también infiere la necesidad de estudios e innovaciones en temas

que estén relacionados con alimentos biofortificados, bioconstrucción, bioinsumos, disminución y reutilización de subproductos, producción limpia, manejo e implementación tanto, de vehículos aéreos y equipos de georreferenciación, como de sistemas de detección y diagnóstico de campo.

De igual forma, este trabajo es un insumo importante de utilidad a diferentes stakeholders, como tomadores de decisiones en políticas, academia y actores de la cadena productiva de la guayaba, al acopiar conocimiento científico relevante para el reporte Colombiano de información a los Programas Mundiales de Alimentos, el Plan de Acción Mundial para los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, al igual que avances en los indicadores de la Agenda 2030 y las necesidades de I+D+i.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Ligia Inés Melo-Torres: concepción y diseño, búsqueda de información, escritura, revisión del artículo y versión final.
Laura Tatiana Ortiz Melo: investigación,

análisis de datos, escritura y edición. **Dora Esther Fonseca Pinto:** análisis de datos, conceptualización y revisión.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigaciones UPTC y Fundación Morichales de Colombia por el respaldo al proyecto “Vigilancia e inteligencia estratégica para el fortalecimiento

de la competitividad de la agroindustria de frutas promisorias en el departamento de Boyacá”, del cual se deriva este artículo.

FINANCIAMIENTO

El presente artículo es derivado del proyecto de investigación: Vigilancia e Inteligencia estratégica para el fortalecimiento de la competitividad de la agroindustria de

frutas promisorias en el departamento de Boyacá. Código 3062, que contó con capital semilla por parte de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

LITERATURA CITADA

Aguilera, G., Rodríguez, E., Chaparro, H., y Orduz, J. (2020). Estado actual de la investigación para el cultivo de guayaba en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3) <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.40207>

Amat, E., Altamiranda, M., Canal, N., y Gómez, L. (2022). Changes in the potential distribution of the guava fruit fly *Anastrepha striata* (Diptera, Tephritidae) under current and possible future climate scenarios in Colombia. *Bulletin of Entomological Research*, 12(2), 469-480. <https://doi.org/10.1017/S0007485321000985>

Angulo, J., Flores, A., Torres, C., Ramírez, K., Martínez, G., & Aguilar, C. (2021). Guava. Fruit and Valorization of Industrialization By-Products. *Processes*, 9(6), 1075. <https://doi.org/10.3390/pr9061075>

Becerra, L., Matiz, J., Ariza, O., Borda, D., y Medina, J. (2016). Aplicación de imágenes de satélite y de sistemas UAV para la producción de guayaba en la provincia de Vélez, Santander. *UD y la Geomática*, 11(46), 53. <http://hdl.handle.net/11349/21286>

Begambre, M. (2022). *Diversidad y estructura genética de la guayaba dulce (*Psidium guajava l.*) evaluada mediante marcadores microsatélites en tres municipios de Córdoba* [Tesis de maestría]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/6162>

Bravo, R. (2021). *La declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas*. https://bibliogetafe.com/wp-content/uploads/2021/04/prisma_2020_statement_definitivo-espanol-completo.pdf

Buenhombre, M., y Mariño, G. (2022). Asociatividad como estrategia de productividad y competitividad del sector agrícola. *Venezolana de Gerencia*, 27(98), 619-633. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.98.15>

Cabrera, S., Cuenca, M., y Quicazen, M. (2012). Efecto de la proporción de pulpa en el mosto para la producción de bebida alcohólica de guayaba (*Psidium guajava*). *Vitae*, 19(1), S246-S248. <https://www.redalyc.org/pdf/1698/169823914074.pdf>



Carabalí, A., Canacuán, D., Montes, M., Deantonio, L., Lesmes, J., Holguín, C., . . . Jaramillo, A. (2021). *Plagas y enfermedades de la guayaba (*Psidium guajava*) en Colombia*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigacion.7404579>

Carabali, A., Correa, D., Jaramillo, A., Rodríguez, E., Tarazona, R., Grajales, L., . . . Montes, M. (2019). *Prácticas de manejo sostenible para el cultivo de la guayaba*. Agrosavia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35029>

Cardona, D., Rodríguez, C., Del Río, J., Balza, V., Redondo, J., Ibarra, D., . . . Salas, C. (2019). *Logística y cadena de suministro: aproximaciones teórico-prácticas*. Cecar. <https://www.cecar.edu.co/documentos/editorial/e-book/logistica-y-cadena-de-suministro-digital.pdf>

CEPAL, FAO e IICA. (2021). *Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022*. CEPAL <https://hdl.handle.net/11362/47208>

Chen, C. (2017). Science Mapping: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Data and Information Science*, 2(2), 1-40. <https://doi.org/10.1515/jdis-2017-0006>

Corba, J., Vargas, L., y Torres, J. (2018). Determinación de la huella hídrica para un cultivo de guayaba pera (*Psidium guajava*). *Publicaciones e Investigación*, 12(2), 69–81. <https://doi.org/10.22490/25394088.2963>

Cuadrado, C., Muñoz, C., Giraldo, R., Del pozo, M., y Osorio, C. (2022). Biocon-

version of Glycosidic Precursors from Sour Guava Fruit by the Oral Microbiota into Odor-Active Volatile Compounds. *Molecules*, 27(4), 1269. <https://doi.org/10.3390/molecules27041269>

Departamento Nacional de Planeación. (DNP). (2008). Conpes 3514. *Política nacional fitosanitaria y de inocuidad para las cadenas de frutas y de otros vegetales*. DNP. <https://www.ica.gov.co/getattachment/b12bfeda-1f37-4266-9c0c-e5c9e-96be7bf/2008CN3514.aspx>

Espinal, J., Blandón, J., y Londoño, L. (2022). Uso de guayaba, sobre producción y salud en sabaleta (*Brycon henni*), en cautiverio. (UPTC, Ed.) *Pensamiento y acción*, 33, 19. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/pensamiento_accion/article/view/15424/12431

Esteban, J., Gómez, D., y Baracaldo, D. (2020). Tecnologías no convencionales para la remoción de plomo presente en aguas residuales: una revisión bibliográfica. *Tecnura*, 24(64), 97–116. <https://doi.org/10.14483/22487638.15849>

Estrada, H., Restrepo, C., Saumett, H., y Pérez, L. (2018). Deshidratación Osmótica y Secado por Aire Caliente en Mango, Guayaba y Limón para la Obtención de Ingredientes Funcionales. *Información tecnológica*, 29(3), 197-204. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000300197>

Flórez, N., Lázaro, L., Tautiva, L., Villota, C., y Galvis, M. (2019). *Marco Nacional de Cualificaciones Colombia: Área de cualificación agropecuaria*. Agrosavia. <https://>

doi.org/10.21930/agrosavia.institutional.7403138

Franco, M., Isaza, A., Posada, G., y Maldonado, M. (2019). Efecto del consumo de un alimento con base de frutas y aditivos naturales en pacientes con riesgo cardiovascular. *Vitae*, 26(2), 68-77. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.vitae.v26n2a02>

Garavito, H. C. (2020). *Contexto de cadena guayaba. Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario Colombiano*. Agrosavia. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36958>

Gómez, D., León, G., Puello, J., Torrenegra, M., León, D., y Granados, C. (2019). Determinación de metales pesados (Pb y Cd) en pulpas de guayaba (*psidium guajava*) obtenidos en la ciudad de Cartagena. *Bistua*, 17(2), 137-143. <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2019.3530>

González, S. (2021). *Contexto de cadena guayaba. Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario Colombiano*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.fichascontexto.2021.5>

González, R., Cervantes, Y., y Caraballo, L. (2016). Conservación de la guayaba (*Psidium guajava L.*) en poscosecha mediante un recubrimiento comestible binario. *Temas Agrarios*, 21(1), 54 - 64. <https://doi.org/10.21897/rta.v21i1.891>

González-Chavarro, C., Pulido, V., Pantoja, D., y Portilla, F. (2021). Efecto de un recubrimiento comestible comercial sobre las

características fisicoquímicas de frutos de guayaba (*Psidium guajava L.*) bajo condiciones de almacenamiento. *Información Tecnológica*, 32(3), 69-78. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000300069>

Guevara, J., Cardozo, C., y Santos, L. (2020). Caracterización morfo-anatómica y protocolo para estimar la viabilidad de semillas de *Psidium guajava*. *Acta agronómica*, 69(2), 155-161. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.65257>

Gutiérrez, M. y Merino, M. (2021). *Manual práctico para la preparación de alimentos balanceados artesanales para piscicultura*. Aunap. <https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2021/01/Manual-preparaci%C3%B3n-de-alimentos-FINAL-1.pdf>

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual. (Indecopi). (2019). Guayaba. *Seriada*, 5, 62. <https://indecopi.gob.pe/web/invenciones-y-nuevas-tecnologias/boletin-biopat-peru>

Macias, C., & Reyes, J. (2020). Citral nano-containers applied to guava fruits (*Psidium Guajava L.*) in postharvesting. *DYna*, 87(212), 267-276. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.80496>

Medina, F. (2019). *Evaluación del efecto de procedimientos de limpieza sobre la remoción de microbiota y carga orgánica en la poscosecha de guayaba. (*Psidium guajava L.*)*. <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2533/1/Favio%20Armando%20Medina.pdf>.

Mesa gestora cadena productiva de la guayaba. (2007). *Acuerdo regional de Competitividad de la cadena productiva y su industria*. UIS. https://grupofrutalesunad.weebly.com/uploads/2/7/3/3/27332247/acuerdo.competitividad_guayaba.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (MADR). (2015). *Dirección de cadenas productivas. Organización Cadena Agroalimentaria de la Guayaba y su Industria*. MADR. <https://sioc.mnagricultura.gov.co/Guayaba/Documentos/2015-10-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (MADR). (2016). *Plan Estratégico de Ciencia Tecnología e Innovación del sector Agropecuario Colombiano. Cadena de la guayaba*. Agrosavia. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1391>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (MADR). (2021). *Cadena de la guayaba*. MADR. <https://sioc.mnagricultura.gov.co/Guayaba/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2022). *La Unión Europea reconoció indicación geográfica para el bocadillo veleno*. <https://www.mincit.gov.co/prensa/noticias/comercio/ue-indicacion-geografica-para-el-bocadillo-veleno>

Muñoz, E. (2022). Determinación de origen botánico y geográfico mediante estudios polínicos de mieles colectadas por Apis mellifera Linneo en el Departamento del Cauca, Colombia. *Revista de la asociación colombiana de ciencias biológicas*, 34, 105- 121. <https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i34.267>

Nieto, V. M. (2020). *Cadenas Productivas industriales. Estructura, Comercio Internacional y Prospectiva (2002-2017)*. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Cadenas-Productivas-Industriales.pdf>

Ordoñez, J., Román, L., Giraldo, O., Hoyos, E., Barrera, E., y Jiménez, C. (2018). Caracterización bromatológica de harina de semillas de guayaba obtenida a partir del proceso industrial de despulpado y su potencial para la elaboración de una bebida tipo colada. *SENOVA*, 4(1), 12-22. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2053>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2012). *Segundo Plan de Acción Mundial para los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura*. FAO. <https://www.fao.org/4/i2624s/i2624s00.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). FAO. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. FAO. <http://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). FAO. (2022). *Informe Mundial sobre la crisis alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/global-report-on-food-crises-GRFC-2023-GNAFC-fao-wfp-unicef-ifpri/es>

Ortiz, L., Melo, L., y Nova, L. (2020). Análisis del plan de marketing en empresas de la agroindustria alimentaria en Colombia. *Espacios*, 41(45), 12. doi: 10.48082/espacios-a20v41n45p12

Otalora, M., Wilches, A., & Gómez, J. (2022). Spray-Drying Microencapsulation of Pink Guava (*Psidium guajava*) Carotenoids Using Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves as Encapsulating Materials. *Polymers*, 14, 310. <https://doi.org/10.3390/polym14020310>

Peña, Y., Muñoz, J., y Vargas, A. (2017). El rol de la asociatividad en la denominación de origen del bocadillo veleño colombiano como estrategia de competitividad. I+D *Revista de Investigaciones*, 9(1), 27-27. <https://doi.org/10.33304/revinv.v09n1-2017003>

Pineda, R. (2020). El poder de la guayaba. *Universitas Científica*, 26-29. <https://revistas.upb.edu.co/index.php/universitas/article/view/4954>

Púa, A., Rodríguez, J., Bécquer, M., Núñez, M., y Muñoz, A. (2020). Actividad Hipoglucémica De Pulpas De Frutas Tropicales. *Ciencia y tecnología de los alimentos*, 30(3), 10-14. <https://www.revcitecal.iiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/200>

Rodríguez, E., Grajales, L., Ossa, J., y Cañar, D. (2022). *Producción clonal de material de siembra de guayabo mediante la técnica de injertación en púa terminal*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405262>

Rosero, J., Mejía, L., y Ordoñez, L. (2017). Extracción asistida por enzima de licopeno en pulpa de Guayaba (*Psidium guajava* L.). *Ciencia y Tecnología - RECyT*, 11- 15. <https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/198/287>

Schot, J., y Steinmueller, E. (2018). Tres marcos de políticas de innovación: I+D, sistemas de innovación y cambio transformativo. *Research*, 47, 1554-15567. <https://cta.org.co/hub-innovacion-transformativa/tres-marcos-de-politica-de-innovacion-id/>

Singh, G., Sahare, H., & Deep, M. (2019). Recent Trends in Guava Propagation- A Review. *Biosciences Biotechnology*, 16(1), 143-154. <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/2732>

Sociedad de Agricultores de Colombia -SAC. (2021). Así es la hortofruticultura nacional. *Revista Nacional de Agricultura* (1018), 1. <https://sac.org.co/asi-es-la-hortofruticultura-nacional/>

Solarte, M., Melgarejo, L., Martínez, O., Hernández, M., & Fernández, J. (2014). Fruit quality during ripening of Colombian guava (*Psidium guajava* L.) grown at different altitudes. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 12(2), 669-675

Vergara, A., Rojas, J., y Garzón, C. (2021). Cultivos de interés comercial en el departamento del Atlántico periodo 2018-2020. *Dictamen Libre*, 29, 2019-233. <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.29.7865>



Vetroni, M., Salvador, R., De Francisco, A., & Piekarski, C. (2020). Mapping of research lines on circular economy practices in agriculture: From waste to energy. *Re-*

newable and Sustainable Energy Reviews, 131, 109958. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109958>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 12-12-2023

Fecha de aceptado: 06/05/2024

DOI: 10.22490/21456453.7569

CARACTERIZACIÓN MORFOAGRONÓMICA IN SITU DE CACAO NATIVO (*Theobroma cacao L.*) DE PUERTO ASÍS PUTUMAYO, COLOMBIA

IN SITU MORPHO-AGRONOMIC CHARACTERIZATION OF NATIVE CACAO (*Theobroma cacao L.*) FROM PUERTO ASÍS, PUTUMAYO, COLOMBIA

José Julián Apraez Muñoz¹

Gabriel Burgos Jiménez²

Emel John Burbano Ijaji³

¹ PhD. en Genética y biología molecular, docente Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
apraez.julian@udenar.edu.co

Gabriel Burgos Jiménez.

² Especialista en gerencia de proyectos, instructor SENA-Putumayo, Puerto Asís, Colombia.
gburgosj@sena.edu.co

Emel John Burbano Ijaji

³ Especialista en formulación y evaluación de proyectos de desarrollo social. Dinamizador
SENNOVA del SENA regional Putumayo.
emeljb@gmail.com

Citación: Apraez, J., Burgos, G., y Burbano, E. (2025). Caracterización morfoagronómica *in situ* de cacao nativo (*Theobroma cacao L.*) de Puerto Asís, Putumayo, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 81 - 102.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7569>

RESUMEN

Contextualización: El proyecto se llevó a cabo en el municipio de Puerto Asís, Departamento del Putumayo, enfocado en la caracterización fenotípica de caracteres morfo-agronómicos del *Theobroma cacao*. Este estudio es relevante debido a la ausencia de bancos de germoplasma y programas de fitomejoramiento en esta zona de la Amazonía colombiana. Las plantas evaluadas llevan más de 15 años establecidas, lo que permitió analizar su aclimatación a las condiciones locales.

Vacío de conocimiento: La región carece de bancos de germoplasma y programas de fitomejoramiento que permitan mejorar la productividad y conservación de los cultivares nativos de cacao, lo que limita el aprovechamiento de su potencial económico y la sostenibilidad de su uso.

Objetivos: El objetivo principal fue caracterizar fenotípicamente los cultivares nativos de cacao en Puerto Asís para crear una base de datos que sirva como fundamento para el establecimiento de un banco de germoplasma y el desarrollo de estrategias de conservación y fitomejoramiento, impulsando así el desarrollo económico de la región.

Metodología: Se evaluaron 48 variables divididas en cuatro estratos: hojas, flores, semillas y frutos, utilizando descriptores binomiales, multi-estado y cuantitativos como unidades básicas de caracterización. Para el análisis, se emplearon técnicas de clúster o conglomerados que permitieron identificar similitudes y diferencias entre los cultivares evaluados.

Resultados y conclusiones: El análisis reveló diferencias significativas entre los estratos y cultivares, identificando cultivares sobresalientes en términos de rendimiento y características fisiológicas. Se destacaron los cultivares 25, 26, 3, 14 y 13 en rendimiento, y las plantas 36, 31 y 18 en aspectos fisiológicos. Este estudio constituye el primer esfuerzo de caracterización de la agrobiodiversidad del cacao nativo en la región amazónica de Colombia, sentando las bases para programas de fitomejoramiento y conservación.

Palabras clave: conservación, descriptores, morfología, mejoramiento genético, variabilidad

ABSTRACT

Contextualization: The project was conducted in the municipality of Puerto Asís, Department of Putumayo, focusing on the phenotypic characterization of morpho-agronomic traits of *Theobroma cacao*. This study is particularly relevant due to the absence of germplasm banks and breeding programs in the region, which is located in the Colombian Amazon. The evaluated plants have been established for over 15 years, allowing the study of cultivar acclimation to local edaphoclimatic conditions.

Knowledge Gap: The region lacks germplasm banks and breeding programs that would enable the improvement of productivity and conservation of native cacao cultivars, limiting the potential economic development and sustainability of their use.

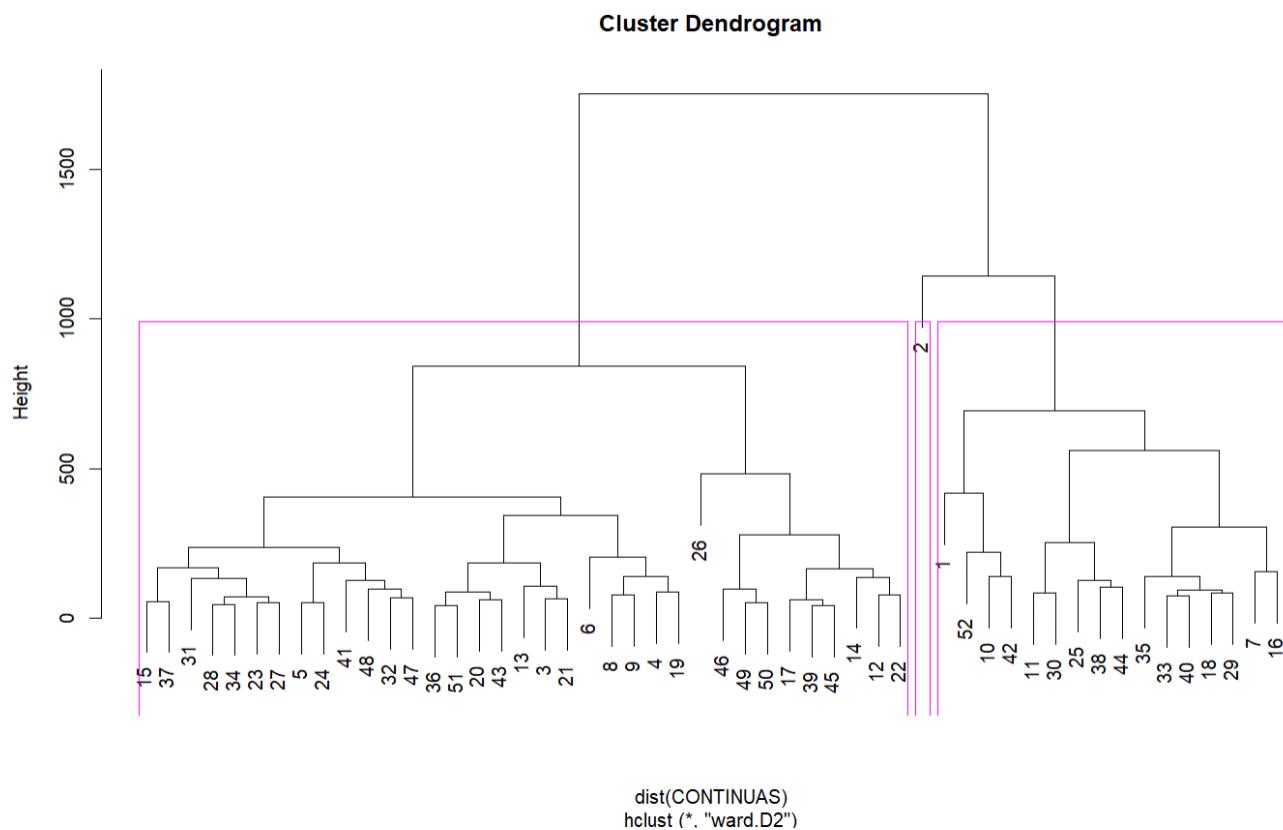
Objectives: The main objective was to phenotypically characterize the native cacao cultivars in Puerto Asís to establish a database for the creation of a germplasm bank and to develop conservation and breeding strategies aimed at promoting the region's economic development by utilizing high-yield cultivars.

Methodology: A total of 48 variables were evaluated, divided into four strata: leaves, flowers, seeds, and fruits. Each stratum used three types of descriptors as basic characterization units: binomial, multi-state, and quantitative. Cluster analysis techniques were applied to identify similarities and differences among the evaluated cultivars.

Results and Conclusions: The analysis revealed significant differences between strata and cultivars, identifying cultivars that excelled in terms of yield and physiological traits. Cultivars 25, 26, 3, 14, and 13 stood out in yield variables, while plants 36, 31, and 18 showed outstanding physiological characteristics. This study represents the first effort to characterize the agro-biodiversity of native cacao in the Colombian Amazon, providing a solid foundation for local germplasm bank creation and the development of breeding programs.

Keywords: conservation, descriptors, genetic improvement, morphology, variability

RESUMEN GRÁFICO



Análisis de conglomerados para las variables de naturaleza Cuantitativa

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Theobroma cacao L. (cacao), es una especie perenne perteneciente a la familia Malvaceae (Loor *et al.*, 2009; Aikpokpodion, 2010; Medina *et al.*, 2019) originaria de los

bosques tropicales húmedos de América del Sur de las regiones Amazonas y Orinoco (Medina *et al.*, 2019), siendo las áreas relacionadas a los ríos Napo, Putumayo y

Caquetá donde existe mayor variación de la especie (Loor *et al.*, 2009; Barón *et al.*, 2021). *T. cacao L.* es un cultivo tropical muy valioso, dado que sus semillas son la materia prima para la industria mundial de chocolates (Martínez, *et al.*, 2015), la producción de manteca y de cacao en polvo (Barón *et al.*, 2021), con aplicaciones en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Meneses *et al.*, 2023).

Tradicionalmente, *T. cacao L.* se ha clasificado en tres grupos genéticos principales: forastero, criollo y trinitario, siendo el último un híbrido entre los dos primeros (Loor *et al.*, 2009; Gardea *et al.*, 2017; Gopaulchan *et al.*, 2019; Fajardo *et al.*, 2022). La clasificación de estos grupos es en referencia a su origen geográfico: forastero, de la cuenca del Amazonas; criollo, de Centro y Suramérica; y trinitario, de Trinidad y Tobago (Orduña *et al.*, 2023).

Forastero se caracteriza por tener una superficie rugosa del fruto y mayor rendimiento de semillas (Orduña *et al.*, 2023) y es responsable de cerca del 95% de la producción mundial debido a su alta productividad como a su resistencia a enfermedades y plagas (Fajardo *et al.*, 2022). Criollo, se caracteriza por la piel suave de su fruto y la baja productividad de semillas. Trinitario es un híbrido (criollo × forastero) originado en Trinidad, que se da como resultado de la hibridación natural en fincas de cacao (Orduña *et al.*, 2023). En cuanto a calidad, criollo y trinitario producen “cacao fino o de sabor”, mientras que, forastero suele producir cacao a granel, básico u ordinario (Fajardo *et al.*, 2022).

T. cacao L. es cultivado en varios países del mundo donde reúnen las condiciones edafoclimáticas idóneas (20 ° de latitud Norte y 20 ° de latitud Sur), (Ballesteros *et al.*, 2015; Quevedo *et al.*, 2020), siendo el continente americano donde existe la mayor diversidad de cultivares de cacao con diferentes características (Quevedo *et al.*, 2020). En Colombia, los cultivares de cacao en los últimos años ha venido incrementando, ubicándose entre los diez primeros países productores (Cáceres *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2020), en parte debido a que el cultivo de cacao *T. cacao L.* es uno de los cultivos promovidos en el desarrollo de programas destinados a favorecer la paz en regiones en posconflicto, sustituyendo cultivos ilícitos como estrategia para combatir el narcotráfico, de ahí la importancia de la exacción agrícola del mismo.

Hasta el 2023 se reportaron 189 mil hectáreas sembradas, en donde los departamentos mayormente productivos son Santander, Antioquia, Nariño y Arauca; por lo cual, establecer este tipo de cultivos en zonas apartadas de la geografía colombiana se convierte en una iniciativa de alto impacto para el mercado (Medina *et al.*, 2019; Valencia *et al.*, 2022; Gil *et al.*, 2023). Sin embargo, se sabe muy poco sobre la riqueza de especies y el endemismo entre los cultivos silvestres del cacao en Colombia (Orozco *et al.*, 2020), pues a pesar de que en el país se han desarrollado industrias especializadas en la producción de *T. cacao L.*, en varias zonas productoras se sigue sembrando el material vegetal sin previa evaluación local (Cuellar *et al.*, 2013).

En Colombia, se reproducen diversidades de cultivares como lo son: CNCH12, CNCH-13, ICS-1, ICS-6, ICS-39, ICS-40, ICS-60, ICS-95, TSH-565, TSH-812, EET-8, EET-96, UF-650, SCC-61, FLE-2, FLE-3, FSA-11-FSA-13, FEAR-5, FTA-2, FSV-41, FEC-2, TCS-01, TCS-06, TCS-13, TCS-19, CCN-51 y selecciones del tipo criollo; dentro de estos, Compañía Nacional de Chocolates recomienda y destaca aquellos materiales autocompatibles, finos de aroma y sabor, como: CNCH-12, CNCH-13, ICS-1, FSV-41, TCS-19, TCS-01, FTA-2, FEAR-5. Al establecer estos clones por lotes o bloques se facilitan las labores como podas, cosecha, manejo de plagas y enfermedades, fertilización, entre otros. A pesar de esto, no hay conocimiento de cultivares nativos que estén caracterizados morfo agronómicamente (Gil *et al.*, 2023).

En Colombia, se han realizado estudios de caracterización morfoagronómica de *T. cacao L.* en los departamentos de Santander, Huila, Arauca (López *et al.*, 2021), y Caquetá (Cuellar *et al.*, 2013), pero en otras regiones la caracterización morfoagronómica aún es incipiente (Fajardo *et al.*, 2022), tal es el caso del Departamento del Putumayo donde investigaciones de caracterización morfoagronómica en cacao nativo *T. cacao L.* son escasas. Las características morfoagronómicas de vainas, semillas y flores se utilizan para evaluar las relaciones entre genotipos de cacao (Aikpokpodion, 2010; Kunikullaya *et al.*, 2018).

En el Departamento del Putumayo ubicado al sur de Colombia en la región biogeográfica de la Amazonía, el cacao fue un cultivo importante en la década de los setenta ocupando un lugar predominante en su economía, pero debido a la falta de presencia estatal y la fácil implementación de los cultivos ilícitos en la región, el cacao fue remplazado por dichos cultivos (Rodríguez, 2002), sin embargo, en el municipio de Puerto Asís, Putumayo es común encontrar pequeñas plantaciones o árboles en los predios rurales que han persistido por iniciativa de los agricultores putumayenses.

Es importante encontrar genotipos nativos en las zonas productoras para evitar su pérdida (Fajardo *et al.*, 2022), además, estos pueden ser utilizados en investigaciones futuras para programas de mejoramiento vegetal, dado que la caracterización morfoagronómica permite seleccionar los materiales vegetales nativos con características sobresalientes en producción, rendimiento y sanidad vinculada a la reacción a enfermedades, con potencial económico para la región. Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo determinar las características morfoagronómicas de cacaos nativos del municipio de puerto Asís del Departamento de Putumayo, Colombia, calificándolo en estratos (hojas, tallos, frutos) con el fin de establecer un clúster de caracterización.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de zonas a intervenir

Para esta etapa se desarrollaron varios conjuntos de datos como línea base de las fincas productoras de la región, teniendo en cuenta: vías de acceso, presencia de grupos armados, información de los productores, disponibilidad para ser incluidos dentro de la investigación y la edad de los cultivos, que en algunos casos superaban los 30 años de establecimiento. Se dio prioridad a los sitios que manifestaban esta información, estableciendo así un índice de selección en el cual

se daba mayor importancia a las variables mencionadas. Los índices fueron realizados con base en la metodología de Bravo (2022).

Localización

La fase de campo se llevó a cabo en predios rurales y urbanos del municipio de Puerto Asís, con una altitud promedio de 200 msnm, temperatura promedio de 26°C, precipitación anual promedio de entre 3.000 y 4.000 mm., y una evapotranspiración potencial de entre 1400 y 1600 mm (Plan de desarrollo municipal de Puerto Asís, 2020).

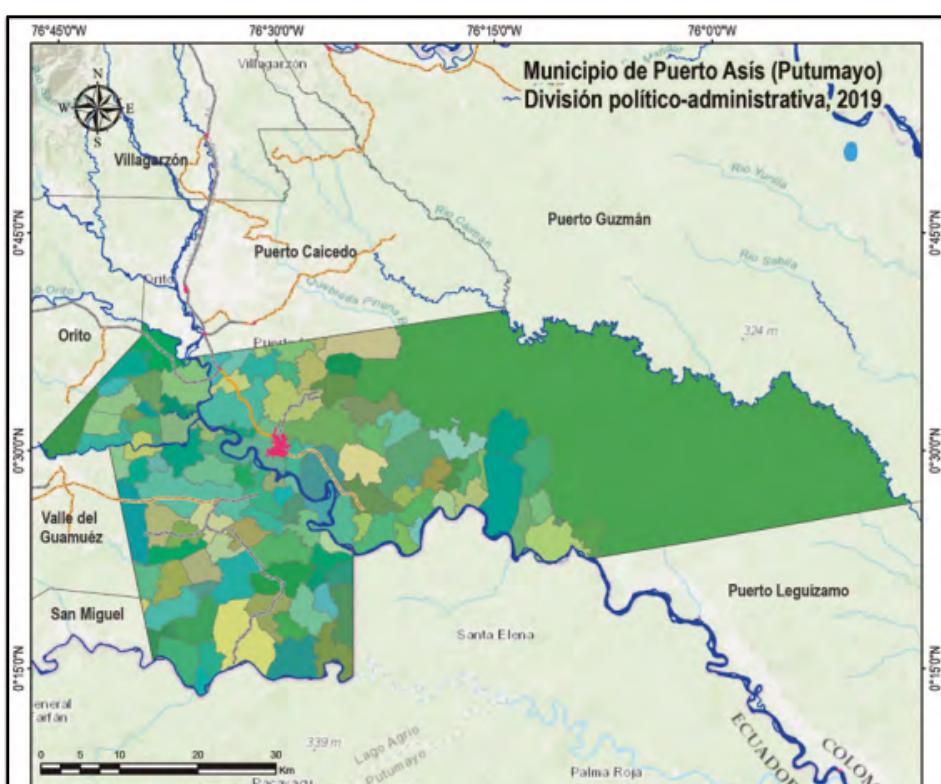


Figura 1. Distribución político administrativa del Municipio de Puerto Asís

Fuente: DANE-Divipola (2020) e IGAC (2021).

Fase laboratorio

Esta fase se desarrolló en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Biotecnología Vegetal del Centro Agroforestal y Acuícola Arapaima del SENA Regional Putumayo, ubicado en la Calle 19 A No. 23-57, en el municipio de Puerto Asís, Putumayo.

Recursos genéticos

Para esta fase se contó con el apoyo de agricultores, personal técnico de la federación nacional de cacaoteros y profesionales de la entidad aliada, con quienes se realizó el diligenciamiento del pasaporte de caracterización *in situ* de árboles de cacao nativo distribuidos en los predios ubicados en el municipio de Puerto Asís, Putumayo. Para tomar una muestra representativa, en la ruta de visita se incluyó: 100% de las inspecciones que conforman al municipio de Puerto Asís, para un total de 12; de cada inspección se visitaron el 40% de las veredas, para un total de 67; y de cada vereda se visitaron 5 fincas, para un total de 335.

Lo anterior se desarrolla de la siguiente manera: Inspección de Puerto Asís, 9 veredas, 45 fincas; Inspección Alto Danubio, 3 veredas, 15 fincas; Inspección Bajo Cuembí, 9 veredas, 45 fincas; Inspección de Caña Brava, 2 veredas, 10 fincas; Inspección de Puerto Vega, 7 veredas, 35 fincas; Inspección Alto Cuembí, 5 veredas, 25 fincas; Corregimiento Santana, 9 veredas, 45 fincas; Corregimiento Teyeyé, 6 veredas, 30 fincas; Corregimiento La Carmelita, 6 veredas, 30

fincas; Corregimiento de Piñuña Blanco, 6 veredas, 30 fincas; Corregimiento de Villa Victoria, 4 veredas, 20 fincas; y, Corregimiento Perla Amazónica, 1 vereda, 5 fincas.

Caracterización morfoagronómica

Se realizó mediante 56 descriptores propuestos por la Compañía Nacional de Chocolates–Grupo Nutresa (2108). Cada uno de estos descriptores constituirá una variable evaluada como se muestra en la Tabla 1. Esta metodología es una adaptación de la metodología establecida por Engels *et al.* (1980).

Análisis estadísticos

Para este estudio se utilizó un método que implicó los valores de las variables o descriptores morfoagronómicos, los cuales dependían de los cultivares muestreados en cada finca, al no contar con repeticiones de los cultivares se realizó un análisis de clúster basado en el modelo de clúster jerárquico *Hclust*, analizando los resultados obtenidos y dividiéndolos según la naturaleza de la variable, como se explica a continuación, con el programa *Rstudio* (González-Orozco y Pesca, 2022).

Análisis de correlación o de conglomerados

Todos los datos en este trabajo fueron establecidos y tratados de manera sistemática, concibiendo a cada planta y variable analizada como una Unidad Básica de Caracteri-

zación, la cual es la unidad básica de objeto (plantas de cacaos nativos). Dependiendo del propósito del estudio de caracterización, la UBC puede ser un individuo, una población silvestre, una línea o un híbrido (González, 2001).

Naturaleza de los datos

Para la realización del clúster en este estudio se calificaron los datos según las variables y valor que describen a cada una, con el fin de evaluar los índices de similitud y disimilitud que se utilizan dentro de las matrices estadísticas. Para ello, se dividió a cada una de las matrices en estratos: hojas, flores, frutos y semillas, que fueron los casos de estudio los cuales estuvieron sometidos a diversas variables de análisis.

Dentro de cada estrato, se dividió a las variables analizadas según su taxonomía numérica, es decir, según al tipo de valor y variable correspondiente, para ello definimos tres dentro de este estudio: variables doble estado (binarias), estos datos fueron clasificados

en relación con la variable analizada, la cual determina ausencia o presencia de cierto elemento evaluado dentro de los cacaos nativos, esta variable se clasifica como 0 y 1.

Variables multi-estado, en este caso los datos multiestado son aquellos de carácter cualitativo que presentan más de dos posibilidades de respuesta y que, a su vez, pueden o no tener secuencia lógica, o que cada uno de ellos posea una característica propia, para esto, en las variables cuyos datos tenga más de dos posibilidades por ejemplo el color, donde rojo = 1, amarillo = 2, azul = 3, entre otros; sin embargo, no se puede concluir que rojo es menor que azul, debido a que son diferentes pero no en orden o secuencia lógica. Variables cuantitativas, refiere a los datos cuantitativos, es decir, aquellos que pueden contarse y que son continuos (presentan cualquier valor real); generalmente, con una distribución normal e incluso algunos datos discretos pueden ser utilizados con un buen muestreo, pero mediante estadísticos de tendencia central para obtener normalidad, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1.

Caracterización de las variables según el estrato evaluado y la taxonomía de los datos

Nombre de la variable analizada	Estrato	Tipo de variable
Longitud Lamina Foliar	Hojas	
Ancho Lamina Foliar		
Longitud LBA		
Longitud del pecíolo de la hoja - mm		
Longitud del estaminodio - mm	Flores	
Longitud del ovario - mm		
Longitud del estílo - mm		
Longitud del fruto	Fruto	
Masa del fruto		
Ancho del fruto		
Grosor del surco primario		Cuantitativa
Grosor del surco secundario		
Grosor del lomo o caballete		
Profundidad del surco primario		
Profundidad del surco secundario		
Número de semillas integras/fruto		
Número de semillas vanas/fruto		
Masa húmeda/100 semillas		
Masa húmeda sin mucilago/100 semillas		
Masa seca/100 semillas		
Longitud	Semilla	
Grosor		
Diámetro		
Color de los brotes terminales	Hojas	
Antocianina en el limbo del pétalo	Flores	
Orientación de sépalos		
Antocianinas en la parte superior del ovario		
Color del fruto inmaduro	Fruto	
Color del fruto maduro		

Forma de la base de la hoja	Hojas	Multiestado
Forma del ápice de la hoja		
Pubescencias en brotes terminales		
Color del péndulo	Flores	
Antocianina en sépalos		
Antocianina en filamentos del estambre		
Color de la flor (antocianinas en sépalos)		
Antocianina en estaminodio		
Forma del ápice del fruto	Fruto	
Constricción basal del fruto		
Forma del fruto		
Rugosidad del fruto		
Intensidad de antocianina en lomos de fruto inmaduro		
Intensidad de antocianina en lomos del fruto maduro		
Intensidad de antocianina en surco primario:		
Separación entre pares de lomos		
Forma en sección longitudinal	Semilla	
Forma en sección transversal		
Color predominante de los cotiledones		

Fuente: adaptado de González-Orozco y Pesca (2022).

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar en las figuras 1, 2 y 3, el análisis de clúster nos permitió dividir a las plantas de cacaos nativos en 5 grandes grupos según las variables analizadas, el propósito es agrupar como también distribuir las plantas y las zonas en estos tres grandes grupos, permitiendo caracterizar de

manera homogénea a cada planta sometida al estudio.

Este análisis permitió reducir la información de la población entera en grupos más específicos para así poder entender la dinámica de la planta frente a cada ambiente de desa-

rrollo, logrando determinar sus similitudes y sus disimilitudes según sea la naturaleza de la variable estudiada, como lo menciona Ramos (2020), quien indica que esta forma de clasificación, que es determinada por variables obtenidas en campo, permite clasificar genotipos de la misma especie mediante criterios de selección determinados.

Es de esta forma que los factores evaluados en este estudio demostraron tener valores críticos en algunos materiales, pues al tratarse de cultivares demasiado antiguos y que no han tenido un método de manejo agro-nómico adecuado, lo cual concuerda con lo establecido por Bravo (2022) quien evaluó la distribución de cacaos nativos en la región de Arauca y encontró que los productores de esta zona al no tener los recursos económicos ni entidades que brinden asistencia, no se consideraba a dicho material vegetal como un cultivo de ganancia económica y, por ende, no es manejado como tal.

Análisis de clúster según la naturaleza de la variable

Posterior a la realización de este estudio, se pudieron determinar varias diferencias entre los cultivares de cacao estudiadas y las zonas en donde ellas se desarrollan, como muestran las figuras 1, 2 y 3. Una vez ter-

minado el análisis estadístico, se evidencia la creación de cinco grandes grupos en las variables de naturaleza, cuantitativa, binomial y multiestado. Por otra parte, la caracterización morfoagronómica realizada con las más de 60 variables permite considerar la evaluación de la planta dentro de los cuatro grandes estratos (hojas, flores, frutos y semillas), a su vez, la división de la planta en estratos facilita entender de mejor manera el comportamiento fisiológico de los cultivares de cacao.

Lo anterior, es mencionado por Villegas (2014) en sus estudios de caracterización, los cuales permitieron dar una referencia de las propiedades de las plantas influenciadas en varias comunidades aledañas partiendo de condiciones similares, pero desconociendo la procedencia de la semilla, encontrando así variación entre el desarrollo fisiológico que expresaban cada uno de los cultivares estudiados en las diversas comunidades colindantes. Sumado a esto, Bravo *et al.* (2021) demostró que existe un alto desconocimiento por parte de los cultivadores regionales respecto a la procedencia de la semilla, puesto que esta es obtenida de mercados locales o es otorgada, en algunos casos, por familiares o amigos, pero no tienen una trazabilidad de su origen.

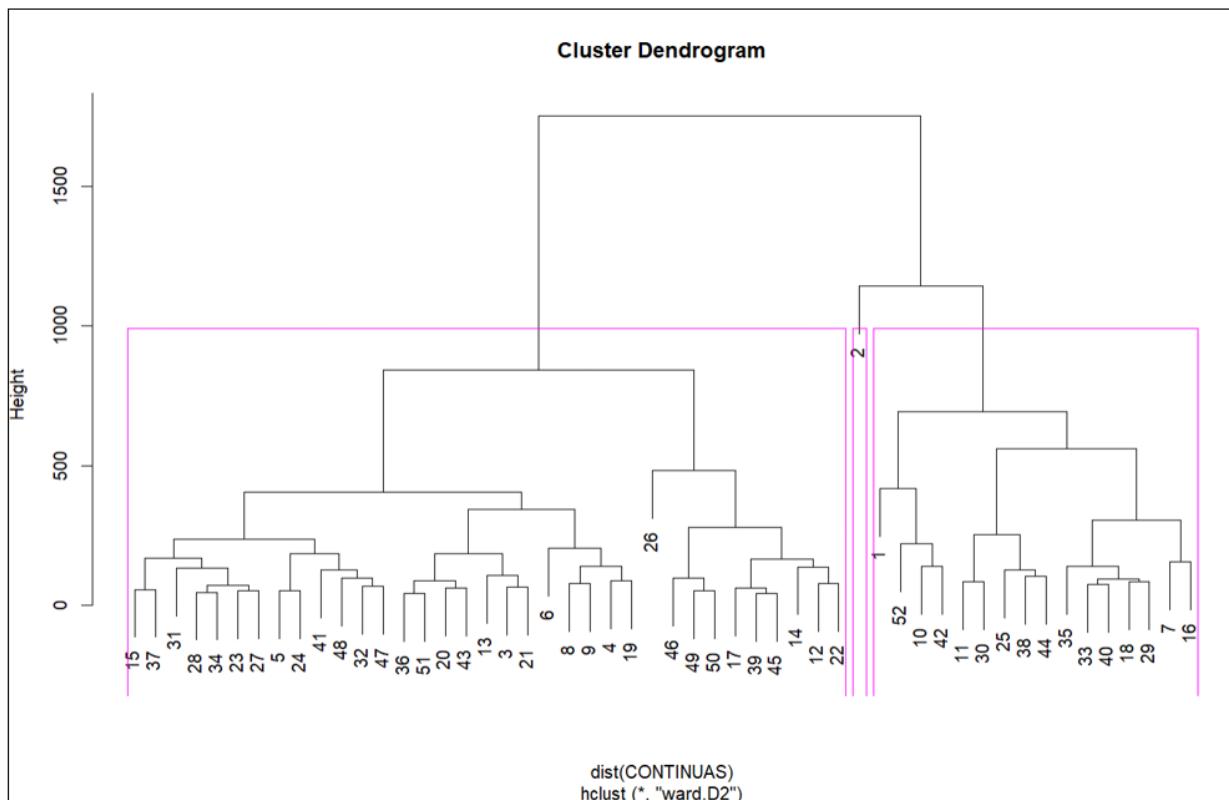


Figura 1. Análisis de conglomerados para las variables de naturaleza cuantitativa

Fuente: autores.

Variables cuantitativas

Como se puede observar en el Figura 1, las plantas 25, 26, 3, 19 y 13 presentan una alta variación entre los cultivares estudiados en la zona. Si bien todas pertenecen al mismo municipio, se puede evidenciar que estos cultivares presentaron valores más altos en el comportamiento morfo-fisiológico, lo que permite determinar características prometedoras para ser utilizadas como fuente de semilla, patrón o copa.

Este análisis permite resolver que las plantas mencionadas presentan valores mayores al promedio de los cultivares mencionados en variables como: longitud de hoja, ancho

de la hoja, longitud de pecíolo, masa del fruto, ancho fruto, número de semillas sanas, masa húmeda sin mucílago, masa seca de 100 semillas, longitud del fruto, diámetro y grosor del fruto, siendo estas variables altamente importantes cuando se trata de escoger genotipos superiores dentro de una misma zona de influencia, puesto que demuestran un desarrollo mayor ante condiciones edafoclimáticas similares, como ocurrió en este estudio.

Siguiendo esta misma idea, autores como Rodríguez-Medina *et al.* (2019), caracterizaron clones de cacao tanto molecular como morfológicamente, encontrando que variables fisiológicas, reproductivas, produc-

tivas y fitosanitarias deben ser la base para procesos de caracterización y selección en cultivares promisorios dentro de 11 comunidades de producción del cultivo, en este sentido, varios autores manifiestan que la caracterización del germoplasma *in situ* debe ir acompañada por la determinación de rasgos genéticos que permitan medir la variabilidad genética (Aranguren *et al.*, 2010; Núñez-Colín y Escobedo-López, 2014), es por ello que en una segunda fase de sus estudios utilizan marcadores moleculares que son fragmentos de ADN, los cuales pueden ser utilizados para analizar la diversidad y la detección de polimorfismos que diferencian cultivares entre sí.

En relación con la variable masa de frutos, los árboles mencionados oscilaban sus valores entre 482 y 633 g, los cuales están cercanos o superan el promedio, que estuvo en 490 g. Por esta razón, estos cultivares manifiestan varias similitudes entre sí, destacándose la planta 25, esta obtuvo el mayor valor que fue de 633g, este valor junto a varias variables estudiadas permite situar a esta planta con una consideración especial para ser tenida en cuenta en procesos de mejoramiento genético, puesto que su comportamiento es muy superior a otros cultivares nativos como lo reportan.

Rodríguez-Medina *et al.* (2019) quienes obtuvieron valores de peso de mazorca promedio de 297g, resultado que está muy por debajo a los obtenidos en esta investigación, estableciendo así un precedente de la importancia de estos cultivares locales, los cuales sin contar con métodos de manejo de cultivos adecuados y teniendo una edad entre los

20 años o más, aún siguen registrando buenos datos en relación al rendimiento. Estos resultados hacen que el cacao se convierta en una de las plantas con buena aclimatación en períodos largos de cultivo sin intervención o planes de manejo como lo manifiesta Rodríguez-Medina *et al.* (2019), quienes llegaron a demostrar que los cultivares antiguos pueden constituirse como fuente de semilla para procesos de mejoramiento genético, promoviendo así la paz en el posconflicto y la sustitución de cultivos ilícitos.

Cabe resaltar que las plantas que presentaron mejor comportamiento en el análisis de conglomerados también están por encima del promedio en variables del estrato hojas: ancho, largo, longitud de la lámina foliar; en la variable flores, en: longitud de pecíolo y longitud del ovario; en las variables del estrato fruto, en: el grosor, masa húmeda; y en el estrato semilla, en: el número de semillas integras, masa seca de 100 semillas, longitud y diámetro. Estos resultados se relacionan con lo reportado por Enríquez (2014), quien observó alta productividad en cacaos nativos ecuatorianos los cuales eran producidos por comunidades locales sin contar con un plan de fertilización o manejo del cultivo, lo cual se asemeja a este proyecto puesto que ninguna de las plantas utilizadas en este estudio recibía asistencia técnica o contaba con un plan de fertilización.

Dentro del proyecto de investigación se encontró diversidad en las formas de hojas y frutos, las cuales estaban caracterizadas por diámetros de ancho de la hoja con un promedio de 10,5 cm , y diámetros de frutos con valores promedio de 10,6 cm, estos

resultados concuerdan con lo reportado por Rodríguez-Medina *et al.* (2019) en donde los frutos oscilaron en diámetros entre 10 a 17 cm, estos autores comunican que la mayoría de cultivares, las cuales no tienen un plan de manejo adecuado, sufren de un estrangulamiento basal del fruto, así como cambios en formas del ápice y la superficie del mismo, también, presentan daños que están relacionados de manera directa por la falta de fertilización de elementos menores al momento del llenado del fruto, además de estos cambios físicos, estos pueden presentar colores variados de la mazorca, sobresaliendo el color amarillo (del mismo modo que ocurrió en este estudio).

En el caso del número de semillas, el cual en este estudio el promedio estuvo en las 38 semillas por fruto, algunos autores como García (2009) mencionan que genotipos de cacao como CCN51 presenta valores cercanos a las 42 semillas por fruto, mientras que el híbrido ICS95 presenta valores por debajo de los 30 semillas por fruto. En tal sentido, este estudio permite determinar ciertas tendencias a los orígenes de los cultivares en algunas de las variables evaluadas, y dichas variables morfológicas de las semillas observadas son características de cada cultivar, las cuales se reflejan en las características productivas de estos cacaos.

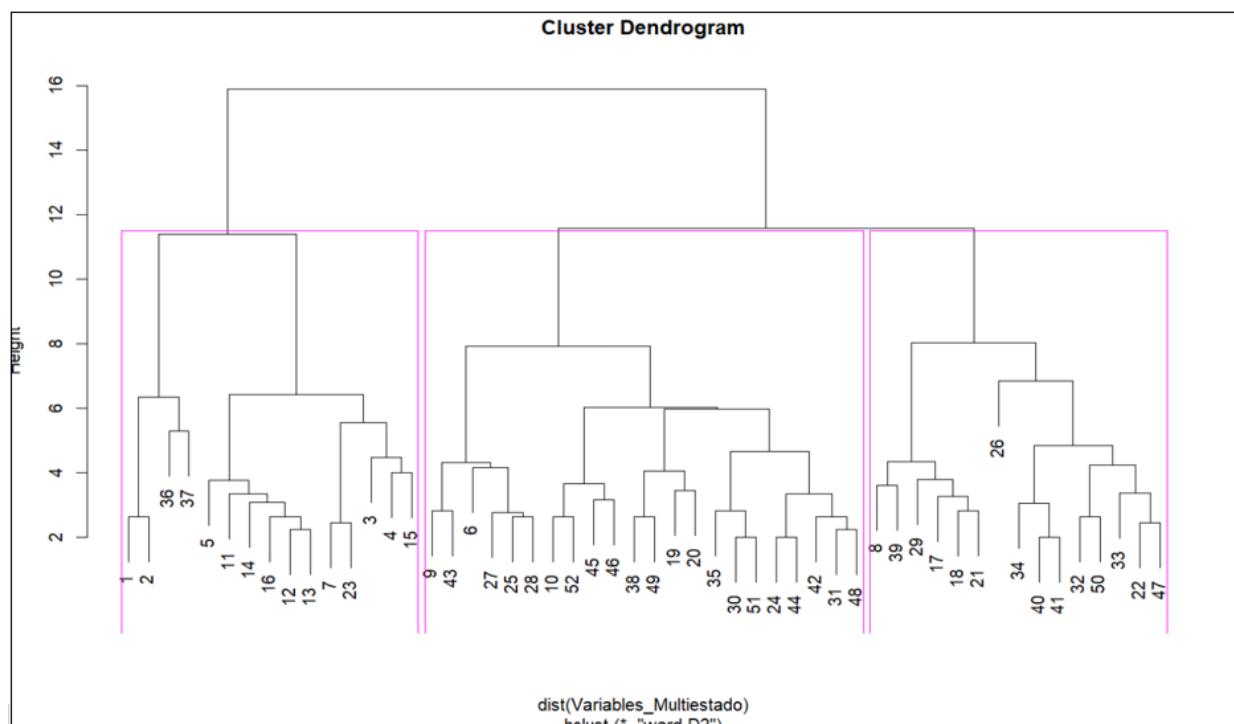


Figura 2. Análisis de conglomerados para las variables de naturaleza multi-estado

Fuente: autores.

Variables multi-estado

Como se puede observar en el Figura 2, la tendencia a formar cinco grandes grupos se sigue presentando como en las variables cuantitativas que se relacionan en el Figura 1, sin embargo, para estas variables que presentan la misma naturaleza de datos, el conglomerado solo resalta 3 en particular, plantas 36, 31 y 18, estas plantas se destacan del resto de los cultivares evaluados puesto que manifiestan coloraciones en hojas, flor y fruto, separándolas del promedio de los cultivares que hacen parte de este estudio, estos cambios fenotípicos son llamativos, pues aunque se desconoce el origen genético de cada una de las plantas evaluadas, la mayoría se comportan de manera similar y es por ello que se puede hablar de plantas genéticamente estables en las variables estudiadas, sin embargo, Rodríguez-Medina, *et al.* (2019) manifiesta que si bien se conocen solo tres tipos de cacao, criollo, forastero y trinitario, las características agronómicas de los híbridos dependen del ambiente en el que se desarrollan, resultando en caracteres de alta plasticidad a lo largo del tiempo del cultivo.

Los cultivares observados en este estudio manifestaron características morfológicas similares, salvo los tres mencionados en el párrafo anterior, dichas características fisiológicas y morfológicas son de clara importancia dentro del estudio como también del reconocimiento de mejores características para procesos de selección, puesto que establecen rasgos particulares de un individuo, los cuales deben ser utilizados para su clasificación y diferenciación dentro de planes de

mejoramiento genético como lo manifiesta Aranguren *et al.* (2010).

Ejemplo de lo anterior es que para realizar una clasificación cuando se carece de métodos moleculares se debe recurrir a métodos morfológicos confiables, como fue el caso de esta investigación al utilizar una guía taxonómica propia de planes de mejoramiento anteriormente establecidos y exitosos, estos planes junto con los análisis estadísticos de conglomerados permiten observar la similitud y diferenciación entre grupos cercanos de plantas dentro de una misma zona.

Tal como se establece en la guía publicada por la UPOV en el 2011, en la cual realizaron caracterizaciones de germoplasma acompañada por la determinación de variables genéticas que permiten determinar el comportamiento de los diversos cultivares en zonas similares. Si bien este estudio es una base fundamental para la caracterización de cultivares nativos en el Departamento del Putumayo, se deben realizar análisis de marcadores moleculares que por sí solos o combinados permiten la determinación de la diversidad genética y la detección de polimorfismos.

Como se realizó en los estudios de Azofeifa-Delgado (2016), los estudios de los polimorfismo son de bastante relevancia para la realización de planes de mejoramiento genético cuando se cuenta con cultivares de una misma zona de los cuales no se tienen datos anteriores, como ocurrió en esta investigación, puesto que dichos marcadores muestran diferencias evolutivas que permiten una mayor diferenciación desde el punto de vista filogenético y taxonómico de los

individuos de estudio (Avendaño-Sánchez *et al.*, 2015; Quijada *et al.*, 2017).

Dentro de las variables más regulares se encontraron: el contenido de antocianina, forma del fruto y forma de sección transversa de la semilla. Estas fueron variables en las cuales todos los cultivares presentaron el mismo patrón en los cultivares estudiados, frente a esto autores como Rodríguez-Medina *et al.* (2020) mencionan comportamientos similares en dichas variables, además de otras como el color de la pulpa, de las cuales determinaron que son rasgos que no permiten la diferenciación entre cultivares para su identificación y caracterización.

En el caso de la coloración de los frutos, estudios reportados por García en (2009) presentan pocas variaciones en la coloración y mencionan que en los cultivares nativos sobresalen la coloración de cacaos criollos en relación a los diversos híbridos que existen en el mercado, lo mismo se observa tanto en el color de los cotiledones, dichas variables coinciden con los resultados de este estudio en donde predominó el color criollo (amarillo) de las plantas estudiadas y donde no hubo cambios en los colores cotiledonales dentro de las 52 plantas seleccionadas para el desarrollo de esta investigación.

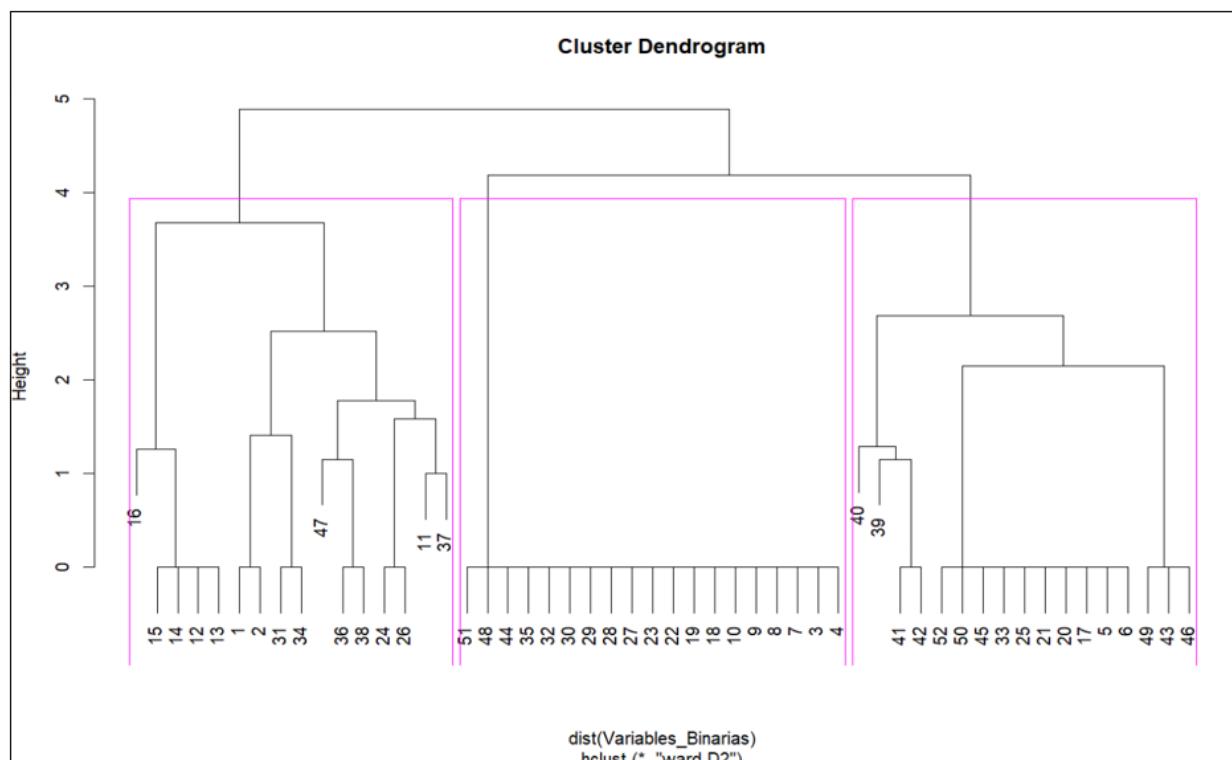


Figura 3. Análisis de conglomerados para las variables de naturaleza binaria

Fuente: autores.

Variables binarias

Como se puede observar en el Figura 3, las plantas que presentan comportamientos superiores o distintivos a las demás evaluadas son las 47, 49, 48, 43, 42, 41, 40 y 39, si bien las dos primeras crean una subdivisión principal o diferenciada, estadísticamente las otras mencionadas presentan valores de similitud muy cercanos, cabe resaltar que al analizar este tipo de variables de ausencia y presencia no se formaron los 5 grandes grupos como sí ocurrió con las variables cuantitativas y las variables multi-estados, esto demuestra que dentro de dichas variables de estudio se presentó mayor concordancia de los datos en relación a las mencionadas.

Si bien en el Departamento del Putumayo se cuenta con una diversidad edafoclimática entre la zona alta y baja, el municipio de Puerto Asís presenta valores muy similares a lo largo de todo su territorio, es por ello por lo que su diversidad biológica no varía tanto de un lugar a otro, como se demuestra en el dendrograma de los sitios de recolección de variables de cada una de las plantas.

En consecuencia, se vuelve necesario la realización de este tipo de estudios que permiten tener una noción clara de las diversidades que existen entre los productores de cacao de una misma zona, debido a la procedencia desconocida de la semilla cultivada este tipo de análisis permiten la conservación y multiplicación de germoplasmas sobresalientes en futuros planes de mejoramiento genético, los cuales son escasos o nulos en la zona debido a que la agricultura se trabaja de manera empírica, es por ello que con el obje-

tivo de incrementar la calidad de los cacaos así como la promoción de buena prácticas de manejo agronómico que sean sostenibles, se hace necesario comenzar con una clasificación de la variabilidad con la que se cuenta como preámbulo de planes más estrictos y metodológicos de investigación genética.

Así lo mencionan autores como Botero y Arias (2018), quienes realizaron caracterizaciones de los rasgos fenotípicos más distintivos de cultivares de cacao y determinaron que el fenotipo se define como el conjunto de rasgos que son observables, medibles y cuantificables, ya sean morfológicos o fisiológicos, además, que dichos rasgos son influenciados por el ambiente específico en donde se desarrollen; señalando también que analizarlos permite hacer un mapeo de la distribución del cultivo y de la semilla con la que se cuenta, como ocurrió en este estudio, donde se puede observar que si bien se desconoce la procedencia de la semilla, se encuentran genotipos muy similares así como cultivares muy diferentes entre sí, pese a desarrollarse bajo la misma influencia edafoclimática.

Del mismo modo, Avendaño *et al.* (2014) manifiestan que los rasgos fenotípicos empleados para distinguir los cacaos criollos de otros tipos son: el color del cotiledón, color de brotes, antocianinas, color del fruto maduro e inmaduro, mismas variables que fueron estudiadas en esta investigación y las cuales arrojaron los resultados que se muestran en el conglomerado.

No obstante, son pocas las características fenotípicas que se relacionan en este estudio, por lo tanto, se sugiere continuar con una

segunda fase que sea de análisis genético, el cual permita determinar el grado de similitud molecular, abarcando diversas variables poligénicas que posibiliten hacer una caracterización aún más detallada que permita la clasificación de cada uno de los cultivares estudiados y así poder correlacionarlas con este estudio. Con loq que se tiene un mapa de distribución de cultivares predominantes en el departamento, lo que facilita desarrollar planes de manejo, mejoramiento y producción del cultivo de cacao, acorde a las necesidades y condiciones ambientales de la zona.

Los resultados de las diferentes variables estudiadas si bien se prestan para crear 4 y 5 grupos en donde se tiene varios cultivares con comportamientos promisorios, permiten dilucidar el estado actual del material vegetal con el que cuenta el departamento y el cual puede constituirse como una fuente de recursos genéticos para procesos de mejoramiento del cultivo en la zona, ya que, la mayoría lleva más de 20 años de sembrado en cada una de estas fincas y, en otros casos, presentan mayor edad.

Al no contar con un plan de manejo aún demuestran tener un potencial productivo interesante, estos resultados están acordes con varios estudios realizados, en este sentido, en zonas de la geografía colombiana, en donde autores como Aranguren *et al.* (2018) demuestran que las variedades vegetales nativas contienen características diferenciales fisiológicas, morfológicas y genotípicas, de allí radica la importancia de ser caracterizadas estableciendo los rasgos principales de cada individuo o población.

Por otro lado, Quijada *et al.* (2017) manifiestan que el estudio de intra e interpolaciones de cacaos nativos demuestran diferencias evolutivas lo cual permiten obtener información filogenética y taxonómica de los individuos. Del mismo modo, la construcción de clúster o dendrogramas, se constituye en una herramienta fundamental para determinar las distancias y agrupaciones estadísticas en métodos filogenéticos, con el fin de determinar las relaciones de parentesco y diferencias entre cada cultivar en procesos de selección (Kumar *et al.*, 2018).

4 CONCLUSIONES

El proyecto de caracterización fenotípica de caracteres morfoagronómicos permitió describir y clasificar los materiales nativos del *T. cacao* en 52 fincas del municipio de Puerto Asís, ubicado en el Departamento de Putumayo, para ello se analizaron en total 48 variables y se dividió a las plantas en 4 estratos para su análisis: hojas, flores, semillas y frutos, dentro de cada estrato se

midieron 3 tipos de descriptores, que fueron utilizados como unidades básicas de caracterización para variables de tipo: binomial, multi-estado y cuantitativas.

Posterior al análisis de clúster o conglomerados obtenidos se pudieron evidenciar diferencias entre los estratos al igual que diferencias estadísticas entre los diversos cul-

tivares, lo cual garantiza un punto de partida fundamental para el establecimiento de un banco de germoplasma propio de la región, puesto que se evaluaron plantas de más de 15 años de su establecimiento; por lo tanto, este material vegetal propicia el desarrollo de nuevos conocimientos sobre la aclimatación de estos a diversas condiciones edafoclimáticas en la región.

Lo anterior, permite desarrollar estrategias de conservación de dichos cultivares y propicia el desarrollo de programas de fito-

mejoramiento, los cuales son escasos en la región, estableciendo a este estudio como el primero en caracterización de material vegetal nativo en el cultivo de cacao en la zona amazónica colombiana, lo cual constituye una herramienta de selección de cultivares como material vegetal, que tiene como objetivo ser utilizado como semilla con fines de promover el cultivo en la zona, mitigando así la ampliación de la frontera agrícola de los cultivos ilícitos, el cual es un problema latente en la región.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

José Julián Apraez Muñoz: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original y logística. **Gabriel Burgos Jiménez:** adquisi-

ción de recursos, administrador del proyecto, supervisión, metodología, investigación.

Emel John Burbano Ijají: logística y recolección de datos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este manuscrito dan sus agradecimientos al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), regional Puerto Asís, por el apoyo en la realización de este proyecto, así como al grupo de Investigación Arapaima, del mismo centro y al grupo de

Investigación en Recursos Naturales y Sistemas Agroforestales de la Universidad de Nariño, junto a todos los actores que contribuyeron en el desarrollo del mismo.

FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue financiado gracias al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) mediante el sistema de Investigación y Desarrollo Tecnológico y de Innovación de SENNOVA, SGPS-SIPRO con código SGPS-11403-2023.

LITERATURA CITADA

Aikpokpodion, P. O. (2010). Variation in agro-morphological characteristics of cacao, *Theobroma cacao L.*, in farmers' fields in Nigeria. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 38(2), 157-170. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2010.488786>

Aranguren-Díaz, Y. C., Varani, A. M., Michael, T. P., & Miranda, V. F. O. (2018). Development of microsatellite markers for the carnivorous plant *Genlisea aurea* (Lentibulariaceae) using genomics data of NGS. *Molecular Biology Reports*, 45(1), 57-61. <https://doi.org/10.1007/s11033-017-4140-1>

Aranguren, Y., Briceño, A., & Fermin, G. (2010). Assessment of the variability of Venezuelan guava landraces by microsatellites. *Acta Horticulturae*, 849, 147-154. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.849.16>

Avendaño-Sánchez, M., Espinoza-Velázquez, J., Gutiérrez-López, A., Flores-Gallegos, A. C., y Rodríguez-Herrera, R. (2015). Secuencias nucleotídicas de la región ITS en familias S. y PL de maíces

poliembriónicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(3), 509-521. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n3/v6n3a6.pdf>

Avendaño, C., Cueto, J., Mendoza, A., López, P., Sandoval, A., & Aguirre, J. (2014). *Graphic Handbook for Description of Cacao Varieties (Theobroma cacao L.)*. Instituto de investigación forestales, agrícolas y pecuarias.

Azofeifa-Delgado, Á. (2016). Uso de marcadores moleculares en plantas; aplicaciones en frutales el trópico. *Agronomía Mesoamericana*, 17(2), 221-241. <https://doi.org/10.15517/am.v17i2.5163>

Ballesteros, P. W., Lagos, T. C., & Ferney, H. (2015). Morphological characterization of elite cacao trees (*Theobroma cacao L.*) in Tumaco, Nariño, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(2), 313-328. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4187>

Barón, E. J., Zarate, D. A., Castañeda, G. A., Cuarán, V. L., y Passarelli, L. M. (2021). Micromorfología y ultraestructura de las

anteras y los granos de polen en diez genotipos élite de *Theobroma cacao* (Malvaceae). *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 403-421. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i2.44711>

Botero, K., y Arias, T. (2018). Uso de las ciencias ómicas para el mejoramiento genético de cultivos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 64-78. <https://doi.org/10.22267/rcia.183502.92>

Bravo, D., León-Moreno, C., Martínez, C., Varón-Ramírez, V., et al. (2021). The first national survey of cadmium in cacao farm soil in Colombia. *Agronomy*, 11, 11-18.

Bravo, D. (2022). Bacterial cadmium-immobilization activity measured by isothermal microcalorimetry in cacao-growing soils From Colombia. *Frontiers in Environmental Sciences*, 10, 910234. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.910234>

Cáceres, P. F. F., Vélez, L. P., Junca, H., & Moreno-Herrera, C. X. (2021). *Theobroma cacao* L. agricultural soils with natural low and high cadmium (Cd) in Santander (Colombia), contain a persistent shared bacterial composition shaped by multiple soil variables and bacterial isolates highly resistant to Cd concentrations.

Current Research in Microbial Sciences, 2, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100086>

Cuellar, C. A., Rodríguez, D. F., Rodríguez, L. C. H., Torres, P. N., Tobón, Y. M., y Guzmán, M. N. (2013). Variabilidad morfagrönómica de 50 materiales promisorios de tres especies de *Theobroma* (Malvaceae) en condiciones de la amazonía colombiana. *Revista Colombia Amazónica*, 6, 123-145.

Engels, J. N., Baterley, B. G., & Enríquez, G. (1980). *Cacao descriptors, their states and modus operandi*. Turrialba. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0779e02.pdf#page=82>

Enríquez, G. (2014). Cacao orgánico, guía para productores ecuatorianos. *Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Manual 54*.

Fajardo, J. G. B., Téllez, H. B. H., Atuesta, G. C. P., Aldana, A. P. S., & Arteaga, J. J. M. (2022). Antioxidant activity, total polyphenol content, and methylxantine ratio in four materials of *Theobroma cacao* L. from Tolima, Colombia. *Heliyon*, 8(5), e09402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09402>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 09-02-2024

Fecha de aceptado: 09/06/2024

DOI: 10.22490/21456453.7651

OPTIMIZACIÓN DE PROTOCOLO DE ESTABLECIMIENTO *in vitro* DE *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts. (Magnoliaceae) COMO UNA HERRAMIENTA DE CONSERVACIÓN

OPTIMIZATION THE *in vitro* ESTABLISHMENT PROTOCOL OF *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts. (Magnoliaceae) AS A CONSERVATION TOOL

Diana Milena Avendaño Torres¹

Elberth Hernando Pinzón-Sandoval²

¹ M.Sc. Fisiología Vegetal, Grupo GIPSO, Facultad de Ciencias Agropecuarias,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
diana.avendano@uptc.edu.co

² M.Sc. Fisiología Vegetal, Grupo GIPSO, Facultad de Ciencias Agropecuarias,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
elberth.pinzon@uptc.edu.co

Citación: Avendaño, D., y Pinzón-Sandoval, E. H. (2025). Optimización de protocolo de establecimiento *in vitro* de *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts. (Magnoliaceae) como una herramienta de conservación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 103 - 122. <https://doi.org/10.22490/21456453.7651>

RESUMEN

Contextualización: el magnolio de arcabuco (*Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts), es una especie categorizada en peligro de extinción, que presenta deficiencias en la propagación sexual debido a la baja producción de frutos y semillas, esto genera una alta vulnerabilidad de las poblaciones naturales existentes a eventos de extinción. Las técnicas para el cultivo de tejidos *in vitro* son una alternativa eficaz para la propagación de especies amenazadas que requieren estrategias concretas para su conservación.

Vacío de conocimiento: en la actualidad no se cuenta con un protocolo que genere las condiciones óptimas que permitan la desinfección y establecimiento *in vitro* de *Magnolia arcabucoana*.

Propósito: establecer y optimizar un protocolo para la desinfección y establecimiento *in vitro* de yemas vegetativas como una herramienta de conservación para *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts.

Metodología: se evaluó un protocolo de desinfección, un protocolo de agentes inhibidores de fenoles y un protocolo de establecimiento, a través de diseños experimentales

completamente aleatorizados (DCA), empleando las metodologías existentes según el tipo de protocolo.

Resultados y conclusiones: se obtuvo que concentraciones de 1 g L^{-1} de CA (carbón activado) + $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de AA (ácido ascórbico) incluidas en el medio de cultivo y solución de AA al 25 % p/v durante 15 minutos, controlaron en un 67,7 % la oxidación fenólica y la necrosis de las yemas. El mejor tratamiento de desinfección se logró con inmersión por tres minutos en una concentración de 0,8 % de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. En la fase de establecimiento el mayor crecimiento de las yemas se consiguió con Woody Plant Medium (WPM) con 1 mg L^{-1} de BAP (6-Bencilaminopurina) + $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ de ANA (ácido naftalenacético). La brotación se obtuvo 105 días después del establecimiento en el medio WPM con 3 mg L^{-1} de BAP. Los resultados constituyen un aporte para el establecimiento *in vitro* de *Magnolia arcabucoana* con fines de conservación.

Palabras clave: biotecnología, medios de cultivo, organogénesis directa, oxidación fenólica

ABSTRACT

Contextualization: The magnolio of arcabuco (*Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts) is a species categorized as endangered, which presents deficiencies in sexual propagation due to low fruit and seed production. This generates high vulnerability of existing natural populations to extinction events. *In vitro* tissue culture techniques are an effective alternative for the propagation of threatened species that require specific strategies for their conservation.

Knowledge gap: Currently, there is no protocol available that generates the optimal conditions to allow for the disinfection and *in vitro* establishment of *Magnolia arcabucoana*.

Purpose: Establishing and optimizing a protocol for the disinfection and *in vitro* establishment of vegetative buds can serve as a conservation tool for *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts).

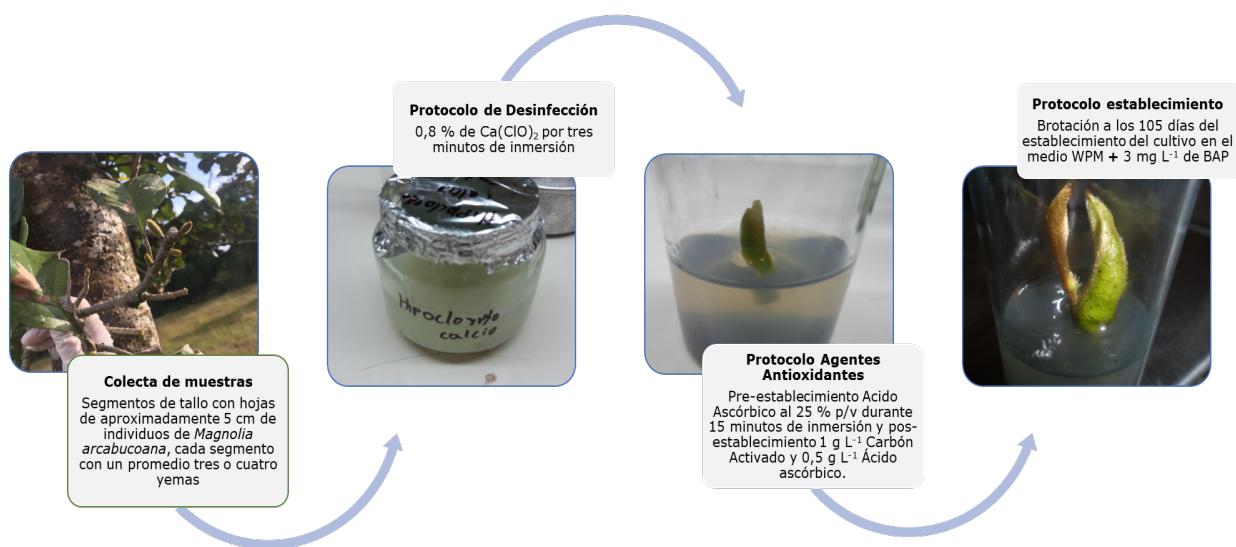
Methodology: A protocol for disinfection, a protocol for phenol inhibitors, and a protocol for establishment were evaluated through completely randomized experimen-

tal designs (CRD), using existing methodologies according to the type of protocol.

Results and conclusions: It was found that concentrations of 1 g L^{-1} of activated carbon (CA) + 0.5 g L^{-1} of ascorbic acid (AA) included in the culture medium and a 25% w/v AA solution for 15 minutes controlled phenolic oxidation and bud necrosis by 67.7%. The best disinfection treatment was achieved with a three-minute immersion in a 0.8% concentration of $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. In the establishment phase, the highest bud growth was obtained with Woody Plant Medium (WPM) containing 1 mg L^{-1} of BAP (6-Benzylaminopurine) + 0.05 mg L^{-1} of NAA (Naphthaleneacetic acid). Sprouting occurred 105 days after establishment in WPM medium with 3 mg L^{-1} of BAP. These results constitute a contribution to the *in vitro* establishment of *Magnolia arcabucoana* for conservation purposes.

Keywords: biotechnology, culture medium, direct organogenesis, growth regulators, phenolic oxidation

RESUMEN GRÁFICO



Protocolo optimizado de las etapas de desinfección y establecimiento *in vitro* de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El Magnolio de Arcabuco (*Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts), es una especie endémica de Colombia, se puede encontrar en la cordillera Oriental entre Santander y Boyacá y al oriente de Cundinamarca; su distribución comprende un rango altitudinal entre 2000 y 2250 m.s.n.m, las poblaciones se encuentran separadas por más de 60 km de distancia, por su distribución se encuentra en los Santuarios de Fauna y Flora (SFF) de Guanentá Alto Río Fonce e Iguaque y en el Parque Nacional Natural (PNN) Chingaza (Calderón *et al.*, 2014). Esta espe-

cie esta categorizada en peligro (EN), esto implica que el taxón se enfrenta a un riesgo de extinción alto en su estado de vida silvestre (IUCN, 2022).

La especie pertenece a la familia Magnoliaceae, constituida por árboles y arbustos distribuidos en bosques templados y tropicales del sudeste y este de Asia, América del Norte, las Antillas, América Central y del Sur, con mayor riqueza en el Neotrópico (Rivers *et al.*, 2016; Palmarola *et al.*, 2020; Restrepo-Cossio *et al.*, 2024). La familia está

conformada por 350 especies (Aguilar-Cano *et al.*, 2018; Chávez-Cortázar *et al.*, 2021; Guzmán-Díaz *et al.*, 2022), de estas cerca del 70% se encuentran con alguna categoría de amenaza (Gutiérrez-Lozano *et al.*, 2020). Las magnoliáceas presentan un patrón de distribución gregario, con un bajo número de individuos, siendo aquello característico de especies con requerimientos ambientales estrictos (Hernández *et al.*, 2020); a causa de factores antrópicos como la ampliación de la frontera agrícola, la ganadería y la deforestación (Serna-González y Velásquez-Ruiz, 2017; Avendaño *et al.*, 2022), se genera una disminución del flujo genético, baja producción de frutos y baja regeneración natural por semillas, aumentando drásticamente la vulnerabilidad de las poblaciones a eventos de extinción (Gutiérrez-Lozano *et al.*, 2020; Serna-González *et al.*, 2022)

Colombia cuenta con la mayor diversidad de Magnolias del Neotrópico, teniendo un total de 40 especies (Serna-González *et al.*, 2022), de estas, 32 especies son endémicas (Vázquez-García *et al.*, 2017; Rodríguez-Duque *et al.*, 2023). El 95 % de las especies endémicas tienen alguna categoría de amenaza de extinción debido principalmente a: la fragmentación y degradación de los hábitats, distribución geográfica restringida, poblaciones reducidas y aisladas, aprovechamiento no sostenible de las maderas y dificultades de propagación natural (Serna-González y Velásquez-Ruiz, 2017; Serna-González *et al.*, 2022).

La biotecnología vegetal y las técnicas para el cultivo de tejidos *in vitro*, son una alternativa eficaz para la propagación de especies amenazadas que requieren estrategias

concretas para su conservación (Coelho *et al.*, 2020; Kulak *et al.*, 2022). En el caso de las magnoliáceas se han aplicado técnicas como organogénesis directa, empleando medios de cultivo como Murashige y Skoog modificado (MS), concentración media de Murashige y Skoog ($\frac{1}{2}$ MS) o Woody Plant Medium (WPM), más la adición de reguladores de crecimiento como 6-bencilaminopurina (BAP), ácido naftalenacético (ANA) o ácido giberélico (GA_3) principalmente (Cui *et al.*, 2019; Kang *et al.*, 2020) obteniendo resultados positivos. Sin embargo, para que el método de propagación *in vitro* sea exitoso deben ajustarse a los limitantes endógenos y exógenos de cada especie (Luo *et al.*, 2023).

En el establecimiento *in vitro* de plantas leñosas, incluidas especies de la familia Magnoliaceae, como limitante endógena se han reportado problemas asociados a la secreción de polifenoles oxidados que afectan la viabilidad del explante (Azofeifa-Delgado, 2008). Los principales compuestos fenólicos que se han observado son el magnolol y el honokiol (Lee *et al.*, 2011), que liberados durante el proceso de establecimiento *in vitro* constituyen unas de las principales limitantes (Parris *et al.*, 2012). Dentro de las limitantes exógenas se tiene el estrés oxidativo o nitratos, el cual puede estar relacionado principalmente por el efecto abrasivo del agente desinfectante aplicado durante la asepsia del explante, el tipo de corte realizado, la formulación del medio de cultivo, los niveles de luz o incluso la acumulación de etileno en el frasco debido a la forma de sellado, la producción de radicales libres y procesos de oxidación de membranas celulares (Hernández y González, 2010; Wojtanica *et al.*, 2020).

Por esta razón, se recomienda el uso de soluciones que contengan antioxidantes como el ácido ascórbico (AA) o absorbentes como el carbón activado (CA), como también, reducir la duración del proceso de escisión y de esterilización del explante al igual que la sustitución o disminución de las concentraciones y tiempos de inmersión en el agente desinfectante (Ahmad *et al.*, 2013; Amente y Chimdessa, 2021).

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de la investigación fue optimizar un protocolo para la desinfección y el establecimiento *in vitro* a partir de yemas vegetativas para la especie *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts, como contribución en la propagación y conservación de esta especie en peligro de extinción y endémica de Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y colecta de muestras

La colecta de muestras vegetales de individuos de *M. arcabucoana* se realizó en el

municipio de Moniquirá, vereda Ajizal, predio El Rubí, localizado en la zona de amortiguación del Parque Regional Natural Serranía del Peligro (PNR) y en el municipio de Arcabuco, sector Peñas blancas (Figura 1).

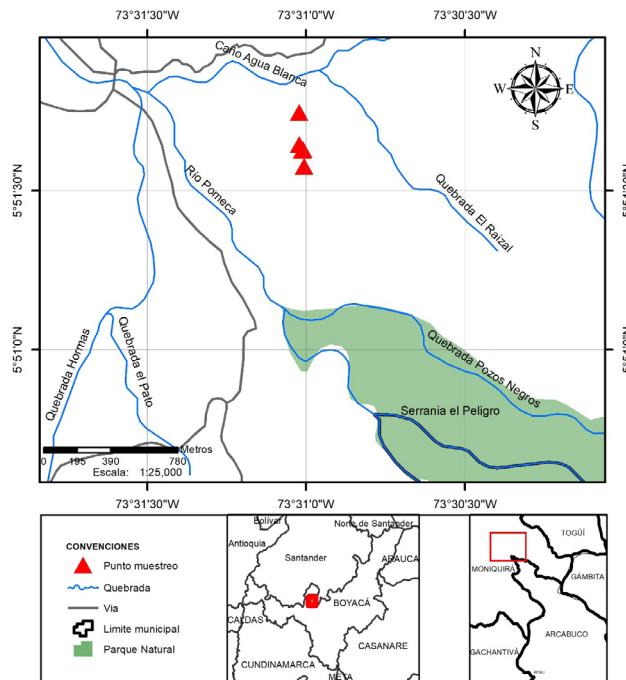


Figura 1. Mapa de localización puntos de colecta de muestras

Fuente: autores.

Los trámites para obtener los permisos de colecta se realizaron durante el año 2020, a través de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), mediante el formulario FGP-73, documentos con los cuales se abrió el expediente PEFI-00002-20 al que se adjuntó el formato FGP-75. Se obtuvo el permiso a través de la resolución No. 2197 del 04 de diciembre de 2020 y concepto técnico CR- 0005-2020.

Se tomaron segmentos de tallo con hojas de aproximadamente 5 cm de individuos adultos, cada segmento con un promedio tres o cuatro yemas, los explantes se transportaron en frascos de 100 ml que contenían una solución al 25 % p/v de ácido ascórbico (AA), hasta el laboratorio de Biotecnología Vegetal de la secretaría de Agricultura de la Gobernación de Boyacá, en donde se realizaron los ensayos de la fase de laboratorio.

Para todos los protocolos se hizo acondicionamiento del material vegetal siguiendo la metodología descrita por Cardozo *et al.* (2017) con modificaciones. Se realizó lavado de los explantes con agua corriente por 10 minutos, luego se sumergieron en solución de detergente comercial 1 g L⁻¹ y jabón líquido 10 ml L⁻¹ por 10 minutos, se enjuagó y agitó de manera constante hasta eliminar el detergente, posteriormente, se llevó a cabo reducción a cada explante, eliminando la base lignificada de cada yema, por último, se lavaron en agua destilada y fueron reservados en frascos de 100 ml con solución antioxidante de ácido ascórbico al 25 % p/v, luego, se llevaron a la cámara flujo laminar para continuar el proceso de desinfección. Tanto para el protocolo de desinfección como

para el protocolo de agentes antioxidantes, la selección de los tratamientos se basó en ensayos previos con mayor número de concentraciones y tiempos de inmersión (datos no presentados), tomando como criterio el porcentaje de viabilidad de los explantes.

Protocolo de desinfección

Para la desinfección superficial de los explantes se realizó un lavado con alcohol etílico al 70% por 30 segundos, seguido de una desinfección con solución de hipoclorito de calcio (Ca(ClO)₂) y diferentes tiempos de inmersión, el proceso se realizó en cámara de flujo laminar. Se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, el primer factor correspondió a las concentraciones de Ca(ClO)₂ (0,6 %, 0,8 %, 1,0 % y 1,2 %) y el segundo factor al tiempo de inmersión (1 min, 3 min y 5 min), con un resultado de 12 tratamientos y un tratamiento de control sin desinfección, con seis repeticiones, para un total de 78 unidades experimentales.

Protocolo agentes antioxidantes

Se estableció un protocolo para la inhibición de la oxidación por fenoles pre-establecimiento. Para lo cual se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, el primer factor correspondió a concentraciones de 5 %, 15 % y 25 % de ácido ascórbico (AA) y el segundo factor a tiempos de inmersión de 10, 15 y 20 minutos aplicados al explante después de realizar el proceso de desinfección y antes de la siembra, dando un resultado de nueve tratamientos y un control,

con tres repeticiones, para un total de 30 unidades experimentales. Se tomaron datos de necrosis Eliminar: en el medio de cultivo y viabilidad cada tres días durante 21 días.

Para establecer el protocolo para la inhibición de la oxidación por fenoles en el establecimiento, se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial en el que el primer factor correspondió a concentraciones de 0,2, 0,5 y 1 g L⁻¹ de Carbono activado (CA) y el segundo factor a concentraciones de 0,2 g L⁻¹ y 0,5 g L⁻¹ de ácido ascórbico (AA) aplicadas al medio MS sin hormonas, para un resultado de seis tratamientos y un control, con tres repeticiones, teniendo un total de 21 unidades experimentales. Se tomaron datos de oxidación por fenoles en el medio de cultivo y viabilidad cada tres días durante 21 días.

Protocolo establecimiento

Se sembraron yemas desinfectadas en medios Woody Plant Medium (WMP), Murashige y Skoog modificado (MS) y concentración media de Murashige y Skoog (½ MS) con las siguientes concentraciones de reguladores de crecimiento: 1 mg L⁻¹ de BAP + 0,05 mg L⁻¹ de ANA (Kang *et al.*, 2020)(MS; 2 mg L⁻¹ de BAP + 0,1 mg L⁻¹ de ANA + 2 mg L⁻¹ de GA₃ (Cui *et al.*, 2019) y 3 mg L⁻¹ de BAP (Cardozo *et al.*, 2017). Una vez realizada la siembra en recipientes de vidrio con 20 ml de medio, se incubaron en un cuarto de crecimiento con temperatura de 24±2 °C,

bajo fotoperiodo de 12 horas luz, con lámparas de luz blanca a una intensidad lumínica de 2000 lux aproximadamente. Para la evaluación se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, con nueve tratamientos más un control, con seis repeticiones por tratamiento, para un total de 60 unidades experimentales. Se tomaron datos cada siete días durante 77 días, evaluando las variables de contaminación, necrosis del explante, oxidación de fenoles en el medio de cultivo, viabilidad y longitud de los explantes.

Para todos los ensayos la contaminación se registró como cero en caso de no presentarse y uno en caso de presentarse, ya sea por hongos o bacterias los cuales fueron identificados por caracteres macroscópicos, la necrosis en el explante se evaluó de acuerdo con las siguientes categorías: uno, si el explante presenta entre el 1 % y 25 % del tejido necrosado; dos, si el explante presenta entre el 26 % y 50 % del tejido necrosado; tres, si el explante presenta entre el 51 % y 75 % del tejido necrosado; y cuatro, si el explante presenta entre el 76 % y 100 % del tejido necrosado. La oxidación se evaluó de acuerdo con las siguientes categorías: uno, si el medio de cultivo presenta entre el 1 % y 25 % de oxidación fenólica; dos, si el medio presenta entre el 26 % y 50 % de oxidación fenólica; tres, si el medio presenta entre el 51 % y 75 % de oxidación fenólica; y cuatro, si el medio presenta entre el 76% y 100% de oxidación fenólica. La viabilidad se determinó

como cero (no viable) si hay contaminación y la necrosis o la oxidación son mayores de tres, y uno (viable) si no hay contaminación y si la necrosis y la oxidación son menores o iguales a dos.

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis exploratorios de los datos, debido al no cumplimiento del supuesto de normal distribución del error en todas las variables de respuesta, se realizó análisis mediante la prueba no paramétrica

Kruskal Wallis ($p<0,05$) y prueba post hoc de comparación múltiple de tratamientos por medio del criterio de diferencia menos significativa de Fisher y ajuste del valor p por el método de Dunn-Bonferroni, esto mediante el paquete estadístico “Agricolae” del software R Core Team (2022).

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Protocolo de desinfección

Se observó una tendencia de disminución del porcentaje de contaminación a medida que aumentó la concentración de Ca(ClO)_2 , sin embargo, esto ocasionó un aumento del porcentaje de oxidación y necrosis (Figura 2). La concentración de 0,8% de Ca(ClO)_2 y tres minutos de inmersión fue el mejor tratamiento con un porcentaje de viabilidad del 66,7 % de explantes viables a los 21 días del establecimiento, con una contaminación del

23,3 %, una necrosis del explante del 33,4 % y una oxidación del 11,2 % (Figura 2).

No fue posible controlar la oxidación y la necrosis de las yemas al 100%, probablemente debido a la respuesta de otras variables no controladas en este estudio tales como tamaño del explante o la acumulación de etileno en el recipiente (Azofeifa-Delgado, 2008; Cuba-Díaz *et al.*, 2014), o a factores asociados con la naturaleza del explante como la edad fisiológica y su capacidad regenerativa (Cui *et al.*, 2019).

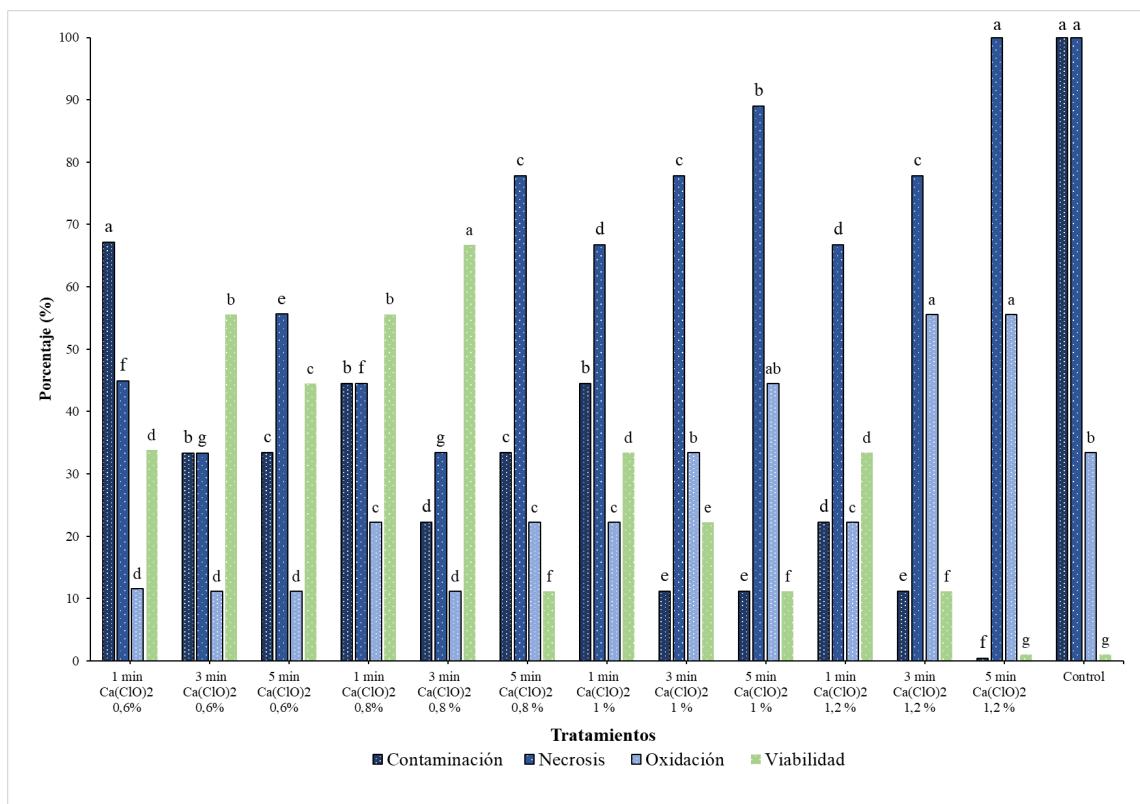


Figura 2. Porcentaje de viabilidad, contaminación, necrosis y oxidación de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana*, sometidas a diferentes concentraciones de Hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) y tiempos de inmersión, a los 21 días del establecimiento. Letras diferentes en cada serie indican diferencias significativas según el método de Dunn-Bonferroni ($p \leq 0,05$)

Fuente: autores.

En relación con el protocolo de desinfección, autores como Kang *et al.* (2020) indican que la oxidación por fenoles y la necrosis del explante, más que en la contaminación, fueron determinantes en el número de explantes viables por tratamiento, a medida que aumentó la oxidación y la necrosis, la viabilidad de las yemas disminuyó. De acuerdo con Radomir (2012), el uso de hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) al 6 % por 20 minutos para la desinfección de meristemos con uno o dos primordios foliares tomados de yemas apicales o axilares de *Magnolia stellata* (Siebold y Zucc.) Maxim., fue adecuado.

Durante los ensayos previos realizados en el presente estudio (datos no publicados), concentraciones superiores a 1,5 % de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ y 10 minutos de inmersión, causaron 100 % de necrosis y 0 % de viabilidad de yemas.

El desarrollo de este limitante está estrechamente relacionado al estrés oxidativo y nitrosativo que sufren las células del explante cultivado *in vitro*, principalmente a causa del agente desinfectante (Azofeifa-Delgado, 2008). Los EROS (especies reactivas de oxígeno) y/o ERN (especies reactivas de nitrógeno), generados en el proceso de des-

infección, son capaces de oxidar varios componentes celulares y pueden conllevar a una destrucción oxidativa de la célula (Amente y Chimdessa, 2021).

Protocolo agentes antioxidantes

La inhibición de la oxidación por fenoles pre-establecimiento se obtuvo con la apli-

cación de una solución de ácido ascórbico (AA) al 25 % p/v durante 15 minutos de inmersión (tratamiento T8), este presentó un porcentaje de viabilidad de yemas del 66,7 % y una necrosis del 33,3 % frente al tratamiento testigo en el que se presentó una necrosis el 100% (Figura 3).

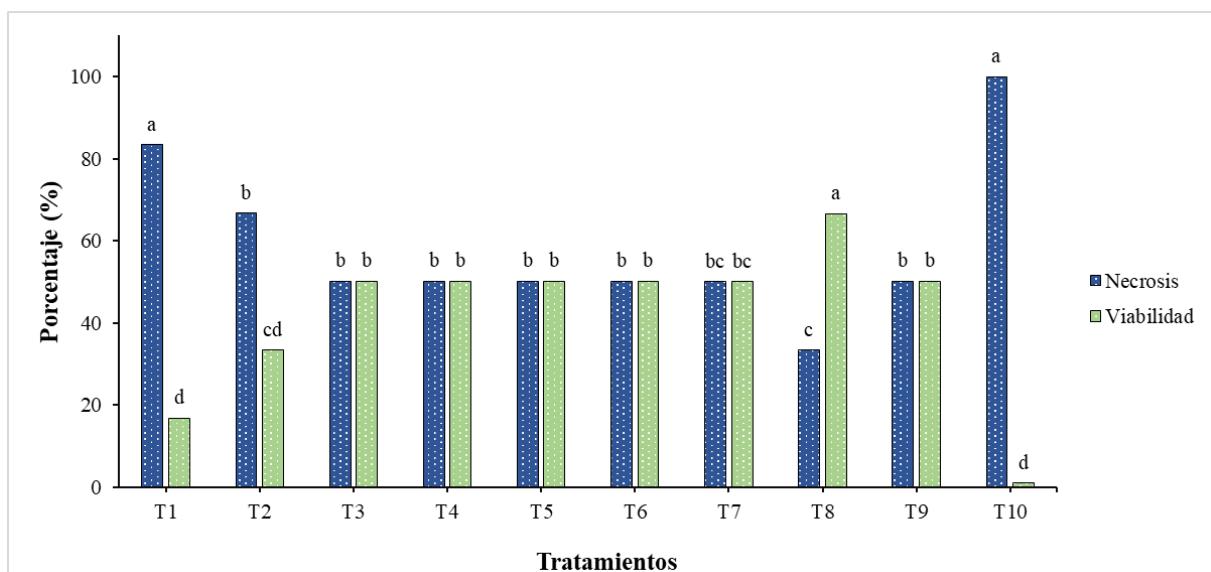


Figura 3. Porcentaje de necrosis y viabilidad de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana*, sometidas a diferentes concentraciones de ácido ascórbico y tiempos de inmersión, a los 21 días del establecimiento. Letras diferentes en cada serie indican diferencias significativas según el método de Dunn-Bonferroni ($p \leq 0,05$). AA: ácido ascórbico; tiempo de inmersión: min: T1: 5 % AA, 10 min; T2: 5 % AA, 15 min; T3: 5 % AA, 20 min; T4: 15 % AA, 10 min; T5: 15 % AA, 15 min; T6: 15 % AA, 20 min; T7: 25 % AA, 10 min; T8: 25 % AA, 15 min; T9: 25 % AA, 20 min; T10: Control 0 % AA, 0 min

Fuente: autores.

Al analizar la inhibición de la oxidación por fenoles en el establecimiento, se observó que el tratamiento T6, correspondiente a la aplicación de 1 g L^{-1} de carbón activado (CA) y $0,5\text{ g L}^{-1}$ de AA en el medio de cultivo, presentó una viabilidad de yemas del 66,7 % y

un porcentaje de oxidación por fenoles en el medio de cultivo del 33,3 %. Los demás tratamientos presentan porcentajes mayores de oxidación y menor viabilidad de las yemas (Figura 4).

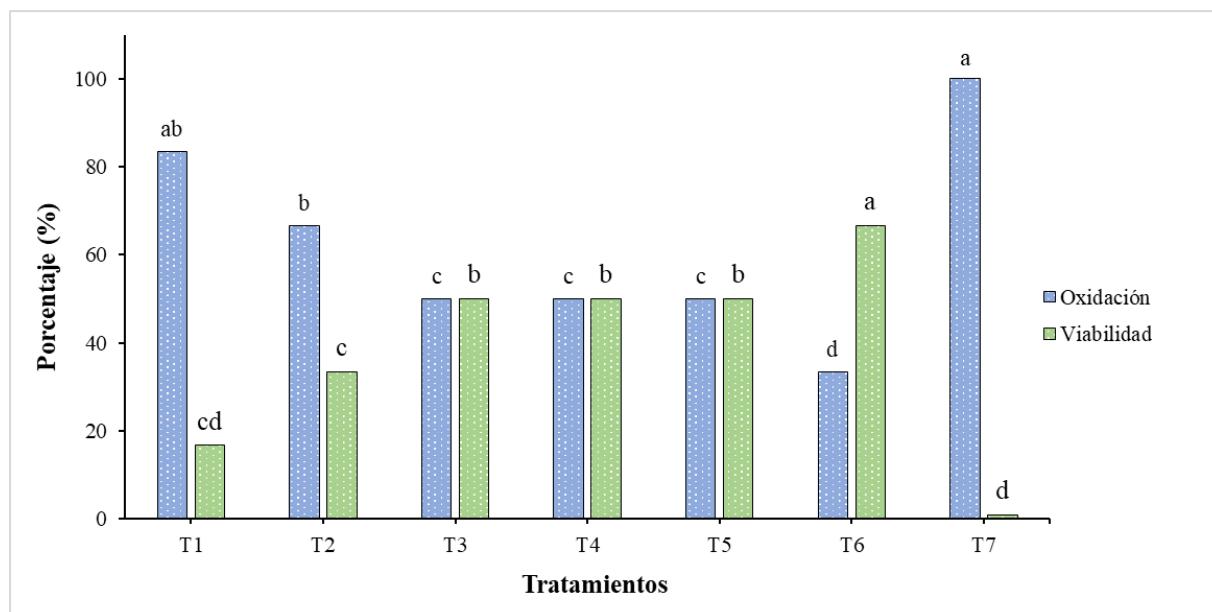


Figura 4. Porcentaje de oxidación y viabilidad de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana*, sometidas a diferentes concentraciones de carbón activado y ácido ascórbico en el medio de cultivo, a los 21 días del establecimiento. Letras diferentes en cada serie indican diferencias significativas según el método de Dunn-Bonferroni ($p \leq 0,05$, DMS: 3,68). CA: carbón activado; AA: ácido ascórbico: T1: $0,2\text{ g L}^{-1}$ CA + $0,2\text{ g L}^{-1}$ AA; T2: $0,2\text{ g L}^{-1}$ CA + $0,5\text{ g L}^{-1}$ AA; T3: $0,5\text{ g L}^{-1}$ CA + $0,2\text{ g L}^{-1}$ AA; T4: $0,5\text{ g L}^{-1}$ CA + $0,5\text{ g L}^{-1}$ AA; T5: 1 g L^{-1} CA + $0,2\text{ g L}^{-1}$ AA; T6: 1 g L^{-1} CA + $0,5\text{ g L}^{-1}$ AA; T7: control 0 CA g L^{-1} AA 0 g L^{-1}

Fuente: autores.

De acuerdo con Amente y Chimdessa (2021) el uso de antioxidantes en la preparación del explante para su cultivo o aplicados en el medio de cultivo, tales como carbón activado (CA), polivinilpolipirrolidona (PVPP) o ácido ascórbico (AA), son unas de las estrategias para minimizar la oxidación fenólica,

la cual se deriva de estrés oxidativo. El CA (carbón activado) presenta una red fina de poros con una gran superficie interna en la que se pueden adsorber diversas sustancias, en los cultivos de tejidos *in vitro* se ha usado para absorber la exudación fenólica y la acumulación de exudado oscuro (Tho-

mas, 2008; Poniewozik *et al.*, 2022). Con la adición de CA al medio de cultivo es posible remover compuestos fenólicos evitando o disminuyendo el deterioro del explante (Pedroza, 2009; Díaz-Lezcano *et al.*, 2021).

Así, Parris *et al.* (2012) indican que microbrotes de *Magnolia 'Ann'* propagada en medios de cultivo que contenían 1 g L⁻¹ de CA, produjeron hojas más verdes y mayor longitud de los brotes en comparación con medios en ausencia de CA, esto indica que la eliminación de sustancias nocivas puede mejorar el crecimiento de la planta. La presencia de sustancias fenólicas en el medio de cultivo, liberadas por el explante, tiene un efecto autocatalítico, por esta razón, la remoción o dispersión de las mismas se considera un método de control efectivo (Amente y Chimdessa, 2021)

El ácido ascórbico (AA) actúa en reacciones de secuestro de especies reactivas de oxígeno (oxígeno singuete, superóxido, radical hidroxilo) y en la reducción de radicales libres, frenando las reacciones en cadena y previniendo daños a las membranas celulares (Blokhina *et al.*, 2003). Las fenolasas oxidan a los orto-difenoles y flavonoides presentes en las células vegetales, dando lugar a orto-quinonas de color oscuro. En presencia de ácido ascórbico, estas orto-quinonas se reducen a fenoles y no tiene lugar el pardeamiento o necrosis del tejido (Maestro y Borja, 1993). Sin embargo, Cardozo *et al.* (2017) indican que no siempre es suficiente la adición de este compuesto ya que son variadas las causas asociadas a la oxidación por fenoles, por esto, dependiendo de la especie se deberá hacer uso de uno o varios agentes

inhibidores de fenoles, en diferentes concentraciones y tiempos de inmersión para el cultivo *in vitro* de Magnolias.

De acuerdo con Azofeifa-Delgado (2008), concentraciones de 0,005 % hasta 1 % de AA aplicadas en solución a los explantes, fueron suficientes para controlar la necrosis en especies como *Cynodon transvaalensis* Burtt Davy, *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reissek, *Musa textiles* (Née), *Psidium guajava* L. y *Ruscus hypophyllum* L. Sin embargo, en el presente protocolo el mayor porcentaje de viabilidad (66,7 %) de yemas vegetativas de *M. arcabucoana* se obtuvo con solución de AA al 25 % p/v, la cual es una concentración muy superior a lo indicado, esto posiblemente se debió al alto contenido fenólico reportado para especies de la familia Magnoliaceae (Borah *et al.*, 2017).

Protocolo de establecimiento

De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis, se presentan diferencias significativas entre los medios de cultivo y las concentraciones de los reguladores de crecimiento aplicadas a yemas de *M. arcabucoana* en el establecimiento *in vitro*. El tratamiento T1, que corresponde al medio WPM adicionado con 1 mg L⁻¹ de 6-Bencilaminopurina (BAP) + 0,05 mg L⁻¹ de ácido naftalenacético (ANA), generó el mayor crecimiento en longitud de las yemas con un valor de 9,5 mm (Figura 5).

Se obtuvo un mayor crecimiento de las yemas de *M. arcabucoana* en los medios WPM en comparación con los medios MS y ½ MS (Figura 5). El medio MS tiene ma-

iores concentraciones de macronutrientes que el medio WPM, esto es adecuado para la mayoría de las plantas, sin embargo, las especies leñosas responden mejor al medio WPM (Abdin *et al.*, 2017), esto puede deberse a que para algunas plantas leñosas el

uso de medios reducidos en sales minerales y baja cantidad de nitrógeno genera mejores resultados que la utilización de un medio altamente salino y nitrogenado como el MS (Araújo *et al.*, 2021).

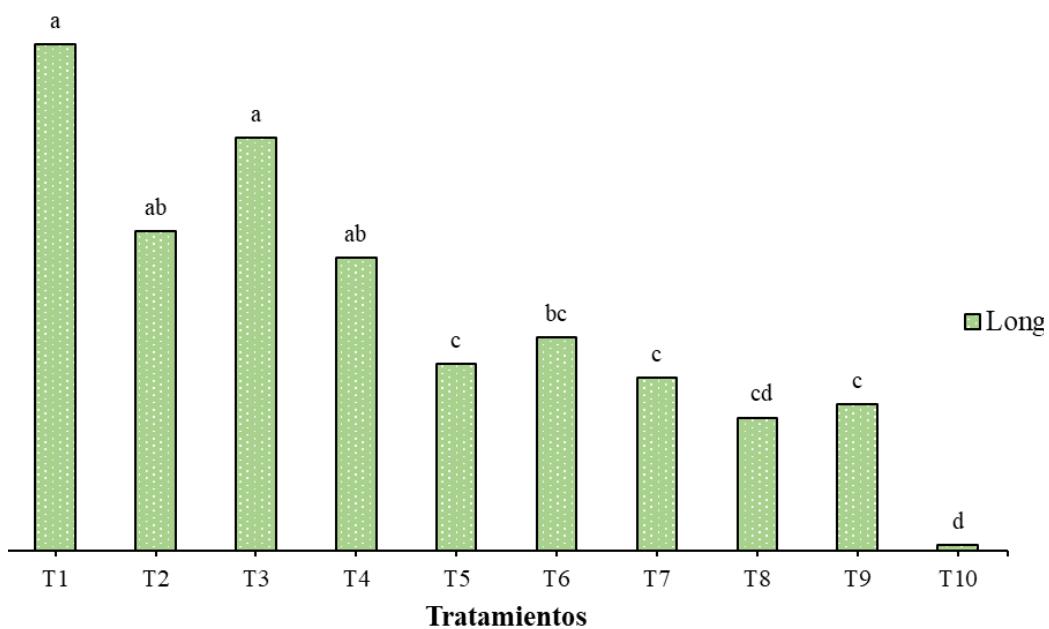


Figura 5. Crecimiento en milímetros de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana*, sometidas a diferentes concentraciones de reguladores de crecimiento y medios de cultivo, a los 77 días del establecimiento. Letras diferentes indican diferencias significativas según el método de Dunn-Bonferroni ($p \leq 0,05$, DMS: 9,37). WPM: Woody Plant Médium; $\frac{1}{2}$ MS: concentración media de Murashige y Skoog; MS: Murashige y Skoog modificado; BAP: 6-N-Bencilaminopurina; ANA: ácido α -naftalenacético; GA₃: ácido giberélico. T1: WPM + 1 mg L⁻¹ BAP + 0,05 mg L⁻¹ ANA; T2: WPM + 2 mg L⁻¹ BAP + 0,1 mg L⁻¹ ANA + 2 mg L⁻¹ GA₃; T3: WPM + 3 mg L⁻¹ de BAP; T4: MS + 1 mg L⁻¹ BAP + 0,05 mg L⁻¹ ANA; T5: MS + 2 mg L⁻¹ BAP + 0,1 mg L⁻¹ ANA + 2 mg L⁻¹ GA₃; T6: MS + 3 mg L⁻¹ de BAP; T7: $\frac{1}{2}$ MS + 1 mg L⁻¹ BAP + 0,05 mg L⁻¹ ANA; T8: $\frac{1}{2}$ MS + 2 mg L⁻¹ BAP + 0,1 mg L⁻¹ ANA + 2 mg L⁻¹ GA₃; T9: $\frac{1}{2}$ MS + 3 mg L⁻¹ de BAP; T10: Control + 0 mg L⁻¹ BAP + 0 mg L⁻¹ ANA + 0 mg L⁻¹ GA₃.

Fuente: autores.

En relación al protocolo de establecimiento, Kang *et al.* (2020) indican que el medio modificado de Murashige y Skoog adicionado con 1 mg L⁻¹ BAP y 0,05 mg L⁻¹ de ANA generó una tasa de inducción de brotes al 95,5% en el establecimiento *in vitro* de *Magnolia lucida* (B.L. Chen y S.C. Yang) V.S. Kumar. No obstante, para el establecimiento de *M. arcabucoana* fue efectiva la combinación de reguladores de crecimiento y concentraciones, mas no el medio, ya que el medio WPM fue en el que se observaron los mejores resultados (Figura 5). Esto puede explicarse debido a que la respuesta *in vitro* de las especies de Magnolias es de tipo genotípo-específica, esto implica que los regulares de crecimiento, los agentes inhibidores de fenoles o los medios de cultivo a pesar de ser los mismos, deberán probarse dosis y con-

centraciones específicas para cada especie (Sokolov *et al.*, 2014; Borah *et al.*, 2017; Wojtania *et al.*, 2020).

En estudios realizados por Cui *et al.* (2019), concentraciones 2,0 mg L⁻¹ de BAP, 0,1 mg L⁻¹ de ANA y 2,0 mg L⁻¹ de GA₃, indujeron brotes en *Magnolia sirindhorniae* Noot. & Chalermglin a partir de yemas laterales. Por su parte, Wojtania *et al.* (2015) indican que la concentración de 0,2 mg L⁻¹ de BAP generó brotes en *Magnolia soulangiana* Soul.-Bod. a partir de yemas apicales y axilares establecidas *in vitro*. En la presente investigación fueron necesarios 3 mg L⁻¹ de BAP, para lograr la brotación de yemas de *M. arcabucoana*, luego de 105 días después del establecimiento en el medio de cultivo (Figura 5).

4 CONCLUSIONES

A través de la presente investigación se logró establecer y optimizar el protocolo de desinfección (0,8 % de Ca(ClO)₂ por tres minutos de inmersión) y establecimiento inicial (medio WPM +1 mg L⁻¹ de BAP + 0,05 mg L⁻¹ de ANA), así como el protocolo para disminuir la oxidación causada por fenoles tanto en el pre-establecimiento inicial (AA al 25 % p/v durante 15 minutos de in-

mersión) y el pos-establecimiento inicial (1 g L⁻¹ CA y 0,5 g L⁻¹ AA) *in vitro* de yemas vegetativas de *Magnolia arcabucoana*, obteniendo una brotación a los 105 días del establecimiento del cultivo en el medio WPM + 3 mg L⁻¹ de BAP. Esto constituye un aporte importante para el establecimiento *in vitro* de *Magnolia arcabucoana* (Lozano) Govaerts con fines de conservación en Colombia.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Diana Milena Avendaño Torres: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador

original. **Elberth Hernando Pinzón-Sandoval:** metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Biotecnología vegetal de la secretaría de Agricultura de la Gobernación de Boyacá y

a la Asociación Hijos del Monte, Moniquirá-Boyacá.

LITERATURA CITADA

Abdin, M. Z., Kiran, U., Kamaluddin, & Ali, A. (2017). Plant biotechnology: Principles and applications. In *Plant Biotechnology: Principles and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2961-5>

Aguilar-Cano, J., Mendoza-Cifuentes, H., & Ayala-Joya, M. (2018). Dos nuevas especies de árboles molinillo (Magnolia: Magnoliaceae) de la Serranía de los Yariguíes, departamento de Santander, Colombia. *Biota Colombiana*, 19(s1), 27–42. <https://doi.org/10.21068/c2018.v19s1a04>

Ahmad, I., Hussain, T., Ashraf, I., Nafes, M., Maryam., Rafay, M., & Iqbal, M. (2013). Lethal effects of secondary metabolites on plant tissue culture. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 13(4), 539–547. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajeas.2013.13.04.1975>

Amente, G., & Chimdessa, E. (2021). Control of browning in plant tissue culture: A review. *Journal of Scientific Agriculture*, 5, 67–71. <https://doi.org/10.25081/jsa.2021.v5.7266>

Araújo, M. da C. da R., Chagas, E. A., Vendrame, W., Ribeiro, M. I. G., Moura, E. A. de, Taveira, D. L. L., Chagas, P. C., & Grigio, M. L. (2021). Callus induction and pro-embryogenic mass formation in *Myrciaria dubia*, an important medicinal and nutritional plant. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 21(3), e25442131. <https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21n3a40>

Avendaño, D. M., Pinzón, E. H., y Serrano, P. A. (2022). Aspectos biotecnológicos en la propagación in vitro de magnoliáceas. *Ciencia y Agricultura*, 19(3), 116–131. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n3.2022.15195>

Azofeifa-Delgado, Á. (2008). Problemas de oxidación y oscurecimiento de explantes cultivados in vitro. *Agronomía Mesoamericana*, 20(1), 153. <https://doi.org/10.15517/am.v20i1.4990>

Blokhina, O., Virolainen, E., & Fagerstedt, K. V. (2003). Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review. *Annals of Botany*, 91, 179–194. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf118>

Borah, R., Kumaria, S., & Choudhury, H. (2017). In vitro plant regeneration of magnolia punduana: An endemic and threatened plant species. *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, 27(2), 153–159. <https://doi.org/10.3329/ptcb.v27i2.35020>

Calderón, E., Cogollo, A., Velásquez-Rua, C., Serna-González, M. & García, N. (2014). Magnolia arcabucoana. The IUCN Red List of Threatened Species 2014: e.T193902A2290179. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2014-1.RLTS.T193902A2290179.en>

<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2014-1.RLTS.T193902A2290179.en>

Cardozo, S., Marin, B. S., Godoy, J., y Suárez, S. (2017). Propagación in vitro de Magnolia Hernandezii (Molinillo) a partir de hojas. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 29, 80–85.

Chávez-Cortázar, A., Oyama, K., Ochoa-Zavalá, M., Mata-Rosas, M., Veltjen, E., Samain, M. S., & Quesada, M. (2021). Conservation genetics of relict tropical species of Magnolia (section Macrophylla). *Conservation Genetics*, 22(2), 259–273. <https://doi.org/10.1007/s10592-021-01334-5>

Coelho, N., Gonçalves, S., & Romano, A. (2020). Endemic plant species conservation: Biotechnological approaches. *Plants*, 9, 345. <https://doi.org/10.3390/plants9030345>

Cuba-Díaz, M., Acuña, D., Cordero, C., & Klagges, M. (2014). Optimización de parámetros para la propagación in vitro de Colobanthus quitensis (Kunth) Bartl. *Gayana. Botánica*, 71(1), 58-67. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432014000100009>

Cui, Y., Deng, Y., Zheng, K., Hu, X., Zhu, M., Deng, X., & Xi, R. (2019). An efficient micropropagation protocol for an endangered ornamental tree species (Magnolia sirindhorniae Noot. & Chalermling) and assessment of genetic uniformity through DNA markers. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46050-w>

Díaz-Lezcano, M., Rodas-Ramírez, J., González-Segnana, L., y Ortiz, M. (2021). Control de la oxidación fenólica de segmentos nodales de *Handroanthus heptaphyllum* en condiciones *in vitro*. *CEDAMAZ*, 11(1), 1–5.

Gutiérrez-Lozano, M., Sánchez-González, A., Vázquez-García, J. A., López-Mata, L., & Octavio-Aguilar, P. (2020). Population morphological differentiation of *Magnolia rzedowskiana* (Magnoliaceae): Endemic species in danger of extinction of the Sierra Madre Oriental, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913101. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2020.91.3101>

Guzmán-Díaz, S., Aldaba Núñez, F. A., Veltjen, E., Asselman, P., Larridon, I., & Samain, M. S. (2022). Comparison of Magnoliaceae Plastomes: Adding Neotropical Magnolia to the Discussion. *Plants*, 11(3), 1–29. <https://doi.org/10.3390/plants11030448>

Hernández, M., Palmarola, A., Testé, E., Veltjen, E., Asselman, P., Larridon, I., Samain, M. and González-Torres, L. (2020). Population structure and genetic diversity of *Magnolia cubensis* subsp. *acunae* (Magnoliaceae): Effects of habitat fragmentation and implications for conservation. *Oryx*, 54, 451–459. <https://doi.org/10.1017/S003060531900053X>.

Hernández, Y., y González, M. (2010). Efectos de la contaminación microbiana y oxidación perennes. *Cultivos Tropicales*, 31(4), 58–69.

IUCN. (2022). *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria*.

IUCN Standards and Petitions Committee. <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>.

Kang, L., Zheng, K., Xie, Y., Deng, Y., Yu, Y., Zhu, M., Xi, R., & Deng, X. (2020). Efficient tissue culture protocol for *magnolia lucida* (Magnoliaceae) and confirmation of genetic stability of the regenerated plants. *Plants*, 9(8), 1–12. <https://doi.org/10.3390/plants9080997>

Kulak, V., Longboat, S., Brunet, N. D., Shukla, M., & Saxena, P. (2022). In Vitro Technology in Plant Conservation: Relevance to Biocultural Diversity. *Plants*, 11(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants11040503>

Lee, Y. J., Lee, Y. M., Lee, C. K., Jung, J. K., Han, S. B., & Hong, J. T. (2011). Therapeutic applications of compounds in the Magnolia family. *Pharmacology and Therapeutics*, 130(2), 157–176. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2011.01.010>

Luo, Y., Zheng, K., Liu, X., Tao, J., Sun, X., Deng, Y., & Deng, X. (2023). In Vitro Propagation and Genetic Uniformity Assessment of *Manglietiastrum sinicum*: A Critically Endangered Magnoliaceae Species. *Plants*, 12(13), 2500. <https://doi.org/10.3390/plants12132500>

Maestro, R., y Borja, R. (1993). Actividad antioxidante de las vitaminas C y E y de la provitamina A. *Grasas y Aceites*, 44(2), 107–111. <https://doi.org/10.3989/gya.1993.v44.i2.1106>

Palmarola, A., Simón, R., Testé, E., Hernández, M., Sosa, A., Molina, Y., & González-Torres, L. R. (2020). Distribution and

- conservation of Magnolia (Magnoliaceae) in cuba. *Botanical Sciences*, 1(1), 300–313. <https://doi.org/10.17129/botsci.2868>
- Parris, J. K., Touchell, D. H., Ranney, T. G., & Adelberg, J. (2012). Basal salt composition, cytokinins, and phenolic binding agents influence in vitro growth and ex vitro establishment of Magnolia 'Ann.' *HortScience*, 47(11), 1625–1629. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.11.1625>
- Pedroza, J. A. (2009). Efecto del carbón activado , ácido indolacético (AIA) y bencil amino purina (BAP) en el desarrollo de protocormos de Epidendrum elongatum Jacq bajo condiciones in vitro. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 11(1), 17–32.
- Poniewozik, M., Parzymies, M., & Szot, P. (2022). Effect of activated charcoal and ascorbic acid on in vitro morphogenesis and o-dihydroxyphenols content in Paphiopedilum insigne. *Horticultural Science*, 49(1), 48–51. <https://doi.org/10.17221/68/2020-HORTSCI>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>.
- Radomir, A.-M. (2012). Comparative study on the in vitro multiplication potential of Magnolia stellata and Magnolia x soulangiana species. *Journal of horticulture, forestry and biotechnology*, 16(2), 39–44.
- Restrepo-Cossio, L. V., López-Álvarez, N., Taborda-Arboleda, M. M., & Muriel-Ruiz, S. B. (2024). Seed germination and seedling development of Magnolia guatapensis (Lozano) Govaerts (Magnoliaceae): an endangered tree species from Colombia. *Botanical Sciences*, 102(1), 128–143. <https://doi.org/10.17129/botsci.3349>
- Rivers, M., Beech, E., Murphy, L., & Oldfield, S. (2016). *The Red List of Magnoliaceae - revised and extended*. In The Red List (BGCI. Rich, Issue March). BGCI. Richmond, UK.
- Rodríguez-Duque, D. L., Escobar-Alba, M., García-González, J. D., Carvajal-Cogollo, J. E., & Aymard-Corredor, G. A. (2023). A New andean species of Magnolia (Section Talauma, Magnolioideae, Magnoliaceae), and a key to the species found in Colombia. *Harvard Papers in Botany*, 27(2), 3350. <https://doi.org/10.3100/hpib.v27iss2.2022.n1>
- Serna-González, M., Urrego-Giraldo, L. E., Santa-Ceballos, J. P., & Suzuki-Azuma, H. (2022). Flowering, floral visitors and climatic drivers of reproductive phenology of two endangered magnolias from neotropical Andean forests. *Plant Species Biology*, 37(1), 20–37. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12351>
- Serna-González, M., & Velásquez-Ruiz, C. (2017). Pollen of colombian magnolias. *Caldasia*, 39(1), 59. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.64315>
- Sokolov, R. S., Atanassova, B. Y., & Iakimova, E. T. (2014). Physiological response of in vitro cultured Magnolia Sp. to nutrient medium composition. *Journal of Horticultural Research*, 22(1), 49–61. <https://doi.org/10.2478/johr-2014-0006>

- Thomas, T. D. (2008). The role of activated charcoal in plant tissue culture. *Biotechnology Advances*, 26(6), 618–631. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.08.003>
- Vázquez-García, J. A., Neill, D. A., Azanza, M., Pérez, Á. J., Dahua-Machoa, A., Merino-Santi, E., Delgado-Chaves, A. F., & Urbano-Apraez, S. M. (2017). Magnolia mindoensis (subsect. Talauma, Magnoliaceae): Una especie nueva del Chocó biogeográfico premontano en Colombia y Ecuador. *Brittonia*, 69(2), 197–208. <https://doi.org/10.1007/s12228-016-9449-x>
- Wojtania, A., Dziurka, M., & Skrzypek, E. (2020). In vitro rooting response of yellow-flowered magnolia in relation to the phenolic acids content. *Agronomy*, 10(12), 1–12. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121880>
- Wojtania, A., Skrzypek, E., Gabryszewska, E., & Sci Pol, A. (2015). Effect of cytokinin, sucrose and nitrogen salts concentrations on the growth and development and phenolics content in Magnolia × soulangiana ‘Coates’ shoots In vitro. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 14(3), 51–62.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

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



ANÁLISIS DE INNOVACIONES Y REDES DE CONOCIMIENTO EN PRODUCTORES DE MANGO DEL TOLIMA, COLOMBIA

INNOVATIONS AND KNOWLEDGE NETWORK ANALYSIS IN MANGO PRODUCERS OF TOLIMA, COLOMBIA

Diego Alberto Navarro-Niño ¹

Eleonora Rodríguez-Polanco ²

Edgar Herney Varón-Devia ³

Claudia Milena Flórez Cárdenas ⁴

Edison Bayardo Parra-Alferes ⁵

Paula Bermeo-Fúquene ⁶

¹ Máster en Desarrollo Rural, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. dnavarro@agrosavia.co

² PhD. Fitopatología, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. lrodriguezp@agrosavia.co

³ PhD. Entomología, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. evaron@agrosavia.co

⁴ Ingeniero Agrónomo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. cmflorez@agrosavia.co

Ingeniero Agrónomo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. ebayardo@agrosavia.co

⁶ Máster en Agronomía (c), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. C.I. Nataima. El Espinal, Colombia. pbermeo@agrosavia.co

Citación: Navarro-Niño, D., Rodríguez-Polanco, E., Varón-Devia, E., Flórez, C., Parra-Aferes, E., y Bermeo-Fúquene, P. (2025). Análisis de innovaciones y redes de conocimiento en productores de mango del Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 123 - 142. <https://doi.org/10.22490/21456453.7656>

RESUMEN

Contextualización: a pesar del aumento en el área producida de mango en Colombia, el departamento del Tolima presenta un rendimiento inferior comparado al promedio nacional, situación que evidencia los desafíos en la adopción de tecnologías de los productores de este cultivo en el departamento.

Vacío de conocimiento: existe escasa información relacionada con: i) las innovaciones adoptadas por los agricultores tolimenses y ii) el acceso al conocimiento en sus territorios.

Propósito: analizar los índices de adopción de innovaciones y la red de acceso al conocimiento por parte de los agricultores de mango del centro del Tolima.

Metodología: se elaboró un catálogo de 39 innovaciones en la producción de mango, que luego fue usado para diseñar una encuesta la cual se aplicó a 64 agricultores. El muestreo fue por bola de nieve y la recolección de los datos se llevó a cabo utilizando una escala ordinal. En un inicio se realizó un análisis estadístico descriptivo para entender la dinámica del sistema productivo y el perfil de los productores, luego fueron calculados los indicadores de adopción por

medio del análisis de gestión de la innovación y por último se hizo un análisis de redes de conocimiento.

Resultados y conclusiones: los productores de mango del Tolima se centran en prácticas productivas (reproducción, nutrición, sanidad y manejo sostenible de recursos), sin embargo, presentan un índice de adopción de innovaciones (INAI) bajo (44%). Se recomienda fortalecer la adopción de innovaciones en categorías como cosecha y administración con el fin de aumentar el rendimiento actual del departamento (7,12 t/ha). Adicionalmente, existe poca interacción entre los agricultores, lo cual limita la difusión de conocimiento. Por otro lado, se comprueba la relevancia del vínculo entre agricultores y asistentes técnicos, pues se tiene un mayor INAI con los productores que interactúan con estos profesionales. Se sugiere implementar estrategias como las escuelas de campo para fomentar la interacción junto al aprendizaje entre los agricultores y los actores del territorio.

Palabras clave: adopción de tecnología, difusión de la investigación, extensión, *Mangifera indica*, análisis de redes sociales

ABSTRACT

Contextualization: Despite the increase of mango production area in Colombia, Tolima department (State) has a lower yield compared to the national average. This situation demonstrates the challenges in technologies adoption by Tolima mango producers.

Knowledge gap: There is scarce information related to: i) innovations adopted by Tolima farmers and ii) knowledge access in their territories.

Purpose: To analyse the adoption rates of innovations and network access to knowledge of mango farmers in central Tolima.

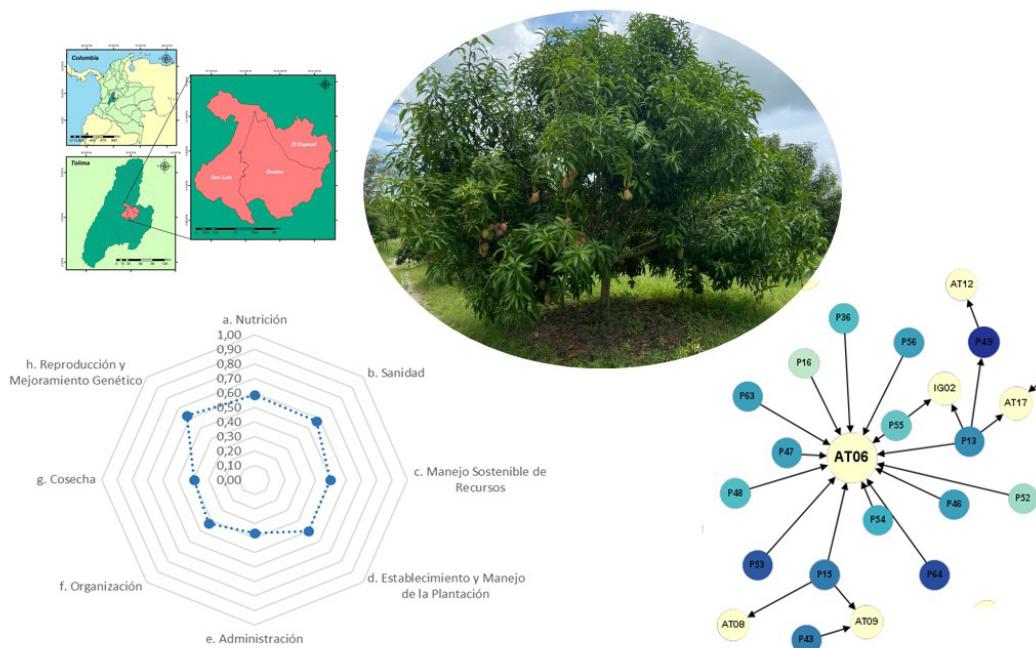
Methodology: We set 39 catalog mango innovations, that were employed to conduct a survey to 64 farmers. We select snowball as sampling methodology and transform data collection in an ordinal scale. First, to understand the dynamics of the production system and producers' profiles, we conducted a descriptive statistical analysis. Then,

adoption indicators were estimated through innovation management analysis and finally a knowledge network analysis.

Results and conclusions: Mango producers in Tolima focus on productive practices (reproduction, nutrition, sanitation and sustainable resource management). However, they display a low Innovation Adoption Index (INAI) (43%). It is recommended to strengthen the innovation adoptions such as harvesting and administration, in order to increase the current yield (7.12 t/ha) in Tolima. In addition, there is little interaction among farmers, limiting the dissemination of knowledge. It is suggested to promote interaction and learning among farmers through strategies such as field schools.

Keywords: technology adoption, research dissemination, extensión, *Mangifera indica*, social network analysis.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica L.*) es cultivado en regiones tropicales y subtropicales, siendo India, Indonesia y China los principales productores (Sierra *et al.*, 2023). En Colombia, su área de producción ha aumentado en los últimos años, alcanzando 37624 hectáreas cosechadas para el 2022, con un rendimiento promedio de 10,1 t/ha (UPRA, 2023). El 57% de la producción se concentra en Cundinamarca, Tolima y Magdalena, lo

que convierte al cultivo en una importante fuente de ingresos y empleo en estos departamentos (Arcila *et al.*, 2022). En el Tolima se siembran 6521 ha, con un rendimiento de 8,0 t/ha, siendo los municipios de El Espinal, Guamo, San Luis y Coello los de mayor producción (UPRA, 2023). El rendimiento promedio de mango en el departamento es inferior comparado con la cifra nacional debido a la baja calidad del fruto (Sierra *et al.*, 2023).

El país presenta una oferta de variedades de mango donde el 39% del área de cultivo está dedicada al material Hilacha, seguida por Tommy Atkins (20%), Keitt (11%) y Mango de Azúcar (5%). La cadena productiva de mango en el país enfrenta desafíos significativos debido a la ausencia de sistemas tecnológicos actualizados, esta carencia limita la diversificación en el desarrollo de productos derivados como también al aprovechamiento eficiente de los subproductos, lo que repercute negativamente en el crecimiento económico nacional (Orjuela-Castro *et al.*, 2017; Rubiano-Charry *et al.*, 2019). Asimismo, la falta de asistencia técnica en estas plantaciones representa un obstáculo para el óptimo desarrollo tecnológico del sector y para el incremento de innovaciones en las zonas rurales (Corrales-Bernal *et al.*, 2014; Sennuga *et al.*, 2020; Tudela *et al.*, 2021).

En ese sentido, la eficacia del modelo de transferencia de tecnología para mango en Colombia es cuestionable, ya que se caracteriza por seguir un enfoque lineal donde el agricultor se concibe como el beneficiario final de los resultados de investigación (Rogers *et al.*, 2019), generando carencia en la colaboración entre el agricultor y las instituciones de investigación, lo que resulta en un desconocimiento de prácticas tecnológicas y bajos niveles de adopción de innovaciones (Mercado *et al.*, 2019).

La innovación en el sector agropecuario se define como la aplicación de nuevos enfoques, tecnologías, procesos y estrategias para mejorar la productividad, sostenibilidad y calidad de vida en las áreas rurales

(Aguilar-Ávila *et al.* 2020). En el análisis de adopción de innovaciones en un sistema agrícola, se determinan los índices de adopción de innovaciones (INAI) que cuantifican el nivel de acogida de un productor respecto a un catálogo o lista de innovaciones. Así, los INAI sirven de insumo para fortalecer procesos de extensión rural junto a procesos de transferencia de tecnología, con el fin de orientar eficazmente los recursos públicos y humanos (Cuevas *et al.*, 2013; Navarro-Niño *et al.*, 2023; Ramírez-Gómez *et al.*, 2023). Otro de los indicadores es la tasa de adopción de innovaciones (TAI), la cual permite evaluar el porcentaje de agricultores que incorporan determinada innovación o servicio específico en una población, es decir, cuantifica la proporción de personas que adopta una innovación (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2017). Por último, las redes de conocimiento entre agricultores permiten conocer el estado del flujo de la información técnica dentro de los grupos de cultivadores.

En Colombia, el estado de las innovaciones y las redes de conocimiento entre productores de mango aún no ha sido documentada. Así, el objetivo fundamental de esta investigación fue evaluar la dinámica de innovación entre los cultivadores de mango en el centro del Tolima, mediante dos objetivos específicos: el primero, caracterizar el perfil sociodemográfico y productivo del mango; y el segundo, conocer los niveles de la adopción de innovaciones y el análisis del flujo de vínculos de información técnica de agricultores. Estos hallazgos se destinan a proporcionar insumos para procesos de transferencia de tecnología y extensión rural en la región.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el año 2022 en los municipios de El Espinal, Guamo y San Luis, ubicados en el departamento de Tolima (Figura 1). El levantamiento de la información se realizó a través de una encuesta dirigida a los productores de mango ubicados en la zona, mientras que los encuestados fueron elegidos a partir de un método de muestreo no probabilístico por bola de nieve (Escobar *et al.*, 2019; Kouassi *et al.*, 2019), considerando el conocimiento de la

actividad productiva y la población, teniendo como fin garantizar resultados robustos y reproducibles (Aguilar-Ávila *et al.*, 2020). La encuesta se realizó a 64 productores (15 del Espinal, 33 del Guamo y 16 de San Luis) y constó de tres secciones: primero, actividad productiva y perfil de los productores; segundo, dinámica de innovaciones implementadas; y tercero, análisis de las redes de conocimiento.

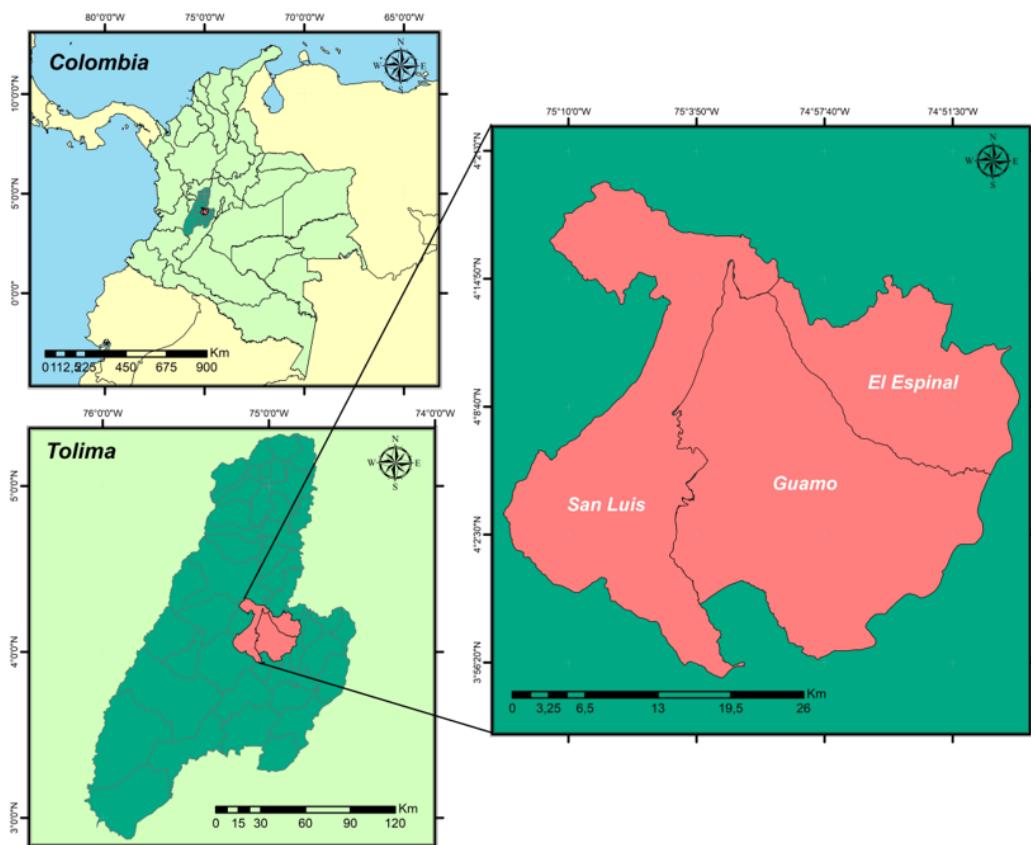


Figura 1. Localidades de estudio, ubicados en el centro del Tolima, Colombia

Fuente: autores.

En el diagnóstico se aplicó la metodología de Aguilar-Ávila *et al.* (2020), que considera los procesos de innovación dentro de los ámbitos agroalimentario y rural. Inicialmente, se realizó la caracterización de los productores de mango mediante un análisis estadístico descriptivo (Escobar *et al.*, 2019), posteriormente, se estableció una línea base de estudio centrada en las prácticas del cultivo de mango, utilizando una clasificación de innovaciones basada en categorías (Ramírez *et al.*, 2022) que se construyó mediante la participación de investigadores como también de otros actores internos y externos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), quienes contaban con experiencia en procesos de investigación y transferencia en este cultivo.

A partir de las encuestas fueron calculados los indicadores y medidos el INAI y el TAI (Aguilar-Ávila *et al.* 2020; Jara-Rojas *et al.* 2020). Estos indicadores se categorizaron en una escala binaria, donde se determinó si la innovación se había aplicado (1) o no (0) (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2016). Además, se empleó el software Microsoft Excel para determinar los indicadores de acuerdo con la guía metodológica de análisis de innovaciones (Aguilar-Ávila *et al.* 2020); mientras que para calcular los indicadores relacionados con la dinámica de innovación, se evaluaron 39 innovaciones, distribuidas en 8 categorías (Anexo 1).

En el primer análisis, se empleó el INAI como medida para evaluar el nivel de innovación de cada uno de los productores. Este índice se encuentra categorizado en una escala que va desde 0 hasta 1, en la cual los

valores más próximos a 1 indican un mayor grado de adopción de innovaciones por parte del agricultor en relación con el total de innovaciones disponibles.

Las innovaciones objeto de análisis han sido clasificadas en diversas categorías, estas han sido organizadas y evaluadas por medio de la herramienta Excel, empleando el INAI por cada categoría. En este proceso se consideró la misma escala de medición utilizada para el INAI por cultivador (Aguilar-Ávila *et al.* 2020), con el fin de mantener la coherencia en la evaluación de la acogida de innovaciones en cada una de las áreas específicas analizadas.

En el proceso de análisis del TAI, se establece una relación directa entre el número de adopciones o prácticas de innovaciones según lo propuesto en el catálogo y se utiliza la misma escala de evaluación que fue usada para el INAI. Es importante destacar que este análisis se lleva a cabo de forma individual para cada innovación o práctica con el propósito de observar el grado de adopción por parte de los productores. Este enfoque permite evaluar en qué medida una innovación específica es acogida dentro del contexto estudiado, proporcionando así una visión detallada de las tecnologías en este cultivo (Ramírez *et al.*, 2022).

Con el fin de caracterizar las redes sociales y comprender el flujo de conocimiento técnico en el sistema de producción, fue formulada la siguiente pregunta a los productores: ¿de quién ha obtenido información o conocimiento para implementar las prácticas, tecnologías e innovaciones que realiza en su cultivo? Las respuestas de los productores

fueron analizadas empleando los softwares UCINET y GEPHI, herramientas especializadas en el estudio y análisis de redes sociales (Borgatti *et al.*, 2002; Bastián *et al.*, 2009).

En el proceso de análisis de redes, se lleva a cabo la evaluación de algunos indicadores de primer orden, tales como la centralidad y los grados de entrada y salida. Estos cumplen la función de proporcionar información relevante para la selección de nodos, que a su vez actúan como fuentes pri-

marias de información técnica dentro de la red. Los indicadores mencionados también permiten identificar aquellos nodos que son fundamentales en la transmisión y difusión de conocimiento técnico, lo que facilita la identificación de puntos clave dentro de la estructura de la red, los cuales resultan cruciales para el intercambio eficiente de información, también se tienen en cuenta los índices de INAI de cada productor encuestado (Aguilar-Ávila *et al.* 2020).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actividad productiva y perfil de los productores

El área promedio sembrada de mango en el centro del Tolima fue de $1,90 \pm 0,26$ ha, que categoriza a los agricultores como pequeños productores, según Sosa *et al.* (2012). El rendimiento promedio fue de $7,12 \pm 0,38$ t/ha, con edad media de plantación de $13 \pm 0,99$ años.

Estos datos indicaron que los municipios encuestados tienen un rendimiento menor al promedio departamental (8,0 t/ha) (UPRA, 2023). Por otro lado, la edad promedio de los encuestados fue de $56 \pm 1,63$ años y su nivel de escolaridad fue de $8 \pm 0,40$ años, registrando como tiempo de experiencia en el cultivo $21 \pm 1,56$ años (Tabla 1).

Tabla 1.

Dinámica de producción y perfil de productores de mango en el centro del Tolima (Colombia)

Atributos	Media	Mínimo	Máxima	Desviación estandar	Coeficiente de variación	Error estándar
Área mango (ha)	1,90	0,5	10	2,22	116,95	0,26
Rendimiento (t/ha)	7,12	4	20	3,28	46,11	0,38

Edad plantación (años)	13	4	35	8,53	65,21	0,99
Área total finca (ha)	5	0,5	18	4,17	76,94	0,48
Años de experiencia en el cultivo	21	6	50	13,39	64,61	1,56
Edad del agricultor (años)	56	28	71	14,01	24,86	1,63
Escolaridad (años)	8	3	15	3,44	45,26	0,40

Fuente: autores.

En la caracterización de los productores es importante considerar datos de escolaridad y edad del productor, pues son determinantes en procesos de adopción de tecnologías como se evidencia en estudios de Rizzo *et al.* (2023), donde a mayor edad hay una menor adopción de innovaciones. De acuerdo con nuestros resultados, existe un envejecimiento de los productores de mango (Miranda, 2020), siendo la población que presenta una menor disposición para la adopción de tecnologías (Yue *et al.*, 2023).

Indicadores de adopción de innovaciones

De acuerdo con el INAI, se observa que el nivel promedio de adopción es bajo (44%), y

que se presenta una brecha del 56% para los productores de mango en el Tolima (Figura 2). Este estudio se asemeja a investigaciones para mango realizadas en México, donde el valor promedio del INAI fue del 43% (Ávalos *et al.*, 2014). De manera similar, este estudio concuerda con otros realizados en Colombia que muestran un bajo índice de nivel de adopción de innovaciones (INAI), como es el caso del cultivo de arracacha, donde el INAI alcanza el 37.9% (Navarro-Niño *et al.*, 2023) y para el caso del aguacate que tiene un INAI medio de adopción de 45.7% (Ramírez-Gómez *et al.*, 2023).

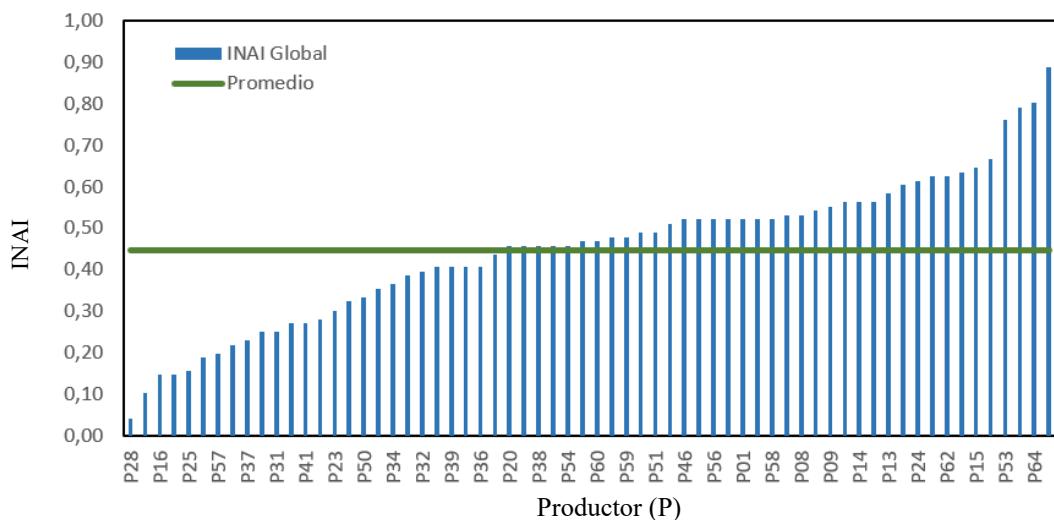


Figura 2. INAI de los productores de mango del centro del Tolima. Pr: promedio

Fuente: autores.

Dentro del análisis de la dinámica de innovaciones de los productores (Anexo 1), fueron encontrados los siguientes porcentajes de adopción por categoría: reproducción y mejoramiento genético (62%), nutrición (58%) y sanidad (57%). En cambio, estable-

cimiento y manejo de la plantación (49%), manejo sostenible de Recursos (49%), organización (42%), cosecha (39%) y administración (36%), registraron una menor adopción (Figura 3).



Figura 3. Adopción de innovaciones por categorías de los productores de mango del centro del Tolima

Fuente: autores.

Con respecto a la categoría de cosecha de mango, se evidenció una baja adopción. Es importante mencionar que esta categoría es crucial para el acceso a mejores mercados, previamente fue evidenciado en Etiopia, donde se logró apertura de mejores mercados a través de la optimización y prácticas de postcosecha (Tewodros *et al.*, 2019).

Con relación al TAI, se encontró que las seis innovaciones de mayor adopción por los productores de mango fueron: b.09. Control y manejo de malezas (85,93%), d.18. podas de mantenimiento (82,81%), b.10. podas sanitarias (81,25%), d.17. podas de formación (70,31%), H.39. compra las plantas en viveiros registrados ante el ICA (79,68%) y f.30. venta de mango al intermediario (73,43%) (Figura 4). Estos resultados, relacionados con prácticas de podas, concuerdan con los estudios de Miranda (2020) en Cundinamar-

ca-Colombia, donde el 80% de productores realizan podas en su cultivo. Por el contrario, hay estudios donde se evidencia el bajo porcentaje de adopción de prácticas de podas (50.4%) debido a una falta de conocimiento, habilidades y miedo de los agricultores a perder el rendimiento del árbol (Desai *et al.*, 2017).

Por otro lado, una de las limitantes de los productores del Tolima son la postcosecha y comercialización, en las que predomina la venta a intermediarios y no directamente a la agroindustria, esto es similar a estudios realizados en Cundinamarca (Sosa *et al.*, 2012), Etiopia e India, en este último están fortaleciendo este aspecto debido a la gran intermediación que se desarrolla en el país junto a la baja adopción de tecnologías de postcosecha (Divya y Arunachalam., 2020; Tewodros *et al.*, 2019).

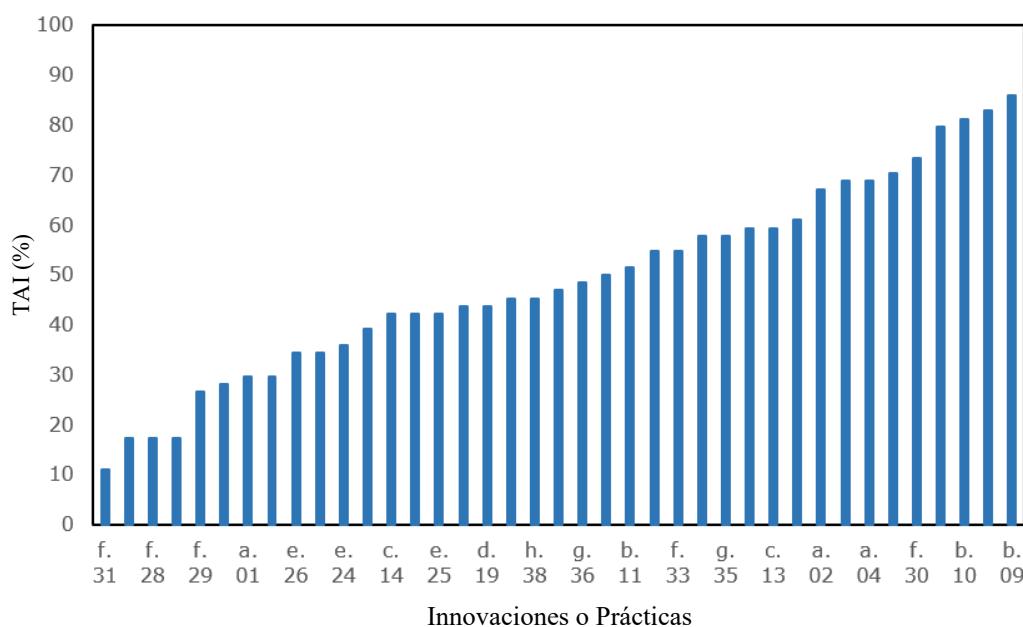


Figura 4. TAI de los productores de mango del centro del Tolima

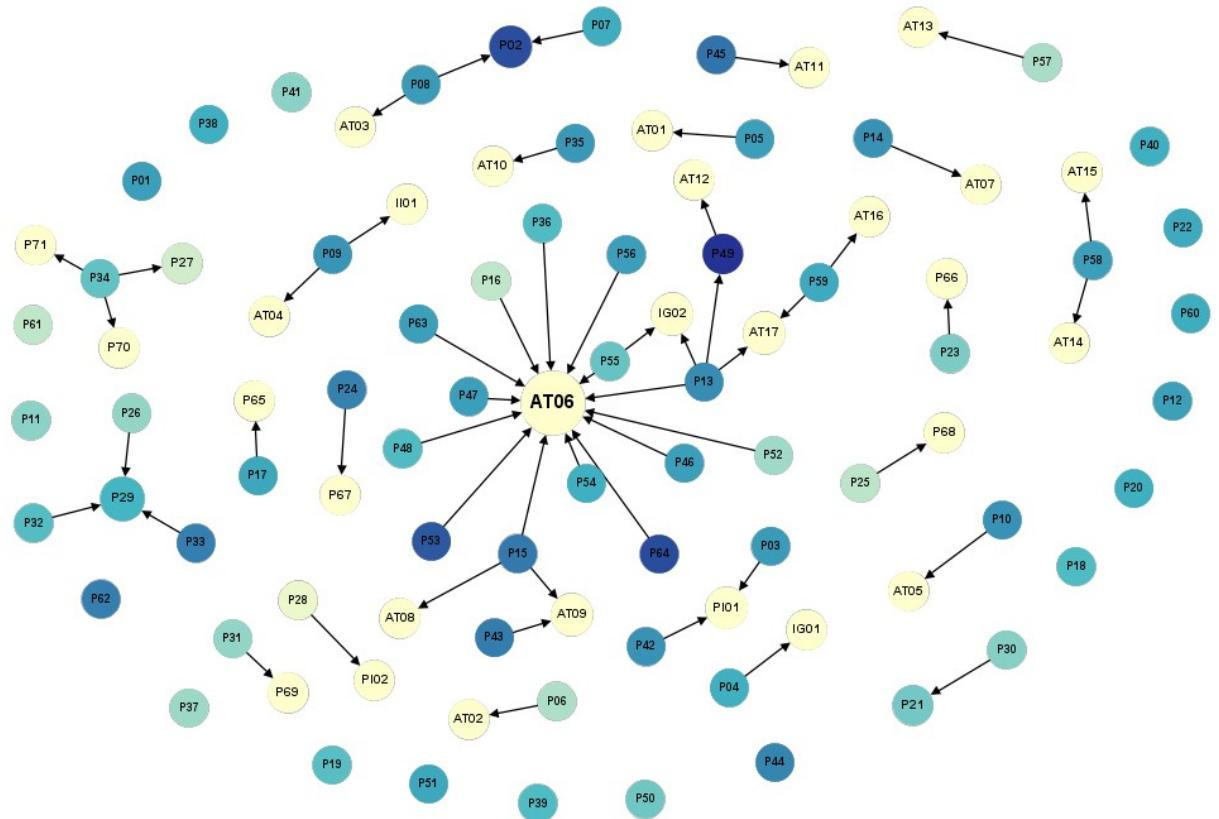
Fuente: autores.

En términos generales, las innovaciones adoptadas por los productores pertenecen al proceso de producción, sin embargo, carecen de sistemas tecnológicos innovadores que posibiliten la diversificación en el desarrollo de productos (Rubiano-Charry *et al.*, 2019). Las innovaciones de la organización y administración del cultivo tienen una adopción baja (Figura 4), por ejemplo, la asistencia técnica (e.26), donde sólo el 34,37% de los agricultores reciben este servicio, siendo similar a los resultados de Corrales-Bernal *et al.* (2014), que demuestran que para Colombia los pequeños agricultores de mango carecen de este acompañamiento, afectando negativamente los rendimientos y la adopción de nuevas innovaciones (Sosa *et al.*, 2012), en consecuencia, es necesario fortalecer los procesos de asistencia técnica y extensión rural ya que mejoran la adopción de nuevas tecnologías y prácticas en el sector agropecuario a nivel mundial (Chelang'a *et al.*, 2023; Yaseen *et al.*, 2023). En este sentido,

la baja adopción de innovaciones relacionadas con aspectos organizativos y gerenciales podría deberse a que los cultivadores tienen mayor contacto con técnicos del sistema productivo que con profesionales que transmiten conocimientos gerenciales (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2020).

Análisis de las redes de conocimiento técnico

La red de productores del cultivo de mango está compuesta por 93 nodos (Figura 5), donde se tienen 71 productores (P), 17 asistentes técnicos (AT), una institución de investigación (II), dos instituciones gubernamentales (IG) y dos proveedores de insumos (PI). La densidad de la red es baja (0,60%), mostrando que los agricultores no mantienen interacciones entre ellos respecto a temas técnicos, especialmente aquellos que poseen un mayor INAI.



agricultores, propiciando un ambiente de aprendizaje y adopción de innovaciones, a partir de la experiencia local compartida con sus homólogos (De Roo *et al.*, 2023).

Según los resultados, se comprueba la relevancia del vínculo entre agricultores y asistentes técnicos. El nodo AT06 con 14 productores es un claro ejemplo de esto, este a su vez alberga al nodo P64, P53 con un INAI mayor del 70 %. Lo cual indica que la fuente de información suministrada por el asistente técnico es relevante al presentar un alto valor de INAI entre los agricultores. Estos hallazgos son coherentes con investigaciones previas, resaltando la importancia de la interacción entre los agricultores y asis-

tentes técnicos, pues este enlace es un factor determinante para fomentar la adopción de nuevas prácticas y tecnologías (García-Sánchez *et al.*, 2019).

Finalmente, resulta esencial identificar en la red a aquellos agricultores con INAI superior al 60%, tales como P49, P64, P53, P45, P15, P43, P62, P33, P24 y P44. Estos actores deberían ser objeto de gestión en el contexto de procesos relacionados con redes de innovación y escuelas de campo, con el fin de fomentar la difusión de tecnologías a nivel local y facilitar las interacciones entre agricultores (Khumairoh *et al.*, 2019; Navarro-Niño *et al.*, 2022).

4 CONCLUSIONES

La dinámica de producción de mango en los municipios analizados se define por la presencia predominante de pequeños productores, con un rendimiento promedio de 7,12 t/ha. Este perfil trata de fincas de producción relativamente pequeñas con más de 20 años de experiencia en el cultivo, rendimientos bajos y una tendencia hacia el envejecimiento de los productores en esta zona.

La mayoría de las prácticas adoptadas por los agricultores de mango en el Tolima se centran en aspectos productivos. Sin embargo, se detecta una pérdida del potencial productivo de la región, lo cual se refleja en un bajo índice de adopción de innovaciones

(INAI) promedio (44%) y en los bajos rendimientos en el cultivo. Para abordar esta situación es importante fortalecer la adopción de innovaciones en las categorías que han sido menos adoptadas, como en el caso de cosecha, administración y organización del sistema productivo. Por lo anterior, es de vital importancia que los productores estén familiarizados con las prácticas de cosecha que pueden conducir a la mejora de los mercados mediante la optimización y la implementación de prácticas adecuadas de postcosecha. Estas disposiciones no sólo contribuyen a mejorar la calidad del producto, sino que también pueden influir positivamente en la competitividad y rentabilidad de los productores en el mercado.

Otro aspecto significativo es la fuente de información especializada para los productores, la cual proviene de pocos asistentes técnicos. También se destaca la carencia de interacciones significativas entre los propios agricultores, con instituciones de investigación para compartir e intercambiar sus conocimientos. Lo anterior es importante porque varios de estos cultivadores tienen niveles altos de adopción, lo que sugiere un potencial subutilizado para la gestión y difusión del conocimiento. Por otro lado, se comprueba la relevancia del vínculo entre campesinos y asistentes técnicos, donde se tiene un mayor INAI con aquellos que interactúan con estos profesionales. Además, se recomienda implementar estrategias como escuelas de campo para promover y fortalecer la interacción entre los trabajadores del campo, para

crear un entorno adecuado para la adopción de innovaciones a partir del diálogo de saberes o experiencias locales entre los diferentes actores del territorio.

Se sugiere que futuras producciones académicas se centren en la evaluación de factores que influyen en la adopción de innovaciones en el cultivo de mango, teniendo en cuenta características evaluadas en este estudio como pueden ser la escolaridad y la edad del productor, donde se determinen la incidencia de estos factores, dada su importancia. Esta investigación sirve como fundamento para la continuación del análisis de los procesos de transferencia, permitiendo la medición de diversos indicadores y la comprensión del impacto, desde una etapa inicial hasta una etapa final.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Diego Alberto Navarro-Niño: formulación del proyecto, recolección de información, análisis de datos, redacción, borrador inicial del artículo. **Eleonora Rodríguez-Polanco y Edgar Herney Va-**

rón-Devia: investigación, conceptualización y redacción versión final. **Claudia Milena Flórez Cárdenas, Edinson Bayardo Parra-Alferes y Paula Bermeo-Fúquene:** recolección de información, revisión y redacción versión final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) por el valioso apoyo brindado durante esta investigación. Asimismo, extienden su reconocimiento a la Corporación Colombiana de Investigación

Agropecuaria (AGROSAVIA) y a los agricultores de mango de los municipios de El Espinal, Guamo y San Luis, Tolima, por su colaboración y participación en el desarrollo del proyecto.

FINANCIAMIENTO

El financiamiento de esta investigación fue proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Los hallazgos forman parte del pro-

yecto denominado Plan de vinculación de la oferta tecnológica del sistema productivo de Mango para el valle del Alto Magdalena-TRAN_TV19, liderado por el Centro de Investigación Nataima, código del proyecto ID 1002389 de Agrosavia.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Ávila, J., Martínez-González, E. G., Aguilar-Gallegos, N., y Altamirano-Cárdenas, J. R. (2020). *Análisis de procesos de innovación en el sector agroalimentario y rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/758>

Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E. G., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, H., Muñoz-Rodríguez, M., y García-Sánchez, E. I. (2016). Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: de los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estudios Gerenciales*, 32(140), 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.06.006>

Aguilar-Gallegos, N., Olvera-Martínez, J. A., Martínez-González, E. G., Aguilar-Ávila, J., Muñoz-Rodríguez, M., y Santoyo-Cortés, H. (2017). La intervención en red para catalizar la innovación agrícola. *Redes: Revista hispana para el análisis*

de redes sociales, 28(1), 9-31. <https://doi.org/10.5565/rev/redes.653>

Arcila, Á. M., Castillo, G. P., Pérez, L., Abaunza, C. A., Yacomelo, M. J., y Rommel, L. P. (2022). *Modelo productivo de mango de azúcar (Mangifera indica L.) para el departamento del Magdalena (Agrosavia)*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria-Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405170>

Ávalos, C., Yépes , E., Aguilar-Ávila, J., y Rendón-Medel, R. (2014). Modelo de negocio en la red de valor, mango ataulfo de exportación. *Textual*, 64, 67–86.

Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. In *Proceedings of the international AAAI conference on web and social media*, 3(1), 361-362. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v3i1.13937>

- Borgatti, S. P., Everett, M. G., & Freeman, L. C. (2002). *Ucinet for Windows: Software for social network analysis*. Harvard, MA: Analytic Technologies.
- Chelang'a, N. C., Kariuki, I. M., Obare, G. A., & Otieno, D. O. (2023). Determinants of adoption of GLOBAL G.A.P. standards: Evidence from smallholder French beans farmers in Murang'a County, Kenya. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176949. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2176949>
- Corrales-Bernal, A., Maldonado, M. E., Urango, L. A., Franco, M. C., y Rojano, B. A. (2014). Mango de azúcar (*Mangifera indica*), variedad de Colombia: características antioxidantes, nutricionales y sensoriales. *Revista Chilena de Nutrición*, 41(3), 312–318. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182014000300013>
- Cuevas, R. V., Baca Del Moral, J., Cervantes, E. F., Espinosa, G. J. A., Aguilar, Á. J., y Loaiza, M. A. (2013). Factores que determinan el uso de innovaciones tecnológicas en la ganadería de doble propósito en Sinaloa, México. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 4(1), 31-46. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242013000100003&lng=es&tlang=es
- De Roo, N., Amede, T., Elias, E., Almekinders, C., & Leeuwis, C. (2023). Diffusion of agricultural knowledge in Southern Ethiopia: finding the real opinion leaders through network analysis. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 29(1), 99–115. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2021.1987282>
- Desai, N., Sukanya, T. S., Mamatha, B., & Patil, R. B. (2017). Yield Gap Analysis in Adoption of Production Technology of Mango by the Farmers. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 15(3), 1–12. <https://doi.org/10.9734/AJAEES/2017/31740>
- Divya, G., & Arunachalam, R. (2020). A study on adoption level of mango growers on the recommended technologies in Krishnagiri district of Tamil Nadu. *Madras Agricultural Students Union*, 107(1–3), 97-102. <https://doi.org/10.29321/MAJ.2020.000348>
- Escobar, N., Romero, N. J., & Jaramillo, C. I. (2019). Typology of small producers in transition to agroecological production. *Agronomy Research*, 17(6), 2242–2259. <https://doi.org/10.15159/AR.19.221>
- García-Sánchez, E. I., Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., y Aguilar-Ávila, J. (2019). Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81), 1–24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr15-81.sima>
- Jara-Rojas, R., Canales, R., Gil, J.M., Engler, A., Bravo-Ureta, B., Bopp, C. (2020). Technology Adoption and Extension Strategies in Mediterranean Agriculture: The Case of Family Farms in Chile. *Agronomy*, 10(5), 692. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050692>

Khumairoh, U., Lantinga, E. A., Suprayogo, D., Schulte, R. P. O., & Groot, J. C. J. (2019). Modifying the farmer field school method to support on-farm adaptation of complex rice systems. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 25(3), 227–243. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2019.1604391>

Kouassi, G. F., Koné, G. A., Good, M., & Kouba, M. (2019). Factors Impacting Guinea Fowl (*Numida meleagris*) Production in Ivory Coast. *Journal of Applied Poultry Research*, 28(4), 1382–1388. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz079>

Mercado, F., Ayala-Garay, A. V., Flores-Trejo, A., Oble-Vergara, E., y Almaguer-Vargas, G. (2019). Factores que influyen en la adopción de innovaciones en productores de naranja en Álamo, Veracruz. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 16(2), 183–198. <https://doi.org/10.22231/asyd.v16i2.1006>

Miranda, D. (2020). *Mango (Mangifera indica): Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Corredor Tecnológico Agroindustrial, CTA-2. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36827>

Navarro-Niño, D. A., Moreno-Elcure, F., Jaramillo-Barrios, C. I., Garnica-Montaña, J. P. and Villamil-Carvajal, J. E. (2023). Exploring adoption factors of innovations in arracacha crop: A case study in Cajamarca, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 41(3), e111345. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n3.111345>

Navarro-Niño, D. A., Villamil, J. E., Garnica, J. P., y Jaramillo-Barrios, C. I. (2022). Evaluación de un enfoque modificado de escuelas de campo en la apropiación de conocimientos en agricultores de arracacha. *Ciencia y Agricultura*, 19(3), 1-16. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n3.2022.14721>

Orjuela-Castro, J. A., Herrera-Ramírez, M. M., & Adarme-Jaimes, W. (2017). Warehousing and transportation logistics of mango in Colombia: A system dynamics model. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(44), 73–86. <https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n44.2017.5773>

Ramírez, L., Alvarado, H. E., Santoyo-Cortés, V. H., Olivares-Gutiérrez, R., Estrada-Chavira, M. E., y Escamilla-García, P. E. (2022). Dinámica de la innovación en la producción de jitomate bajo invernadero en Amacuitlapilco, Jonacatepec, Morelos. *Revista de Geografía Agrícola*, 68, 63–75. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2022.68.04>

Ramírez-Gómez, C. J., Rodríguez, H., & Restrepo-Betancur, F. (2023). Farmer, learning and teaching: A cluster analysis of technology adopters in avocado farming in Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1), Article 006. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4434>

Rizzo, G., Migliore, G., Schifani, G., & Vecchio, R. (2023). Key factors influencing farmers' adoption of sustainable innovations: a systematic literature review and research agenda. *Organic Agriculture*,

1-28. <https://doi.org/10.1007/s13165-023-00440-7>

Rogers, E. M., Singhal, A., & Quinlan, M. M. (2019). Diffusion of innovations. In *An Integrated Approach to Communication Theory and Research*. Routledge. Third Edition. <https://doi.org/10.4324/9780203710753-35>

Rubiano-Charry, K. D., Ciro-Velásquez, H. J., y Aristizábal-Torres, I. D. (2019). Aprovechamiento de los subproductos del mango, como fuente de compuestos bioactivos, para la elaboración de rollos comestibles. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1078>

Sánchez-Sánchez, A., Santoyo-Cortés, V.H., De La Vega-Mena, M., Muñoz-Rodríguez, M., y Martínez-González, E.G. (2020). Adopción de innovaciones y factores asociados en empresas familiares agropecuarias y agroindustriales de México. *Estudios Gerenciales*, 36(154), 43–55. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2020.154.3424>

Sennuga, S. O., Baines, R. N., Conway, J., & Angba, C. W. (2020). Awareness and adoption of good agricultural practices among smallholder farmers in relation to the adopted villages programme: The case study of Northern Nigeria. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 10(6), 34–49. <https://doi.org/10.7176/JBAH/10-6-06>

Sierra, P. V., Varón-Devia, E. H., Rodríguez-Polanco, L., Parra-Alferes, E. B., Rojas, E. D., Martínez, E. P., y Hio, J. C.

(2023). Ofertas tecnológicas para el manejo de trips y antracnosis en mango (*Mangifera indica* L.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7406375>

Sosa, M. D., Rodríguez C., L. F., y Bermúdez C., L. T. (2012). Competitividad del sistema de producción de mango ‘Tommy Atkins’ en Cundinamarca (La Mesa, Anapoima y Tocaima). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 20–33. <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i1.1250>

Tewodros, B. N., Fredah, K. R. W., Wasuu, M. A., Willis, O. O., & Githiri, S. M. (2019). Mango (*Mangifera indica* L.) production practices and constraints in major production regions of Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 14(4), 185–196. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13608>

Tudela, J. W., Málaga-Luna, M., y Aliaga-Melo, G. (2021). Análisis de la adopción de innovaciones agrícolas en productores de quinua de Cabana, Puno Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 23(2), 93–102. <https://doi.org/10.18271/ria.2021.242>

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (UPRA). (2023). *Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) base agrícola 2021-2022*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva_2022.aspx

Yaseen, M., Thapa, N., Visetnoi, S., Ali, S., & Saqib, S. E. (2023). Factors Determin-

ing the Farmers' Decision for Adoption and Non-Adoption of Oil Palm Cultivation in Northeast Thailand. *Sustainability*, 15(2), 1595. <https://doi.org/10.3390/su15021595>

Yue, M., Li, W., Jin, S., Chen, J., Chang, Q., Glyn, J., Cao, Y., Yang, G., Li, Z., & Frewer,

L. J. (2023). Farmers' precision pesticide technology adoption and its influencing factors: Evidence from apple production areas in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(1), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.11.002>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

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



Fecha de recibido: 13-03-2024

Fecha de aceptado: 05-09-2024

DOI: 10.22490/21456453.7700

EVALUACIÓN DE CEPAS DE *Trichoderma spp.* PARA EL CONTROL DE *Phytophthora spp.* EN *Theobroma cacao L.* EN EL SUR DE COLOMBIA

EVALUATION OF *Trichoderma spp.* STRAINS FOR THE CONTROL OF *Phytophthora spp.* ON *Theobroma cacao L.* IN SOUTHERN COLOMBIA

Claudia Parra Cortes¹

Valentín Murcia Torrejano²

Alexandra Cerón Endo³

Guillermo Caicedo Díaz⁴

¹ MsC. Universidad Nacional de Colombia, Neiva, Colombia. claudia.parraco@unad.edu.co

²Estudiante de Agronomía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Neiva, Colombia. murciat@unadvirtual.edu.co

³ MsC. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Neiva, Colombia. aceronen@gmail.com

⁴ MsC. Universidad de Nariño, Neiva, Colombia. guillicadi@yahoo.es

Citación: Parra, C., Murcia, V., Cerón, A., y Caicedo, G. (2025). Evaluación de cepas de *Trichoderma spp.* para el control de *Phytophthora spp.* en *Theobroma cacao L.* en el sur de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 143 - 156.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7700>

RESUMEN

Contextualización: las enfermedades fungosas causan grandes pérdidas en la producción a escala mundial, la pudrición parda de la mazorca o mazorca negra es la enfermedad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) más importante, la cual es causada por varias especies de *Phytophthora*.

Vacío de conocimiento: en Colombia son pocos los estudios en el manejo de *Phytophthora* spp. en cacao. Se han realizado avances investigativos por parte de Agrosavia en otras regiones del país, pero se requiere de este tipo de estudios para control biológico en la zona de influencia del proyecto.

Propósito: el objetivo del presente estudio fue evaluar la efectividad de dos productos comerciales *Trichoderma viride* frente a la mezcla de *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma atroviride*, *Trichoderma harzianum* en el control de *Phytophthora* spp. en *T. cacao* en fincas de cacao orgánico en el sur de Colombia.

Metodología: se emplearon parámetros de evaluación para incidencia y severidad de *Phytophthora* spp. en plantaciones de *T. cacao* con producción orgánica. Enfermedad tratada con: T1: (*Trichoderma asperellum*, *Trichoderma atroviridae*, *Trichoderma harzianum*). Presentación polvo mojable PW. T2: (*Trichoderma viride*) presentación líquida suspensión concentrada SC. T3: Testigo, sin ninguna aplicación, en dos épocas de producción del año.

Resultados y Conclusiones: como resultados se encontró el género *Trichoderma* es efectivo para el control de *Phytophthora* spp., se identificó que la cepa el *T. viride* tiene mayor control biológico que la mezcla de *Trichodermas*

Palabras clave: control biológico, enfermedad fungosa, hongo, pudrición negra

ABSTRACT

Contextualization: Fungal diseases cause major production losses worldwide. Brown rot of the pod or black pod is the most important cocoa crop disease, which is caused by several species of *Phytophthora*.

Knowledge gap: There is little research on the management of *Phytophthora* spp. in cocoa in Colombia. Research advances have been made by Agrosavia in other regions of the country, but this type of study is needed

for biological control around influence of the project.

Purpose: The objective of the present study was to evaluate the effectiveness of two commercial products *Trichoderma viride* versus the mixture of *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma otroviride*, *Trichoderma harzianum* in the control of *Phytophthora* spp. on *T. cacao* in organic cocoa farms in southern Colombia.

Methodology: Evaluation parameters were used for incidence and severity of *Phytophthora* spp. in *T. cacao* plantations in organic cocoa farms. Disease treated with:

T1: (*Trichoderma asperellum*, *Trichoderma atroviridae*, *Trichoderma harzianum*). Presentation wettable powder PW. T2: (*Trichoderma viride*) liquid presentation concentrated suspension SC. T3: Control, without any application; in two periods of production of the year.

Results and conclusions: As result it was found that *Trichoderma* is effective for the control of *Phytophthora* spp., it was identified that *T. viride* has greater biologic control than the mixture of *Trichodermas*.

Keywords: biological control, black pod rot, fungal disease, fungi

RESUMEN GRÁFICO

El objetivo del presente estudio fue evaluar la efectividad de *Trichoderma viride* frente a la mezcla de *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma otroviride*, *Trichoderma harzianum* en el control de *Phytophthora* sp. en *T. cacao* en fincas de cacao orgánico en el sur de Colombia.

Incidencia y severidad de *Phytophthora* sp. en plantaciones de *T. cacao* en fincas de cacao orgánico. Enfermedad tratada con: T1: (*T. asperellum*, *T. atroviridae*, *T. harzianum*). Presentación polvo mojable PW, T2: (*T. viride*) presentación líquida Suspensión concentrada SC. T3: Testigo, sin ninguna aplicación; en dos épocas de producción del año.

Se encontró que el *Trichoderma* es efectivo para el control de *Phytophthora* sp.

Se identificó que el *T. viride* tiene mayor control que la mezcla de *Trichodermas*

Se identificó que el *T. viride* tiene mayor control que la mezcla de *Trichodermas*



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los cultivos industriales de mayor importancia en el mundo debido a su uso en la elaboración del chocolate, confiterías, productos cosméticos y farmacéuticos. Entre los países productores en la región sudamericana, Colombia es el quinto según la International Cocoa Organization (ICCO, 2022). El cultivo del cacao se ha convertido en una prioridad del gobierno colombiano, pues es uno de los cultivos que se promueven en el desarrollo de programas dirigidos a favorecer la paz en regiones de posconflicto y sustitución de cultivos anteriormente utilizados con fines ilícitos (Rodríguez-Medina *et al.*, 2019).

El departamento del Huila es el cuarto productor de cacao en Colombia, este se ubica en el sur del país y cuenta con condiciones agroecológicas propicias para el desarrollo del cultivo, haciéndolo un estado con una gran proyección de expansión del cultivo, en la actualidad hay sembradas cerca de 8.000 hectáreas de cacao, en su mayoría por pequeños productores, aproximadamente 2.500 familias distribuidas en los 35 de sus 37 municipios según FICCA (2023).

Las enfermedades fungosas causan grandes pérdidas en la producción de cacao a escala mundial, la pudrición parda de la mazorca o mazorca negra es la enfermedad del cacao más importante, es causada por varias especies de *Phytophthora*, las cuales causan daño significativo de hasta un 30% a las mazorcas y ocasiona la muerte de hasta un 10 % de los árboles anualmente (Perrine-Walker,

2020). Algunos de los agentes causales, como *P. palmivora*, están distribuidos globalmente, el género *Phytophthora* es un oomiceto hemibiotrófico, las dos principales especies de *Phytophthora* que causan enfermedades en el cacao son *P. palmivora* y *P. megakarya* (Marelli *et al.*, 2019). Infecta muchas partes de la planta de cacao, incluido el fruto, causando la enfermedad de la pudrición negra de la mazorca.

Los pequeños agricultores producen más del 80 % de toda la producción de cacao en sistemas agroforestales de cultivo intercalado o seminaturales (Perrine-Walker, 2020); lo cual implica una mayor humedad que favorece el desarrollo de la enfermedad causado por *Phytophthora spp.* Para su manejo ellos emplean fungicidas que impactan fuertemente en la microflora de los ecosistemas agrarios, destruyendo microbios benéficos como bacterias y hongos endófitos, así como animales importantes para la calidad de los suelos (Acurio y Montes, 2018; Ramos y Piñeda, 2020). Una alternativa de manejo es el uso de agentes de control biológico que son organismos vivos introducidos o residentes para contener o suprimir poblaciones de patógenos (Ferraz *et al.*, 2019).

Entre los biocontroladores estudiados para el manejo de enfermedades en cacao, el hongo del género *Trichoderma* ha mostrado un buen potencial de control biológico sobre *Moniliophthora roreri*, *P. megakarya* y *P. palmivora*. Se reporta que aplicaciones de *T. asperellum* combinado con aceites vegetales

lograron una protección contra *P. megakarya* de hasta el 55 % de los frutos (Peñahe rrera *et al.*, 2020). El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la efectividad de *T. viride* frente a la mezcla compuesta por tres

especies de *Trichoderma* (*T. asperellum*, *T. otroviride*, *T. harzianum*) para el control de *Phytophthora* spp. en *T. cacao* para los pequeños productores de Algeciras, Huila, sur de Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de estudio y sitio

Esta investigación es de tipo experimental en bloques al azar, realizada en el municipio de Algeciras, departamento del Huila, Colombia.

Se desarrolló en dos fincas productoras de cacao orgánico del estado de Huila, municipio de Algeciras, sur de Colombia, con

condiciones geoclimáticas descritas en la Tabla 1. Las cuales contaban con presencia de *Phytophthora* spp. Se reconoció en campo siguiendo los síntomas y escalas de severidad reportadas en la literatura. La madurez de las mazorcas se basó en la experiencia del productor, por observación, teniendo en cuenta características propia de cada clon como el tamaño y color de la mazorca.

Tabla 1.

Condiciones geoclimáticas sitios de estudio

Sitio	Altitud	Temperatura promedio	Precipitaciones	Coordenadas	Edad cultivo
Finca 1	1100 m.s.n.m	22°C	1.500 mm	2° 33' 15" W 75° 16' 59" N	18 años
Finca 2	1200 m.s.n.m	22°C	1.500 mm	2° 29' 57" W 75° 20' 59" N	25 años

Fuente: autores.

Para el estudio se empleó un diseño de bloques al azar con tres parcelas replicadas por tratamiento. Cada parcela tenía 50 árboles de cacao en un diseño de parcela similar al utilizado por Hidalgo *et al.* (2003). La unidad experimental estaba conformada por 18 árboles internos, que se usaron para evaluar los tratamientos y los 25 árboles circundan-

tes, aunque tratados, funcionaron para eliminar los efectos de borde. Las fincas evaluadas contaban con los clones de cacao: "EET 8, SCC 61, TSH 565, ICS 39, ICS 1, ICS 95, HIBRIDO, IMC 67, ICS 60 y CCN 51". En la Tabla 2 se detallan los tratamientos y las aplicaciones de los productos.

Tabla 2. Tratamientos empleados en el ensayo

Tratamientos	Ingrediente activo	Presentación	Dosis Utilizada, recomendada por el fabricante	Aplicaciones fase I	Aplicaciones fase II
Tratamiento 1	<i>Trichoderma asperellum, Trichoderma atroviridae, Trichoderma harzianum</i>	Polvo mojable PW	100 gramos/20 litros de agua	Durante tres semanas consecutivas, cada 8 días (13, 20 y 27 de diciembre) Época Seca-Temperatura 22 °C	Durante tres semanas consecutivas, cada 8 días (14, 21 y 28 de mayo) Época de lluvia-Temperatura 19 °C
Tratamiento 2	<i>Trichoderma viride</i>	Líquida suspensión concentrada SC	100 ml/20 litros de agua		
Testigo	Sin ninguna aplicación	N/A	N/A	Sin ninguna aplicación	Sin ninguna aplicación

Fuente: autores.

Los bioproductos comerciales usados en el presente ensayo cuentan con registro Ica vigente y por temas comerciales no se presenta su nombre o marca en el artículo.

Toma y procesamiento de datos

La recolección de datos se hizo durante tres semanas posterior a la aplicación final.

La incidencia de la enfermedad se calculó con la Ecuación 1:

$$\% \text{ Incidencia} = \frac{\text{No mazorcas enfermas}}{\text{Nº mazorcas sanas}} \times 100$$

Ecuación 1

Se consideró el estado de madurez de las mazorcas y el desarrollo de la enfermedad en mazorcas verdes y maduras.

La severidad externa se calculó en primer lugar, con base en el porcentaje de tejido afectado en el fruto, para esto en el Figura 1 se ajustó la escala propuesta por Villamil *et al.*, (2015) dada en grados y porcentaje de daño (Grado 1= 0 fruto sano; Grado 2= 1-25 protuberancia; Grado 3= 26-50 inicio de mancha; Grado 4= 51-75 mancha; Grado 5= 76-100 esporulación) y luego se empleó la Ecuación 2:

$$\text{Severidad} = \frac{\sum_i}{N} \times V_{max}$$

Ecuación 2

Donde:

\sum_i = Sumatoria grados de daño en porcentaje.

N = Número total de datos.

V_{max} = mayor dato del porcentaje de severidad de la escala.



Figura 1. Escala en grados y porcentaje de tejido afectado en el fruto por *Phytophthora* spp.

Fuente: autores.

Con los datos obtenidos en los bioensayos se obtuvo la incidencia y severidad. La comparación entre la fracción de mazorca sana y de los rendimientos de los diferentes tratamientos, se hizo por medio de la prueba de

Kruskal-Wallis, luego uso de la prueba post hoc Ranks para indicar las diferencias significativas observadas en el estudio, se utilizó el paquete estadístico InfoStat.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la incidencia de la enfermedad

Perrine-Walker (2020) reporta un estudio llevado a cabo en 12 genotipos diferentes de cacao, demostrando que las zoosporas germinativas de *P. palmivora* podían penetrar a través de las estomas, la base de los pelos epidérmicos, la cicatriz y por penetración directa en las mazorcas. Este estudio también ratifica lo encontrado en campo en la presente investigación y expuesto en la escala de severidad, que los síntomas comienzan con una mancha relativamente concéntrica

de color marrón o negra en la mazorca que se extiende hasta cubrir toda la mazorca.

Al observar la incidencia en las dos etapas de evaluación, Fase I y Fase II, las mazorcas maduras evaluadas presentaban menor incidencia de *Phytophthora* spp., su afectación fue mayor en las mazorcas verdes Fase I (10,2 %) y Fase II (18,6 %), recordemos que para una mejor comprensión del comportamiento del patógeno es necesario evaluar los dos estados (mazorcas verdes y maduras), el porcentaje de frutos maduros infectados en el campo está determinado no sólo por la resistencia del fruto a la infección, sino también por fenómenos de escape, como el

ciclo de fructificación el cual suele explicar alrededor del 43 % del variación en el nivel de infección (Rodríguez y Vera, 2015).

Respecto a la incidencia presentada en la Tabla 4 se realizó la prueba de Kruskal-Wallis con la totalidad de las mazorcas (verdes y maduras) identificando que en la primera fase no presentó diferencias significativas. En el análisis de la fase II el tratamiento 2 Líquido presenta una menor incidencia, indicando una diferencia significativa con los demás tratamientos (Figura 2), demostrando que el *T. viride* tiene una alta efectividad para el control *Phytophthora* spp.; lo que concuerda

con el ensayo realizado en Camerún en parcelas con árboles de *T. cacao* de 50 años con presencia de *P. megakarya*, los cuales fueron tratados con una formulación a base de aceite de *T. asperellum* PR11 y comparado con un fungicida químico, donde *T. asperellum* PR11 proporcionó una protección más consistente y duradera de las mazorcas de cacao en las parcelas experimentales (Mbarga *et al.*, 2020). Así como Villamil *et al.* (2015) menciona que el control biológico no elimina a los patógenos, sino que reduce las poblaciones de este, y como consecuencia reduce la incidencia de la enfermedad, como se observa en nuestro ensayo.

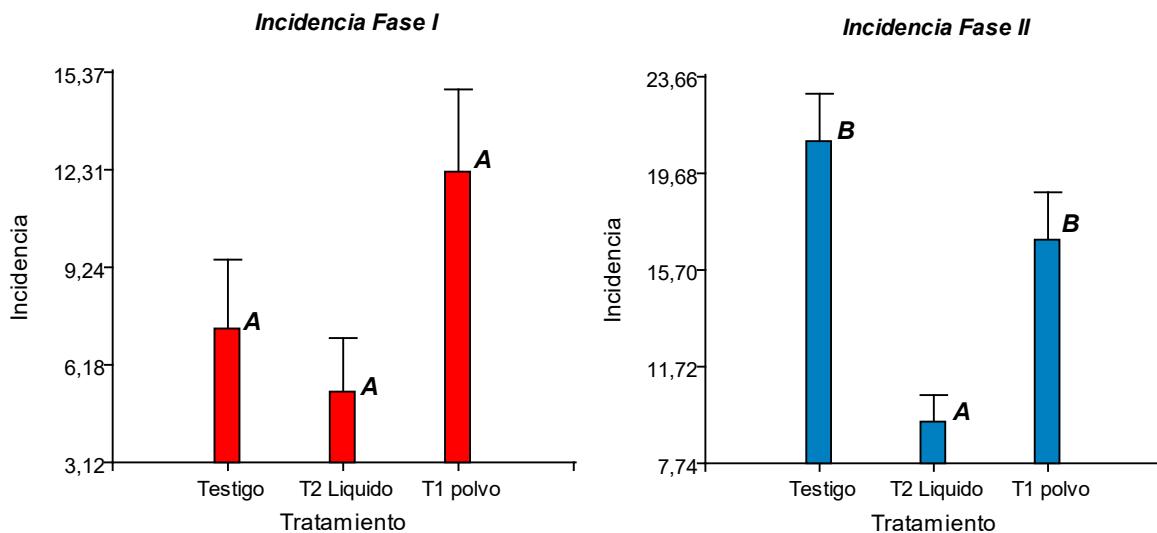


Figura 2. Respuesta a los tratamientos evaluados Fase I y Fase II. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Fuente: autores.

Análisis de severidad de la enfermedad

Se evaluó la severidad *Phytophthora* spp. luego de la aplicación de los tratamientos

para establecer su eficacia, se valoró la plantación en dos fases diferentes empleando la escala descrita en la metodología, determinando valores de 1 a 5 según el porcentaje de avance de la enfermedad. La Tabla 3 presen-

ta el análisis con Kruskal-Wallis al 5% para la fase I y fase II se muestra un mayor control

el tratamiento T2 Líquido, corresponde a *T. viride* en presentación líquida SC.

Tabla 3.

Efecto de los tratamientos evaluados sobre la severidad externa de *Phytophthora* spp. en frutos de cacao en condiciones de campo. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tratamiento	Fase I	Fase II
T2 Líquido	12,97 A	15,14 A
Testigo	29,97 AB	75,86 B
T1 Polvo	34,72 B	35,63 AB

Fuente: autores.

Tabla 4.

Prueba de Kruskal-Wallis para la incidencia de *Phytophthora* spp en plantas de cacao tratadas con *Trichoderma* spp. en presentación en polvo y líquido en dos épocas de producción fase I y Fase II

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tratamiento	Fase I						H	p
		N	Medias	D.E.	Medianas				
Severidad	T1 polvo	6	34,72	20,99	35,97			4,78	0,0915
Severidad	T2 Líquido	6	12,97	13,29	7,84				
Severidad	Testigo	6	29,97	17,17	25,35				

Tratamiento	Medias	Ranks
T2 Líquido	12,97	5,67 A
Testigo	29,97	10,83 A
T1 polvo	34,72	12 B

Fase II							
Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Severidad	T1 polvo	6	35,63	21,65	35,09	7,94	0,0189
Severidad	T2 Líquido	6	15,14	8,74	17,18		
Severidad	Testigo	6	75,86	44,74	76,83		

Tratamiento	Medias	Ranks	
T2 Líquido	15,14	5,33	A
Testigo	35,63	9,17	A B
T1 polvo	75,86	14	B

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

Fuente: autores.

Al analizar los tratamientos empleados: T1: (*T. asperellum*, *T. atroviridae*, *T. harzianum*) en presentación polvo mojable PW y T2: (*T. viride*) presentación líquida Suspensión concentrada SC. Los dos tratamientos incidieron en reducir la severidad (Tabla 4), siendo el tratamiento T2: (*T. viride*) el que presentó mayor control sobre el patógeno de estudio, lo que concuerda con Sriwati *et al.* (2019) quienes observaron que *T. virens* redujo hasta en 40,6 % la infección en los frutos de cacao infectados con *P. palmivora* hasta la semana 12 después de la aplicación.

En estudio hecho por Barboza-García *et al.* (2022) con los hongos *T. viride* y *T. harzianum* presentaron un efecto antagónico significativo contra el crecimiento *in vitro* de *P. cinnamomi*. Estas dos especies presentan diversos mecanismos para el control de patógenos como el desarrollo de compuestos orgánicos volátiles, enzimas específicas como polifenol oxidasa, quitinasas y glucanasas que afectan el crecimiento de los hon-

gos fitopatógenos. Por lo que el *Trichoderma* spp. se convierte en una alternativa biológica para el manejo y control de enfermedades como *Phytophthora* spp. en cultivos de interés económico como el cacao.

La Spada *et al.* (2020) evaluaron la capacidad de dos cepas seleccionadas de *T. asperellum* y *T. atroviride* para el control *P. nicotianae*. En donde identificaron que la cepa de *T. atroviride* tiene una alta capacidad antagónica en el control biológico de la pudrición de raíz y corona causado por *P. nicotiana*, confirmando que *Trichoderma* spp. puede ser una herramienta eficaz en las estrategias de manejo integrado de enfermedades.

Coincidimos con lo propuesto por Ndoungue *et al.* (2018) en que, para aumentar la eficiencia del control de la podredumbre negra de la mazorca del cacao, el uso de *Trichoderma* no debería restringirse su aplicación únicamente a las mazorcas, sino que también debería dirigirse al reservorio primario

de inóculo que es el suelo y ser parte de una estrategia de control verdaderamente integrada.

Aunque no se presenta en este trabajo, el análisis de rendimiento de los árboles tratados con el bioproducto, este aumentó en 100 kilogramos de cacao en baba recolectados aproximadamente en los tratamientos T1 y T2.

El manejo de las enfermedades causadas por *Phytophthora* spp. en *T. cacao* se lleva a cabo mediante la selección de genotipos, controles culturales y químicos; el control biológico, poco explorado, es donde el *Tri-*

choderma es un buen aliado (Marelli *et al.*, 2019). Lo anterior plantea la necesidad de desarrollar alternativas para el control de la enfermedad bajo la normativa de la producción orgánica (Ramos y Pineda, 2020). Los productos para control biológico deben demostrar que son inocuos para las personas o los animales, fácilmente degradables para que su prevalencia en los ecosistemas agrícolas no suponga un riesgo por acumulación en el tiempo, y no ecotóxicos para que puedan priorizar las funciones ecosistémicas (Ferraz *et al.*, 2019).

4 CONCLUSIONES

En campo el control biológico con el tratamiento T2: (*T. viride*) es apropiado al presentar mayor control biológico sobre el patógenos de estudio, recordemos que en campo *Phytophthora* spp. se puede controlar con fungicidas, lo que genera costos económicos y ambientales para los productores. Por lo que el control biológico es una alternativa viable acompañada del control cultural como la recolección de frutos y restos vegetales enfermos que son fuente de inóculos; manejo de poda, el manejo de arvesnes y drenajes para la reducción de la alta humedad y evitar el exceso de agua.

Con estos reportes se puede concluir que las diferentes cepas de *Trichoderma* tienen efecto control sobre *Phytophthora* spp. También se debe considerar lo dicho por Rodríguez-Medina *et al.* (2019) quienes indican que, en Colombia es necesario realizar

mayores esfuerzos para mejorar el nivel de resistencia de los clones de cacao entregadas a los agricultores, ya que algunos de los clones de mayor rendimiento parecen ser susceptibles por lo menos a una de las principales enfermedades (*Moniliasis* o *Phytophthora*) que afectan al país. En este sentido, la resistencia genética varietal sigue siendo la opción más económica y ambientalmente sostenible para el manejo de esta (Peñahe rrera *et al.*, 2020).

Finalmente, se resalta que las fincas del estudio cuentan con la certificación orgánica de Mayacert y Ecocert Organic Standard, es de señalar que depende del tipo de mercado al cual va dirigido el cacao se es permitido el uso de productos como *Trichoderma* spp. El auditor evalúa la viabilidad del insumo con ficha técnica, hoja de seguridad, registro ICA y declaraciones del fabricante.



CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Claudia Parra Cortes: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura. **Valentín Murcia Torrejano:** metodología, investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura,

borrador original. **Alexandra Cerón Endo:** administrador del proyecto, supervisión conceptualización, escritura, revisión y edición. **Guillermo Caicedo Díaz:** análisis de datos, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

A los productores de la Asociación de Cacaoteros del municipio de Algeciras APROCALG, quienes permitieron el desa-

rrollo de la investigación y el ingreso a sus fincas. Al grupo de investigación INYUMACIZO.

FINANCIAMIENTO

El artículo se originó del proyecto PIE N.2021/00113/001 aprobado en Convocatoria 2 Cohorte 1 de 2021 de la

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

LITERATURA CITADA

Acurio, O. K., y Montes, D. J. (2020). *Aplicación de los biofungicidas orgánicos en el control de la mazorca negra (*Phytophthora spp.*) en cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en el cantón valencia* [Tesis de grado]. La Maná, Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)

Barboza-García, Adrián, Pérez-Cordero, Alexander, y Anaya-Chamorro, Leonardo. (2022). Especies nativas de *Trichoder-*

ma aisladas de plantaciones de aguacate con actividad inhibitoria contra *Phytophthora cinnamomi*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 101-116. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1852>

Feria Internacional de Café, Cacao y Agroturismo. (FICCA). (2023). *El Huila Cacaotero*.

Ferraz P, Cássio, F. and Lucas, C. (2019) Potential of Yeasts as Biocontrol Agents of the Phytopathogen Causing Cacao Witches' Broom Disease: Is Microbial Warfare a Solution? *Front. Microbiol.* 10:1766. 10.3389/fmicb.2019.01766

Hidalgo, E., Bateman, R., Krauss, U., Ten Hoopen, M. y Martínez, A. (2003). A field investigation into delivery systems for agents to control *Moniliophthora roreri*. *European Journal of Plant Pathology*, 109(9), 953-961. <http://doi.org/10.1023/B:EJPP.0000003746.16934.e2>

International Cocoa Organization. (ICCO). (2022). *Reporte anual de estadística del cacao*. <http://www.icco.org/>

La Spada, F., Stracquadanio, C., Riolo, M., Pane, A., & Cacciola, SO (2020). *Trichoderma Counteracts the Challenge of Phytophthora nicotianae Infections on Tomato by Modulating Plant Defense Mechanisms and the Expression of Crinkler, Necrosis-Inducing Phytophthora Protein 1, and Cellulose-Binding Elicitor Lectin Pathogenic Effectors*. *Front. Plant Sci.* 11:583539. <http://doi.org/10.3389/fpls.2020.583539>

Mbarga, J. B., Begoude, B. A. D., Ambang, Z., Meboma, M., Kuaté, J., Ewbank, W., & Ten Hoopen, G. M. (2020). Field testing an oil-based Trichoderma asperellum formulation for the biological control of cacao black pod disease, caused by *Phytophthora megakarya*. *Crop protection*, 132, 105134. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105134>

Marelli, J. P., Guest, D. I., Bailey, B. A., Evans, H. C., Brown, J. K., Junaid, M., ... & Puig, A. S. (2019). *Chocolate under threat from old and new cacao diseases*. *Phytopathology*, 109(8), 1331-1343. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-18-0477-RVW>

Ndoungue, M., Petchayo, S., Techou, Z., Nana, W. G., Nembot, C., Fontem, D., & Ten Hoopen, G. M. (2018). The impact of soil treatments on black pod rot (caused by *Phytophthora megakarya*) of cacao in Cameroon. *Biological Control*, 123, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.04.016>

Peñaherrera, S., Cedeño, G., Solórzano, F., Cedeño-García, G., y Terrero, P. (2020). Eficacia de mezclas de *Trichoderma spp.* y aceite de palma en el manejo de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en cacao. *Centro Agrícola*, 47(2), 5-15.

Perrine-Walker, F. (2020). Interacción *Phytophthora palmivora*-cacao. *Journal of Fungi*, 6(3), 167. <http://doi.org/10.3390/jof6030167>

Ramos Z., B. A., y Pineda, R. (2020). *Efecto de fungicidas minerales aplicados al fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*) para el control de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora**. ZAMORANO6729: Escuela Agrícola Panamericana, 2020. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6729>

Rodríguez, P. E., y Vera, R. A. G. (2015). Identificación y manejo de la pudrición parda de la mazorca (*Phytop*-

phthora sp.) en cacao. Corpoica. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.88841>

Rodríguez-Medina, C., Arana, A. C., Sounigo, O., Argout, X., Alvarado, G. A., & Yockteng, R. (2019). Cacao breeding in Colombia, past, present and future. *Breeding Science*, 69(3), 373-382. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19011>

Sriwati, R., Chamzurni, T., Soesanto, L. And Munazhira, H. (2019). Field Application of Trichoderma Suspension to Control

Cacao Pod Rot (*Phytophthora palmivora*). *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 41(1), 175-182.

Villamil, J., Viteri, S. y Villegas, W.. (2015). Aplicación de Antagonistas Microbianos para el Control Biológico de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en *Theobroma cacao L.* Bajo Condiciones de Campo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7441-7450. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47830>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 14-03-2024

Fecha de aceptado: 25/06/2024

DOI: 10.22490/21456453.7822

BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ Y RAQUIS DE PALMA CON POTENCIAL PARA USO AGRÍCOLA EN EL TRÓPICO SECO

COFFEE PULP AND PALM RACHIS BIOCHAR WITH POTENTIAL FOR AGRICULTURAL DRY TROPICS USE

Sonia Esperanza Aguirre Forero¹

José Villa Parejo²

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica³

¹ Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.
saguirre@unimagdalena.edu.co

² Magister en Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.
jvilla@unimagdalena.edu.co

³ Doctor en Ciencias Agropecuarias, Universidad del Magdalena, Santa Marta,
Colombia. npiraneque@unimagdalena.edu.co

Citación: Aguirre, S., Villa, J., y Piraneque, N. (2025). Biocarbón de pulpa de café y raquis de palma con potencial para uso agrícola en el trópico seco. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 157 - 183. <https://doi.org/10.22490/21456453.7822>

RESUMEN

Contextualización: la caracterización y análisis de biocarbón derivado de raquis de palma y pulpa de café es fundamental para aprovechar adecuadamente los residuos orgánicos, además es trascendental para el desarrollo de obtención de materiales promisorios para el manejo del suelo del trópico seco. La investigación se orientó a caracterizar biocarbón obtenido de la biomasa de Pulpas de Café y el Raquis de Palma, variando la temperatura de pirólisis en 250, 300 y 350 °C en un horno mufla de 64 litros.

Vacío de conocimiento: los estudios de caracterización y análisis de biocarbón en la región Caribe son escasos, lo que resalta la necesidad de realizar estudios para recopilar información que pueda mejorar la comprensión, el proceso, el manejo y la aplicación del biocarbón como mejorador de suelos en esta área.

Propósito: el objetivo fue evaluar contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa y caracterizar el biocarbón obtenido (Dr, retención de humedad, pH, CE, CIC y contenido de nutrientes).

Metodología: el análisis de los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa se realizó utilizando los métodos de fibra detergente ácida (ADF) y lignina detergente ácida (ADL), y la caracterización del biocarbón, retención de humedad, pH (1:2) por potenciometría, conductividad eléctrica (CE) conductímetro, densidad real (Dr), contenidos totales de K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Bo, Cu, Zn y Si, por digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica.

Resultados y conclusiones: se evidenció que el biocarbón obtenido de la pulpa de café (BPT1, BPT2 y BPT3) respecto a los parámetros evaluados es más favorable para la producción agrícola en comparación con los biocarbón de raquis de palma (BRT1, BRT2 y BRT3). El BPT1 presentó diferencia en su contenido nutricional, no obstante, es crucial enfatizar que es una enmienda física, química y orgánica.

Palabras clave: enmienda, nutrientes, pirólisis, secuestro de carbono, suelos agrícolas

ABSTRACT

Contextualization: The characterization and analysis of biochar derived from palm rachis and coffee pulp is fundamental to take advantage of organic residues; in addition, adequately, it is transcendental for the development of obtaining promising materials for soil management in the dry tropics. The research was oriented to characterize biochar obtained from coffee pulp and palm rachis biomass, varying the pyrolysis temperature at 250, 300, and 350 °C in a 64-liter muffle furnace.

Knowledge gap: Characterization and analysis studies of biocarbon in the Caribbean region are scarce, highlighting the need for research to gather information that can enhance the understanding, process, management, and application of biocarbon as a soil amendment in this area.

Purpose: The objective was to evaluate lignin, cellulose, and hemicellulose contents and to characterize the biochar obtained (Dr, moisture retention, pH, EC, CEC, and nutrient content).

Methodology: The analysis of lignin, cellulose, and hemicellulose contents was conducted using the acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignin (ADL) methods, while the characterization of biocarbon (moisture retention, pH (1:2) by potentiometry, electrical conductivity (EC) by conductometry, real density (Dr), total contents of K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B, Cu, Zn, and Si by acid digestion and atomic absorption spectrophotometry) was carried out.

Results and conclusions: It were found that the biochar obtained from the coffee pulp (BPT1, BPT2, and BPT3) is more favorable for agricultural production concerning the parameters evaluated than biochar from palm rachis (BRT1, BRT2, and BRT3). BPT1 presented a difference in its nutritional content; however, it is crucial to emphasize that it is an amendment.

Keywords: agricultural soils, amendment, carbon sequestration, nutrients, pyrolysis

RESUMEN GRÁFICO



Diagrama del proceso desarrollado para evaluar la composición fisicoquímica del biocarbón obtenido de los raquis de palma de aceite y pulpa de café

Fuente: autores.

① INTRODUCCIÓN

En Colombia, el sector agrícola genera residuos durante sus procesos productivos, el raquis de palma y la pulpa de café, muchas veces se acumulan en el suelo lo que en ocasiones afecta el ambiente debido a la concentración de sustancias tóxicas como fenoles y polifenoles (Serna-Jiménez *et al.*, 2018; Hoseini *et al.*, 2021), no obstante, en

algunas zonas palmeras el raquis se usa como combustible de calderas y en otras es desechado. Los residuos agroindustriales son fuente potencial de energía renovable, en especial aquellos que presentan contenidos de hemicelulosa, celulosa y lignina (Cheng *et al.* 2020) y su pirólisis, es una alternativa de solución para el manejo (Biswas *et al.*, 2017).

La fracción sólida carbonosa, consecuencia de pirólisis de biomasa en ausencia de oxígeno y temperaturas altas, se denomina biocarbón (Rajendiran *et al.*, 2023; Lehmann y Joseph, 2015), producto con una amplia gama de aplicaciones entre las que se destacan: secuestro de C del suelo (Aguirre *et al.*, 2023), reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Brassard *et al.*, 2016; Dissanayake *et al.*, 2020), coadyuvante en la fertilidad del suelo (Ding *et al.*, 2016; Biederman y Harpole, 2013), remediador de contaminantes (Beiyuan *et al.*, 2020; Omondi *et al.*, 2016), hidro retenedor, entre otras.

Sin embargo, las características del biocarbón se alteran según el tipo de biomasa y temperaturas de procesamiento. Su uso y aplicación depende de las propiedades que presente el producto (Lehmann y Joseph, 2015), por lo que es necesario analizar la composición de la biomasa que se someterá a pirólisis y el producto resultante (biocarbón). Además, también es importante estudiar y validar sus características, comportamientos y efectos en distintos contextos, tales como diferentes tipos de suelos, climas y prácticas agrícolas específicas.

En estudios previos se han reportado diversas características de biocarbones obtenidos de distintas biomassas mediante pirólisis a diferentes temperaturas. Por ejemplo, Sukartono *et al.* (2011) encontraron que el biocarbón de cáscara de coco pirolizado entre 190-280°C tiene un pH de 9,9, conducti-

vidad eléctrica (CE) de 1,75 dS m⁻¹, contenido total de carbono del 80,59% y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 11,78 cmol₍₊₎ kg⁻¹. En contraste, Abrishamkesh *et al.* (2015) evidenciaron que la cáscara de arroz pirolizada entre 250-300°C tiene pH de 7,4 y CE de 0,36 dS m⁻¹, mientras que a 450-500°C, el pH aumenta a 8,4 y la CE a 0,48 dS m⁻¹. Zhang *et al.* (2015) descubrieron que el biocarbón de jacinto de agua tiene pH que varía de 7,24 a 10,49 y CIC que varía de 9,3 a 21,95 cmol₍₊₎ kg⁻¹, dependiendo de la temperatura de pirólisis que osciló entre 250-550°C. Finalmente, Pituya *et al.* (2017) reportaron que el biocarbón de madera de acacia pirolizado a 300°C tiene pH de 5,0, contenido total de carbono del 67,56% y CIC de 127,45 cmol₍₊₎ kg⁻¹, mientras que a 400°C y 500°C, estos valores cambian a 6,2 y 7,7 para el pH, 68,68% y 73,26% para el contenido de carbono y 96,81 y 64,40 cmol₍₊₎ kg⁻¹ para la CIC, respectivamente.

Lo anterior muestra como la temperatura de pirólisis y el tipo de biomasa influyen significativamente en las características del biocarbón generado, por esta razón, los objetivos del presente estudio fueron: determinar la composición de los residuos orgánicos de pulpa de café y raquis de palma en el departamento del Magdalena, y caracterizar el biocarbón obtenido a partir de estos con el fin de orientar el uso en el sector agrícola asociado a zonas secas.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de la biomasa

Para la producción de biocarbón se seleccionaron residuos orgánicos de pulpa de café y raquis de Palma de aceite provenientes del sector cafetero y palmero del departamento de Magdalena. La pulpa de café fue proporcionada por la finca El Recuerdo, ubicada en el corregimiento de Minca, Sierra Nevada de Santa Marta, y el raquis de palma de aceite fue facilitado por la empresa extractora Palmaceite S.A., localizada en el Km. 49 vía Ciénaga – Fundación. La biomasa se expuso al sol 48 horas, luego fue triturada y posteriormente tamizada a fin de obtener un tamaño de partícula mínimo de acuerdo con lo argumentado por Tsai *et al.* (2018); parámetro importante, ya que un tamaño grande podría disminuir la eficiencia de la transferencia de calor desde la superficie hasta su núcleo (Tripathi *et al.*, 2016). El contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de los residuos orgánicos se analizó utilizando los métodos de fibra detergente ácida (ADF) y lignina detergente ácida (ADL) (ISO, 2008).

Producción de biocarbón

Se empleó el método de pirólisis asistida por hornomufla para realizar la transforma-

ción de la biomasa y producir biocarbón, siendo utilizadas tres temperaturas de 250, 300 y 350 °C. Así mismo, se utilizó una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹ y se mantuvo a la temperatura máxima durante una hora tal como lo describe Igalaithana *et al.* (2019), obteniendo tres tratamientos. Se calculó el rendimiento de producción de cada tratamiento (biocarbón) utilizando la Ecuación 1 proporcionada por Rehrah *et al.* (2014).

$$\text{Rendimiento de biomasa (\%)} = (\text{MBc}/\text{MBm}) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde MBc corresponde a la masa del biocarbón obtenido y MBm corresponde a la masa seca de las biomasas utilizadas para la producción del biocarbón.

Caracterización del biocarbón

Se determinaron los parámetros descritos en la Tabla 1 para cada una de las calidades de biocarbón obtenido siguiendo los argumentos de Singh *et al.* (2019).

Tabla 1.

Parámetros fisicoquímicos evaluados a los biocarbonos

Parámetro	Método
Humedad (%)	40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167
pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167
Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167
Retención de humedad (%)	Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167
Cenizas (%)	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167
Pérdidas por volatilización (%)	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167
Capacidad de intercambio catiónico (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167
Densidad real (gcm ⁻³)	Directo / Gravimétrico / NTC 5167
Carbono orgánico oxidable (%)	Sol. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167
Relación C/N	Relación matemática
Fosforo total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimetría / NTC 234
Nitrógeno total (%)	Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167/ NTC 370
Potasio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ NTC 202
Calcio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Azufre total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167/ NTC 1154
Magnesio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Hierro total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Manganoso Total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Cobre total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Zinc total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Boro total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167/ NTC 1860
Sodio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ NTC 1146/ EPA7000B

Fuente: autores.**Análisis estadístico**

Todas las pruebas se examinaron por triplicado mientras que los datos se analizaron

con un modelo lineal de análisis de varianza (ANOVA) para cada variable de interés usando la función “lm”; seguido a esto, se realizó prueba post hoc de Duncan para

identificar específicamente qué grupos difieren entre sí, empleando la función “duncan.test”; por último, se estableció correlación de Spearman entre las variables que mostraron

diferencias significativas, la cual fue graficada utilizando la librería corrplot. Todos los análisis fueron realizados en el software RStudio 2023.12.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La relación C/N de las biomasas evaluadas se situó en 93 ± 7.25 para raquis y en 24 ± 3.25 para pulpa de café. La Figura 1 muestra los porcentajes de lignina, hemicelulosa y celulosa encontrados en las biomasas de pulpa de café y raquis de palma. Se evidencia que, en ambas biomasas, la celulosa es el componente más abundante, seguida de la hemicelulosa en el raquis de palma y de la lignina en

la pulpa de café. El raquis de palma presenta un contenido medio de celulosa (46,47%) y hemicelulosa (23,99%), superando los valores de la pulpa de café, que tiene un 29,11% de celulosa y un 12,01% de hemicelulosa. En cuanto al contenido de lignina, la pulpa de café presenta un 17,86%, superando al raquis de palma (7,05%).

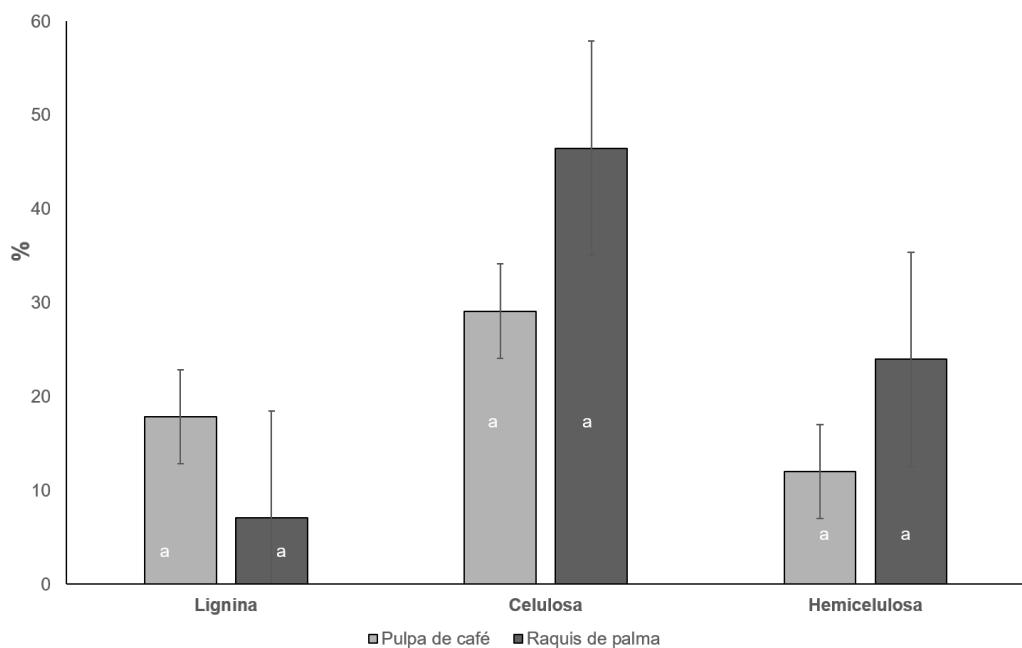


Figura 1. Contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa encontrados en raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Fuente: autores.

Respecto a la pulpa de café, las cantidades de lignina, celulosa y hemicelulosa presentaron valores diferentes a los reportados por otras investigaciones. En este estudio, la pulpa de café contenía 17,86% de lignina, 29,11% de celulosa y 12,01% de hemicelulosa. En comparación, Opedun *et al.* (2023) reportaron 35,3% de lignina, 40,1% de celulosa y 20,62% de hemicelulosa. Paredes *et al.* (2022) encontraron 21,04% de lignina, 20,33% de celulosa y 17,35% de hemicelulosa. Por su parte, Veiga *et al.* (2017) reportaron 29,55% de lignina. Las diferencias observadas pueden atribuirse a variaciones en los métodos de análisis, el tipo y estado de la biomasa, las condiciones climáticas o de la estación de cosecha y los métodos de cultivo, entre otros factores (Paredes *et al.*, 2022).

En el raquis de palma, se presentaron diferencias en los contenidos lignocelulósicos respecto a otros reportes. En el análisis realizado, se encontró que el raquis de palma contenía 23,99% de hemicelulosa, 46,47% de celulosa y 7,05% de lignina. Distintos a los resultados de Lee *et al.* (2017), quienes encontraron 14,20% de hemicelulosa, 27,51% de celulosa y 58,30% de lignina. Por otro lado, los contenidos de celulosa y hemicelu-

losa obtenidos son muy similares a los reportados por Ma *et al.* (2015), quienes encontraron 23,82% de hemicelulosa, 33,03% de celulosa y 45,59% de lignina. Se observa en ambos reportes una notable disparidad en el contenido de lignina, superior a 30 puntos porcentuales. Al igual que el caso anterior, la pulpa de café varía respecto a los resultados diferencia que se atribuye a la fuente de biomasa y métodos de análisis (Lee *et al.*, 2017).

Con respecto al rendimiento (porcentaje de biocarbón producido a partir de una cantidad determinada de biomasa), obtenido a partir de la Ecuación 1, se observaron disparidades significativas. El biocarbón obtenido de la pulpa de café, con un rendimiento del 70,2% en BPT1, destacó como el de mayor eficiencia, seguido por BPT2 (60,6%) y BPT3 (48,2%). En contraste, los rendimientos de los biocarbonos derivados del raquis de palma fueron considerablemente menores, con BRT1 alcanzando el 33,3%, seguido por BRT2 (26,7%) y BRT3 (20%). Se evidenció una relación inversa entre la temperatura de pirólisis y el rendimiento, reflejada en la disminución progresiva de este último a medida que aumenta la temperatura (Tabla 2).

Tabla 2.

Rendimientos de biocarbonos obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Biocarbón	MBc (kg)	MBm (kg)	Rendimiento (%)
BPT1	4	5,7	70,2 f
BPT2	4	6,6	60,6 e
BPT3	4	8,3	48,2 d

BRT1	4	12	33,3 c
BRT2	4	15	26,7 b
BRT3	4	20	20,0 a

BP- Biocarbón pulpa de café; BR- Biocarbón pulpa de Raquis; MBc – Masa biocarbón; MBm–biomasa

Fuente: autores.

En la Tabla 3, se observan los resultados respecto a humedad, donde el mayor registro lo presentó el biocarbón de raquis de palma BRT1 (4,6 %), seguido del BRT2 y BRT3 con 3.59 y 3.19 respectivamente, superando al biocarbón de pulpa de café. Ameloot *et al.* (2013) reportan que un alto contenido de humedad en los biocarbonos ayuda a retener más agua y crea un ambiente adecuado para la actividad microbiana y el crecimiento de las plantas.

No se presentó diferencia significativa por pérdidas de volatilización; el valor más alto en la variable lo mostró el BPT2 con 87,6 %.

En lo referente a cenizas, se encontró que BPT3 presentó mayor contenido (33,3 %), seguido de BRT1 (23,1%), BPT1, BRT2 y BRT3 con valores similares (13 -14%) y, por último, el menor porcentaje fue reportado por BPT2 con 10,2%. Investigaciones anteriores informaron que el contenido de cenizas de los biocarbones juega un papel importante en la adsorción de metales (Yuan *et al.*, 2019); además, esta es rica en potasio, calcio y magnesio, que son adecuados para el crecimiento de las plantas (Berek y Hue, 2016; Weyers y Spokas, 2014) y contribuyen a la adsorción y degradación de contaminantes (Shackley *et al.*, 2012).

Tabla 3.

Análisis proximal de los biocarbonos obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Parámetro	Biocarbón					
	BPT1	BPT2	BPT3	BRT1	BRT2	BRT3
Humedad (%)	1,77 a	2,18 ab	2,14 ab	4,62 d	3,59 cd	3,19 bc
Cenizas (%)	14,5 b	10,2 a	33,3 d	23,1 c	13,3 b	13,8 b
Pérdidas por Volatilización (%)	83,7 c	87,6 d	64,6 a	72,3 b	83,1 c	83 c
Cox (%)	34,8 e	36,3 f	29,1 d	24 c	21,3 b	18,7 a
NT (%)	3,83 b	5,13 b	4,34 b	1,78 a	1,49 a	1,35 a
Relación C/N	9,1 b	7,1 a	6,7 a	13 c	14 c	14 c

Fuente: autores.

Respecto al contenido de carbono oxidable (Cox), fue más alto en los tratamientos de pulpa de café con promedio de 33.4% respecto a los de raquis de palma con promedio de 21.3 %. Los resultados fueron mayores a los obtenidos por Belalcázar (2013) quien reportó 17% de Cox del biocarbón obtenido mediante pirólisis controlada a 500 °C de cascarilla de arroz en un horno de combustión en la Arrocera La Esmeralda en Jamundí-Valle del Cauca.

El (Cox) podría utilizarse como una estimación del CT, esto sin desconocer la diferencia de otras formas de C. Así mismo, Cox pueden indicar no sólo la labilidad del C frente a la oxidación y a la hidrólisis, sino también mayor o menor facilidad de acceso físico de los oxidantes y microorganismos a los compuestos orgánicos, lo que algunos autores denominan “protección física” al estabilizar la micro agregación del suelo asociada a partículas de limo o arcilla, además coadyuva y fija bioquímicamente la formación de compuestos de materia orgánica recalcitrantes (Macías *et al.*, 2004; Domingo *et al.*, 2016). Desde este argumento, los porcentajes de Cox podrían ser estimación de la protección física del biocarbón al suelo y del carbón disponible para suplir las necesidades de los organismos, en tal caso los tratamientos con BPT tendrían mejor acción protectora y fomento a la biota.

Los tratamientos presentaron valores normales de NT (Nitrógeno total), que oscilan entre el 3 % y el 5%, siendo BPT2 el más alto con valor de (5,13 %). Esto, contrastado con el biocarbón producido con raquis de palma y pulpa de café reportado por Rivera (2021)

quién encontró 2.2 % y 3.4 % de N, respectivamente a una temperatura de pirólisis de 450 °C. Resultados superiores a los reportes de Cho *et al.* (2017) quienes en cinco biocarbones elaborados a partir de astillas de pino, viruta de roble, piña de pino, cascarilla de arroz y caparazón de cangrejo, encontraron concentraciones de N que oscilaron entre 0.07 % - 3.63 % con temperaturas de pirólisis superiores a los 600 °C, pero estarían acordes con Trujillo *et al.* (2019) quienes reportaron para biocarbón elaborado a 500°C con gallinaza y pollinaza 2.48 % - 2.37 % de N, respectivamente.

Lo anterior, deja entrever resultados disímiles respecto al material que se someterá a pirólisis, reportes que afectan directamente la relación C/N donde las relaciones encontradas para pulpa de café presentan en promedio 7.6 y para raquis de palma 13,6, datos que varían respecto a los reportados de Rivera (2021) y Rivera *et al.* (2022) para estos mismos materiales quienes encontraron relación C/N de 26,2 en raquis de palma y 17,11 en pulpa de café evidenciando diferencia significativa respecto al % carbono de los biocarbones obtenidos. Por otra parte, Trujillo *et al.* (2019) encontró (C/N) entre 9,27 – 8,9 para biocarbón de gallinaza y pollinaza, respectivamente. En la misma línea, las características propias de los materiales obtenidos, traducidas en reducción de la densidad, incremento de la porosidad y de la retención de humedad y el aporte de nutrientes, pueden modificar las propiedades de este y en tal sentido, se consideran como enmienda física, química y orgánica como lo mencionan Alonso-Gómez *et al.* (2016). Pero la reducción de la relación C/N

respecto al material original, no es deseable si lo que se desea es capturar carbono como estrategia para mitigación del cambio climático.

En la Tabla 4, se aprecian las características físicas y químicas de los biocarbonos obtenidos durante la investigación. Los valores más altos Dr (densidad real) lo reportó biocarbón de pulpa de café, con promedio de $0,45 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que los de raquis de palma no superan los $0,28 \text{ g cm}^{-3}$, valores que difieren de los reportados por López *et al.* (2015) quienes encontraron valores de $1.2\text{--}1.5 \text{ g cm}^{-3}$, pero coinciden con los valores reportados por Rivera (2021) y que, está de acuerdo con la norma vigente NTC-5167 donde se expresa que la densidad real de un producto orgánico usado como abono no debe exceder 0.6 g cm^{-3} . Hussain *et al.* (2020) afirman que la densidad real baja en los bio-

carbonos se debe a la disminución del tamaño de los poros entre sus partículas, es decir, el aumento de su porosidad, lo que mejora la acción capilar, aumentando así la retención de agua.

Así mismo, la presencia de partículas muy pequeñas proporciona disminución de la porosidad total y aumento de la retención de la cantidad de agua. Un sustrato con tamaño de partículas muy pequeñas en el tiempo se compacta y cuando está húmedo impide la circulación de aire (Noguera *et al.*, 2003), por lo que es conveniente mezclarlo. En este caso, teniendo en cuenta la Dr al igual que el porcentaje de retención de humedad superior al 100% de la masa de los biocarbonos obtenidos, se deben realizar aplicaciones en dosis moderadas para permitir un correcto anclaje de la planta y evitar su volcamiento.

Tabla 4.

Caracterización física y química de los biocarbonos obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Parámetro	Biocarbón					
	BPT1	BPT2	BPT3	BRT1	BRT2	BRT3
Dr (g cm^{-3})	0,421 b	0,453 b	0,5 b	0,286 a	0,264 a	0,283 a
Retención de Humedad (%)	124 b	128 b	107 a	180 c	296 e	213 d
pH	6,73 a	6,96 ab	7,66 abc	8,65 c	8,1 bc	8,59 c
CE (dS m^{-1})	7,68 ab	6,53 a	8,32 b	38,6 e	23,1 d	20,8 c
CIC ($\text{cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$)	43,1 b	41,4 a	47,6 c	70,4 f	51,3 d	54,5 e

Fosforo Total (mg kg⁻¹)	0,619 c	0,805 e	0,574 b	1,06 f	0,643 d	0,438 a
K (%)	1,64 a	1,44 a	1,32 a	6,93 b	4,64 b	4,92 c
Ca (%)	2,51 bc	2,8 c	3,2 c	1,45 ab	1,04 a	1,41 ab
S (%)	0,279 ab	0,343 b	0,213 ab	0,264 ab	0,154 a	0,157 a
Mg (%)	0,491 a	0,713 b	0,706 b	0,698 b	0,587 ab	0,578 ab
Fe (%)	0,356 c	0,172 b	0,616 d	0,191 b	0,0151 a	0,00501 a
Na (%)	0,081 a	0,081 a	0,192 a	0,144 a	0,074 a	0,099 a
Mn (mg kg⁻¹)	101 e	92 d	170 f	90,2 c	58,5 b	56,9 a
Cu (mg kg⁻¹)	20,6 a	27,2 b	31,5 c	43,1 d	30,9 c	31 c
Zn (mg kg⁻¹)	85,8 d	54 a	256 f	94,1 e	70,3 c	66 b
Bo (mg kg⁻¹)	64,3 c	142 f	97,8 e	88,2 d	16,8 a	23,7 b

Fuente: autores.

Los valores de pH de los biocarbones de pulpa de café oscilaron entre 6,73 y 7,66 mostrando tendencia hacia la neutralidad, los biocarbones de raquis de palma presentan pH más alcalinos con valores entre los 8,1 y 8,65. Premalatha *et al.* (2023) revisando varios trabajos evidenció que este parámetro es fluctuante según el material utilizado, pero hay tendencia hacia pH alcalino.

Li *et al.* (2018) mencionan que el aumento del pH se debe principalmente a la ruptura de enlaces débiles dentro de la estructura del biocarbón cuando este se somete a altas temperaturas de pirólisis; no obstante, aunque la mayoría de los biocarbones tienden a

presentar un pH alcalino, también es posible encontrar biocarbón con pH entre neutro y ligeramente ácido, en especial cuando se utilizan temperaturas inferiores 400 °C (Li *et al.*, 2019), como es el caso particular presentado en los biocarbones de pulpa de café, los cuales mostraron contenido de lignina más alto, lo que hace que sea menos vulnerable a la descomposición térmica y cuya correlación con la variable pH es fuertemente negativa.

El comportamiento de la conductividad eléctrica obtenida es alto, y está por encima de lo reportado por Premalatha *et al.* (2023). Los tratamientos de pulpa de café mostra-

ron valores de CE promedio de 7,5 (dS m^{-1}), siendo más bajos que los de raquis de palma donde su valor más alto fue el presentado por BRT1 con $38,6 \text{ dS m}^{-1}$. Resultados contrastantes a lo reportado por Belalcázar (2013), quien consiguió pH de 8,72 del biocarbón derivado de pirólisis controlada a 500°C sin que presentaran diferencias, no obstante, este parámetro evidencia alto contenido de sales hidrosolubles, que para las condiciones de la zona de estudio (árido y semiárido) son inconvenientes. Al respecto, Pérez-Cabrera *et al.* (2021) argumentaron que la adición de ácido cítrico, maleico y propiónico como catalizadores iniciales y en concentraciones de 5 y 10%, son los mejores tratamientos para reducir la CE, logrando una conductividad eléctrica ($0,30\text{-}0,46 \text{ dS m}^{-1}$), acción que puede ser considerada en futuras investigaciones. Por otro lado, Thomas *et al.* (2013) consiguieron atrapamiento de sales en los poros del biocarbón, teniendo como consecuencia la reducción de la CE en suelos afectados por sales, esto explicaría en gran medida los contenidos altos de CE en el biocarbón.

Cabe mencionar que el hecho de que se presenten altas CIC en los biocarbones les permite mejorar esta propiedad en el suelo y, por ende, mejorar su retención de nutrientes (Hale *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2013) como también de otros iones. En concordancia, estos exhibieron CIC elevadas, principalmente en aquellos provenientes de raquis de palma, con un máximo de $70,4 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, mientras que los de pulpa de café presentaron CIC con variaciones entre 41,4 y los $47,6 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, valores que son similares a los reportados por Rivera *et al.* (2022), pero difieren de los reportados por Pituya *et al.* (2017), quie-

nes obtuvieron resultados de $127,45 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en biocarbón de madera de acacia a temperatura de pirólisis de 300°C . Los rangos anteriores confirman que es un material con alta capacidad de intercambio iónico lo que representa la cantidad de cationes que las superficies logran retener, indicador del uso potencial que puede llegar a tener.

Como se aprecia, los contenidos de nutrientes de los tratamientos fueron muy variables. Para el caso del fósforo, el valor más alto lo obtuvo BRT1 con $1,06 \text{ mg kg}^{-1}$ seguido por BPT2 con $0,805 \text{ mg kg}^{-1}$. El porcentaje de K presentó diferencias, en el caso de los biocarbón de pulpa de café los valores oscilaron entre 1,32 y 1,64 %, mientras que en el raquis de palma estos mostraron valores superiores con oscilaciones entre los 4,64 y los 6,93 %, concentraciones que pueden relacionarse con el mayor contenido de celulosa del raquis de palma respecto a la pulpa de café.

Los contenidos de Mg y Na no presentaron diferencias. El Mg varió entre 0,491 y 0,713 %, mostrando tanto el valor más alto como el más bajo en los biocarbones de pulpa de café; pero su comportamiento fue más homogéneo en raquis de palma. El Na logró concentraciones bajas tanto en pulpa de café como raquis de palma, el valor más alto lo mostró BPT3 (0,192%), seguido de BRT1 (0,144%). En Ca se exhibió mayor diferencia (2,51 - 3,2 %) en pulpa de café, en raquis de palma la variación fue entre 1,04 y 1,45%, con menor contenido respecto al biocarbón de pulpa de café.

Rivera (2021) obtuvo, a una temperatura de 450°C , biocarbón del raquis de palma con contenidos de $9,1 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ de Ca, 18,9

$\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Mg, $0,21 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Na y $0,06 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de K; y en pulpa de café, consiguió $23,5 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Ca, $9,2 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Mg, $0,84 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Na y $7,41 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de K. Valores diferentes a los obtenidos en esta investigación. Por otro lado, Trujillo *et al.* (2019) reportaron resultados muy superiores en Ca, Mg, K y Na a los encontrados, derivados de biocarbón de gallinaza y pollinaza, no obstante, Jien y Wang (2013) citados por Alazzaz *et al.* (2020) argumentan que el biocarbón que más contribuye con K, Ca y Mg son los derivados de desechos animales.

Los porcentajes más altos de azufre fueron reportados por los biocarbones de pulpa de café BPT2 = 0,343 % y BPT1 = 0,279 %, seguidos por el biocarbón de raquis de palma BRT1 = 0,264 % y de pulpa de café BPT3 = 0,213 %; los biocarbones BRT2 y BRT3 presentaron valores más bajos con una diferencia casi del doble en comparación con el valor más alto 0,154 y 0,157 %, respectivamente.

El contenido Fe presentó una gran discrepancia en las muestras de biocarbón de raquis de palma BRT2 (0,0151%) y BRT3 (0,00501 %) en comparación con las demás, las cuales presentaron valores con oscilaciones entre los 0,172 % y 0,616 %, presentando el valor más alto el biocarbón de pulpa de café BPT3.

Con respecto a los contenidos de elementos menores, el biocarbón de pulpa de café BPT3 obtuvo los valores más altos de Mn

(170 mg kg^{-1}) y Zn (256 mg kg^{-1}). Por su parte, el contenido de boro más alto lo presentó el biocarbón de raquis de palma con un valor de $43,1 \text{ mg kg}^{-1}$.

Relación de características de la biomasa con las calidades de biocarbones obtenidas. El análisis de varianza reportó diferencias ($p < 0,05$) entre el contenido de lignina, la temperatura de pirólisis, el rendimiento y las propiedades químicas del biocarbón (pH, CE, CO, NO, Ca, K y RCN). De esta manera, se puede entender que tanto el contenido de lignina como la temperatura en la pirólisis y el rendimiento, tienen impacto significativo en varias propiedades químicas del biocarbón (Tabla 5), incluyendo el pH, la conductividad eléctrica (CE), el contenido de carbono (CO), el nitrógeno orgánico (NO), el calcio (Ca), el potasio (K) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Lo anterior resalta la importancia de considerar estos factores en la producción y caracterización del biocarbón para diversos usos.

Se reportaron diferencias significativas entre el pH y CE, CIC, CO, NO, contenido de Cu y K (Tabla 5). Así mismo, en la Tabla 6 se puede verificar que existen diferencias significativas entre la CE y varias propiedades químicas del biocarbón, incluyendo la CIC, el contenido de cobre (Cu), el contenido de potasio (K) y el contenido de calcio (Ca); esto podría indicar que tanto el pH como la CIC pueden estar asociados con varias características químicas del producto.

Tabla 5

Análisis de varianza entre el pH, el rendimiento y otras propiedades químicas del biocarbón. Niveles de significancia: ***p<0,001; **p<0,01; *p<0,05

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
R	1	2,931	2,931	31,425	0,004**
CE	1	2,370	2,370	10,144	0,033*
CIC	1	2,389	2,389	10,443	0,031*
CO	1	2,837	2,837	24,277	0,007**
NO	1	2,370	2,370	10,156	0,033*
Cu	1	2,228	2,228	8,281	0,045*
K	1	2,564	2,564	13,858	0,020*

Fuente: autores.

Tabla 6.

Análisis de varianza entre CE y otras propiedades químicas del biocarbono. Niveles de significancia: ***p<0,001; **p<0,01; *p<0,05

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
CIC	1	731,72	731,72	51,55	0,001**
Cu	1	577,49	577,49	10,95	0,029*
K	1	756,45	756,45	94,35	0,0006***
Ca	1	492,33	492,33	6,65	0,061
Na	1	9,91	9,91	0,05	0,83

Fuente: autores.

Por último, se percibió diferencia entre la densidad real y la retención de humedad (Tabla 7), lo que sugiere que estas dos pro-

piedades pueden estar relacionadas y pueden influir en las características físicas del biocarbón.

Tabla 7.

Análisis de varianza entre Densidad real y Retención de humedad. Niveles de significancia: ***p<0,001; **p<0,01; *p<0,05

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
RH	1	0,04	0,04	12,86	0,023*

Fuente: autores.

En la Figura 2, se indica la correlación entre contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa de las biomasas y la caracterización fisicoquímica de los biocarbono. Se muestra correlación positiva de 0,88 entre el contenido de lignina de la biomasa con el rendimiento final de los biocarbonos, al mismo tiempo, los contenidos de carbono orgánico (Cox) presentaron correlación fuerte positiva con el rendimiento de los biocarbonos ($r=0,94$). Contenido de 0,88 entre la lignina y los contenidos de carbono, N y Ca.

Variables como el pH presentaron fuertes correlaciones con la conductividad eléctrica ($r=0,89$) y la CIC ($r=0,94$); así mismo, la CE y la CIC presentaron también una fuerte correlación de 0,94. Además, las propiedades físicas de densidad real y retención de humedad se correlacionaron negativamente ($r=-0,94$), verificando que en la medida en que la densidad se reduce, el material aumenta su capacidad de retención de humedad.

En síntesis, en el presente estudio el contenido de celulosa y hemicelulosa de la muestra de raquis de palma fue superior casi que el doble a la pulpa de café, mientras que en el caso de la lignina fue lo contrario, la pulpa de café presentó un contenido que dobló al de raquis de palma. Collazo-Bigliardi *et al.* (2018) mencionan que este particular hallazgo puede deberse a la diferencia en la naturaleza de cada biomasa. De allí que de conformidad con el análisis proximal y la caracterización fisicoquímica del biocarbón, se observó que los biocarbonos obtenidos a partir de pulpa de café (BPT1, BPT2, BPT3) tienen un rendimiento más alto que los de raquis de palma (BRT1, BRT2, BRT3) mientras que, en términos de contenido de nutrientes, presenta valores más elevados de C, N y bases, proporcionando nutrientes para el suelo y las plantas.

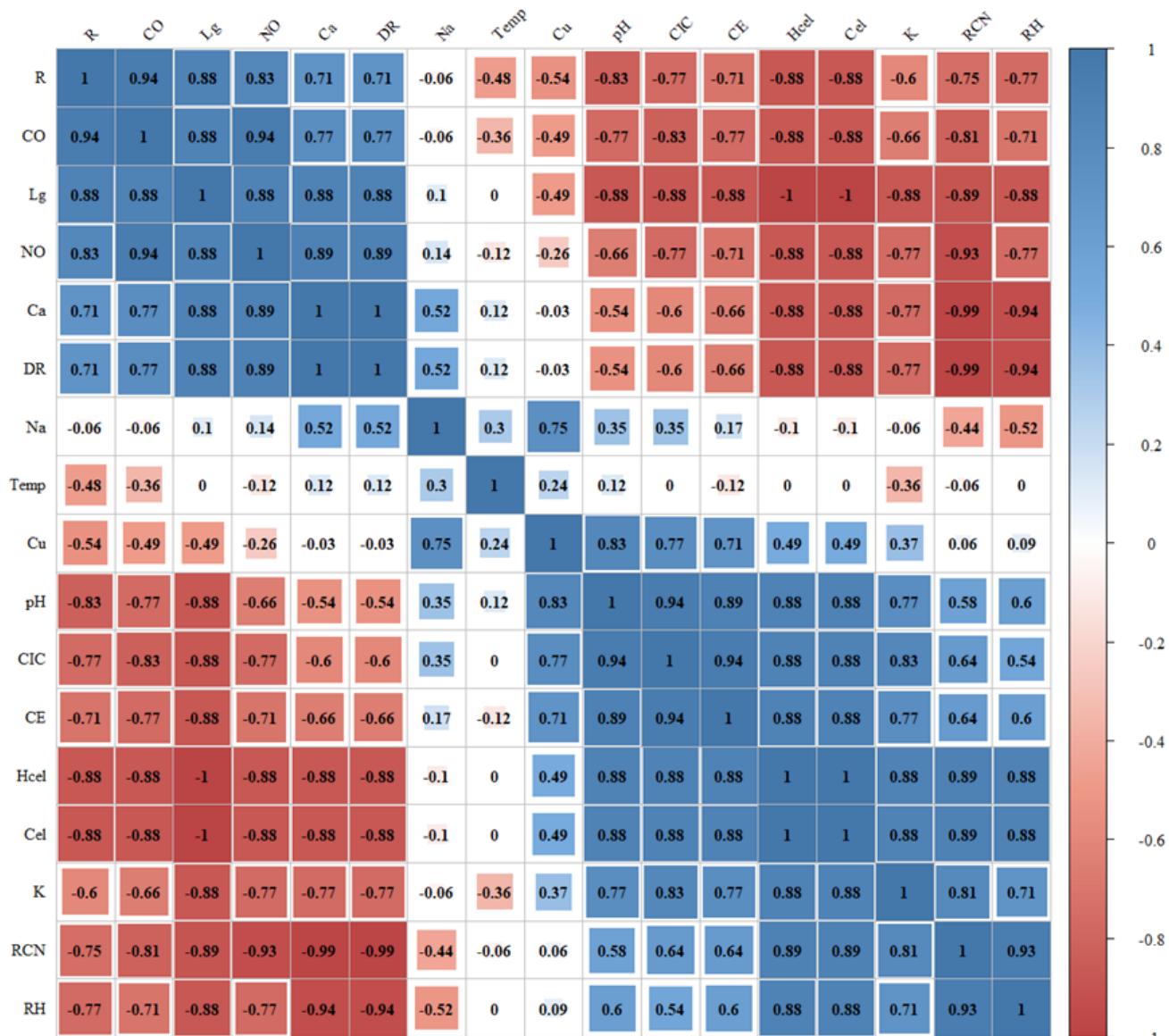


Figura 2. Matriz de correlación de Spearman entre características de la biomasa y calidades de biocarbonos obtenidas en la evaluación de la composición fisicoquímica del producto obtenido de raquis de palma de aceite y pulpa de café

Fuente: autores.

La alta correlación mostrada entre el contenido de carbono de los biocarbonos y la lignina de la biomasa ($r=0.88$), podría implicar que la lignina, al ser una macromolécula rica en carbono y poseer alta estabilidad térmica, puede contribuir significativamen-

te a la formación de biocarbón con altos niveles de carbono durante el proceso de pirólisis (Leng y Huang, 2018). En referencia a las concentraciones de N en las muestras de biocarbonos, también se relacionan con la existencia de lignina de la biomasa (Li *et*

al., 2019) y la presencia de proteínas en los tejidos vegetales (Rivera, 2021) que al descomponerse dan lugar a la liberación de nitrógeno.

El pH, CE y CIC son propiedades químicas para tener en cuenta a la hora de evaluar el poder agronómico del biocarbón. En el estudio se observó una fuerte correlación entre estas variables, lo cual puede estar relacionado a múltiples factores. La alta conductividad eléctrica en los biocarbonos puede estar asociada al alto contenido de sales, en especial sodio (Li *et al.*, 2019), lo que podría aumentar la salinidad del suelo (Ferreira *et al.*, 2019). Sin embargo, los contenidos de sodio de las muestras de biocarbón fueron bajos, por tanto, se atribuye la alta CE a cationes menos hidrosolubles. La CIC, es promovida por grupos funcionales de superficie relacionados a la presencia de abundantes elementos (K, Na, Ca, Mg y P) (Agrafioti *et al.*, 2013; El-Naggar *et al.*, 2019), esta afirmación se puede corroborar con la correlación firmemente positiva que tiene la CIC con algunos de estos nutrientes. De conformidad con lo expuesto, los valores de CIC fueron

generalmente altos en todos los biocarbones en estudio, por lo que se considera que todos tienen la capacidad de retener y liberar nutrientes de manera efectiva para las plantas; mientras que con relación al pH, el raquis de palma es alcalino, por lo que podría ser usado para enmendar suelos ácidos; en cuanto a los biocarbones de pulpa de café, estos tienen un pH más neutro en comparación con los de raquis de palma, lo que puede ser favorable para una amplia gama de cultivos y suelos.

Por su parte, la baja densidad real del biocarbón muestra alta porosidad, no obstante, es importante mencionar que esta característica es más eficiente si el biocarbón se mezcla con suelos de textura arenosa que permiten altas tasas de infiltración.

Finalmente, teniendo en cuenta el rendimiento de producción, el contenido nutricional, el pH, la densidad real, la CE y la CIC, los biocarbones de pulpa de café (BPT1, BPT2 y BPT3) son más favorables como enmiendas físicas, químicas y orgánicas para el suelo en comparación con los de raquis de palma (BRT1, BRT2 y BRT3).

4 CONCLUSIONES

Por las características fisicoquímicas del biocarbón obtenido de pulpa de café y raquis de palma, se evidencia su potencial para ser usado como enmienda física, química y orgánica en los suelos, demostrando ser un proceso efectivo para transformar residuos

agroindustriales e incorporarlos al manejo agrícola en diferentes zonas y condiciones.

Los resultados muestran que el contenido de lignina de la biomasa es de importancia a la hora de seleccionar la pirólisis, toda vez que esta propiedad influye en el rendimiento



del biocarbón final, en su contenido de C y N, al igual que en la variabilidad del pH, la CE y la CIC.

Igualmente, entre los biocarbonos, el proveniente de pulpa de café BPT1, se destaca como la mejor opción debido a su mayor rendimiento y su significativo contenido nutricional. Pero es importante mencionar que factores como las necesidades específicas del suelo y los cultivos, deben ser considerados al elegir el biocarbón más adecuado.

Es necesario realizar más investigaciones sobre las características químicas de biocarbonos para ser utilizado como enmienda física, química y orgánica de suelos, sobre todo cuando se usan nuevos materiales vegetales, ya que las propiedades del biocarbón son afectadas por la composición de la materia prima, las técnicas termoquímicas empleadas en su elaboración, el intervalo de calentamiento, temperatura, presión del reactor y uso de catalizadores.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Sonia Esperanza Aguirre Forero: metodología, investigación, análisis de datos, borrador original. **José Villa Parejo:** investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura.

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica: revisión y edición, análisis de datos.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de investigación de la Universidad del Magdalena por la financiación del proyecto.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se derivó de la investigación “Biochar: una alternativa para el manejo de suelos en el trópico seco a partir de la transformación de residuos de la producción

agrícola (*Coffea arabica* y *Elaeis guineensis*)” financiada por el Fondo de Investigación FONCIENCIAS con código VIN2022165 de la Universidad del Magdalena.

LITERATURA CITADA

Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G.H., & Pourbabaee, A.A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment*, 61(11), 475-482. <https://doi.org/10.17221/117/2015-PSE>

Aguirre, S. E., Gambasica, N. V. P., y Parejo, J. A. V. (2023). Biocarbón: Estado del arte, avances y perspectivas en el manejo del suelo. *Revista EIA*, 20(39), 39. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1651>

Agrafioti, E., Bouras, G., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E. (2013). Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 72–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaat.2013.02.010>

Alazzaz, A., Usman, A. R. A., Ahmad, M., Ibrahim, H. M., Elfaki, J., Sallam, A. S., Akanji, M. A. & Al-Wabel, M. I. (2020). Potential short-term negative versus positive effects of olive mill-derived biochar on nutrient availability in a calcareous loamy sand soil. *PLOS one*, 15, e0232811. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232811>

Alonso-Gómez, A., Cruz-Domínguez, A., Jiménez-Madrid, D., Ocampo-Duran, Á., y Parra-González, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v19n2/v19n2a11.pdf>

Ameloot, N., Graber, E. R., Verheijen, F. G. A., & De Neve, S. (2013). Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 379–390. <https://doi.org/10.1111/ejss.12064>

Beiyuan, J. Z., Awad, Y. M., Beckers, F., Wang, J. X., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., Wang, S. L., Wang, H. L., & Rinklebe, J. (2020). (Im)mobilization and speciation of lead under dynamic redox conditions in a contaminated soil amended with pine sawdust biochar. *Environment International*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105376>

Belalcázar, S. (2013). Evaluación del biocarbón derivado de cascarilla de arroz como potenciador del establecimiento y proliferación de bacterias en suelos no perturbados, [Trabajo de grado]. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad ICESI, Santiago de Cali. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/76991/1/belalcazar_evaluacion_biocarbon_2014.pdf

Berek, A.K., Hue, N. V. (2016). Characterization of biochars and their use as an amendment to acid soils. *Soil Science*, 181, 412–426. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000177>

Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*,

- 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, 237, 57–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>.
- Brassard, P., Godbout, S., & Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*, 181, 484–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.063>.
- Cheng, F., Bayat, H., Jena, U., & Brewer, C. E. (2020). Impact of feedstock composition on pyrolysis of low-cost, protein- and lignin-rich biomass: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 147, 104780. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaat.2020.104780>.
- Cho, D. W., Kwon, G., Ok, Y. S., Kwon, E. E., & Song, H. (2017). Reduction of Bromate by Cobalt-Impregnated Biochar Fabricated via Pyrolysis of Lignin Using CO₂ as a Reaction Medium. *ACS applied materials & interfaces*, 9(15), 13142–13150. <https://doi.org/10.1021/acsmami.7b00619>
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt Boix, A. (2018). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate Polymers*, 191, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.022>
- Ding, Y., Liu, Y. G., Liu, S. B., Li, Z. W., Tan, X. F., Huang, X. X., Zeng, G. M., Zhou, L., & Zheng, B. H. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Dissanayake, P. D., You, S. M., Igalavithana, A. D., Xia, Y. F., Bhatnagar, A., Gupta, S., Kua, H. W., Kim, S., Kwon, J. H., Tsang, D. C. W., & Ok, Y. S. (2020). Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109582>
- Domingo-Olive, F., Bosch-Serra, A. D., Yague, M. R., Poch, R. M., and Boixadera, J. (2016). Long term application of dairy cattle manure and pig slurry to winter cereals improves soil quality. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 104, 39–51. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9757-7>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- Ferreira, S. D., Manera, C., Silvestre, W. P., Pauletti, G. F., Altafini, C. R., & Godinho, M. (2019). Use of Biochar Produced from Elephant Grass by Pyrolysis in a Screw Reactor as a Soil Amendment. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 3089–3100.

<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0347-1>.

Hale, S. E., Nurida, N. L., Jubaedah, Mulder, J., Sørmo, E., Silvani, L., Abiven, S., Joseph, S., Taherymoosavi, S., & Cornelissen, G. (2020). The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Science of The Total Environment*, 719, 137455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137455>.

Hoseini, M., Cocco, S., Casucci, C., Cardelli, V., & Corti, G. (2021). Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, 148, 106009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106009>.

Hussain, R., Ravi, K., & Garg, A. (2020). Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures. *Soil and Tillage Research*, 204, 104713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104713>.

Igalavithana, A. D., Kwon, E. E., Vithanage, M., Rinklebe, J., Moon, D. H., Meers, E., Tsang, D. C. W., & Ok, Y. S. (2019). Soil lead immobilization by biochar in short-term laboratory incubation studies. *Environment International*, 127, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.031>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (1976). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1146 Método de determinación del sodio por espectrofotometría*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (1996). *Norma Técnica Colombiana – NTC 234 Abonos o fertilizantes. Método de ensayo para la determinación cuantitativa del fosforo*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2001). *Norma Técnica Colombiana – NTC 202 Métodos cuantitativos para la determinación de potasio soluble en agua, en abonos o fertilizantes y fuentes de materias para su fabricación*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2005). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1154 Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Determinación de azufre*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2011a). *Norma Técnica Colombiana - NTC 370 Abonos o fertilizantes. Determinación del nitrógeno total*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2011b). *Norma Técnica Colombiana - NTC 5167 Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2013). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1860 Productos químicos para uso agrícola. Abonos o fertilizantes. Método de ensayo para determinar el contenido de boro. Método de Azometina-H*. ICONTEC.

International Organization for Standardization. [ISO]. (2008). ISO 13906 - Determinación del contenido de fibra en detergente ácido (ADF) y de lignina en detergente ácido (ADL).

Lee, X. J., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., & Ng, H. K. (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. *Bioresource Technology*, 236, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.105>.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation* (Routledge, Ed.; 2nd Edition).

Leng, L., & Huang, H. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*, 270, 627–642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>.

Li, S., Barreto, V., Li, R., Chen, G., & Hsieh, Y. P. (2018). Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133, 136–146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaat.2018.04.010>

Li, S., Harris, S., Anandhi, A., & Chen, G. (2019). Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. *Journal of Cleaner Production*, 215, 890–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106>

López, M. A., Crespo, Y. A., López, G. G., Quintana, Y. G., Abreu, L. C., y Martínez, I. D. L. C. C. (2015). Características de sus-tratos orgánicos acondicionados con bio-carbón: Influencia en la calidad de plantas de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell cultiva-da en tubetes. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 3(1), 1-16. <https://dialnet.unirioja.es/revista/23626/V/3>

Ma, Z., Chen, D., Gu, J., Bao, B., & Zhang, Q. (2015). Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm ker-nel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods. *Energy Conversion and Management*, 89, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.074>

Macías, F., Calvo de Anta, R., Rodríguez, L., Verde, R., Pena, X., y Camps, M. (2004). El sumidero de carbono de los suelos de Ga-licia. *Edafología*, 11(3), 341-376. <http://www.edafologia.net/revista/tomo11c/articulo341.pdf>

Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X. Y., Korai, P. K., & Pan, G. X. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-anal-y-sis of literature data. *Geoderma*, 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>.

Opedun, J. C., Wanasolo, W., Apita, A. O., & Omara, T. (2023). Optimization of Pyrol-y-sis and Selected Physicochemical Prop-erties of Groundnut Shells, Coffee and Rice Husks for Biochar Production. *Jor-dan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 17(3), 441–452. <https://doi.org/10.59038/jjmie/170313>.

Paredes, J., Pretell, V., Pilco, A., Ramos, W., & Ubillas, C. (2022). Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses *Coffea Arabica* L. for the production of Biochar. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July.* <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.344>

Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Salcedo-Pérez, E., Guillén-Sánchez, D., Balois-Morales, R., López Martínez, V. y Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>

Pituya, P., Sriburi, T., & Wijitkosum, S. (2017). Optimization of biochar preparation from Acacia wood for soil amendment. *Engineering Journal*, 21(2), 99–105. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.2.99>

Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637>

Rajendiran, N., Ganesan, S., Weichgrebe, D., & Venkatachalam, S. S. (2023). Optimization of pyrolysis process parameters for the production of biochar from banana peduncle fibrous waste and its characterization. *Clean Technologies and Environ-*

mental Policy, 25(10), 3189–3201. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02592-2>

Rehra, D., Reddy, M. R., Novak, J. M., Bansode, R. R., Schimmel, K. A., Yu, J., Watts, D. W., & Ahmedna, M. (2014). Production and characterization of biochar's from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2014.03.008>

Rivera, J. C., Silva Contreras, L. V., Cuervo, J., Agamez Pertuz, Y. Y., Martínez-Cordón, M. J., & Zamudio, A. (2022). Characterization of biochars obtained from rose stems, coffee pulp, palm, and wood residues as an environmental alternative for cadmium immobilization in soil. *agriRxiv*, 20220490856. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2022.00160>

Rivera, J. C. (2021). *Efecto de enmiendas con biocarbonos sobre propiedades físicas, químicas y Fitoabsorción de Cadmio en suelos disímiles sembrados con lechuga* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80523>

Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K., y Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista ION*, 31(1), 37–42. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>

Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haefele, S., Sohi, S., ... & Haszel-dine, S. (2012). Sustainable gasification–

biochar systems A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy*, 42, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.026>

Singh, A., Singh, A. P., & Purakayastha, T. J. (2019). Characterization of biochar and their influence on microbial activities and potassium availability in an acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1302–1315. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1563291>.

Sukartono, Utomo, W. H., Kusuma, W. Z., & Nugroho, W. H. (2011). Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture*, 49, 47–52. <https://jtropag.kau.in/index.php/ojs2/article/view/236/236>

Thomas, S. C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., Melamed S., Murray, J., Petroff, A & Winsborough, C. (2013). Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Management*, 129, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.057>

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>

Trujillo, E., Valencia, A., y Cecilia Alegría, M. (2019). Producción y caracterización

química de biocarbón a partir de residuos orgánicos avícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 489-504. <http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.262>

Tsai, C. H., Tsai, W. T., Liu, S. C., & Lin, Y. Q. (2018). Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(2), 237–243. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0259-5>.

Veiga, T. R. L. A., Lima, J. T., Dessimoni, A. L. de A., Pego, M. F. F., Soares, J. R., & Trugilho, P. F. (2017). Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões. *Cerne*, 23(4), 529–536. <https://doi.org/10.1590/01047760201723042373>.

Weyers, S. L., & Spokas, K. A. (2014). Crop residue decomposition in Minnesota biochar-amended plots. *Solid Earth*, 5(1), 499–507. <https://doi.org/10.5194/se-5-499-2014>

Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., & Wu, C. (2019). Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of The Total Environment*, 659, 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.400>

Zhang, Q., Du, Z., Lou, Y., & He, X. (2015). A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions. *Catena*, 127, 26–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.009>

Zhao, L., Cao, X., Wang, Q., Yang, F., & Xu, S. (2013). Mineral Constituents Profile of Biochar Derived from Diversified Waste Biomasses: Implications for Agricultu-

ral Applications. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 545–552. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0232>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 27-03-2024

Fecha de aceptado: 05-09-2024

DOI: 10.22490/21456453.7857

LA ACIDEZ DEL SUELO LIMITA LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN ENFOCADA EN LA AMAZONIA COLOMBIANA

SOIL ACIDITY LIMITS AGRICULTURAL PRODUCTION: A REVIEW FOCUSED ON THE COLOMBIAN AMAZON

Gelber Rosas-Patiño¹

Edgar Álvaro Ávila-Pedraza²

Verenice Sánchez-Castillo³

¹ Doctor en Ciencias Agrarias, profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.
g.rosas@udla.edu.co

² Doctor en Ciencias Agrarias, profesor de la Facultad de Ingeniería agronómica, Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Colombia.
eaavila@ut.edu.co

³ Doctora en Antropología, profesora de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.
ve.sanchez@udla.edu.co

Citación: Rosas-Patiño, G., Ávila-Pedraza, E., y Sánchez-Castillo, V. (2025). La acidez del suelo limita la producción agrícola: una revisión enfocada en la Amazonia colombiana.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 16(1), 185 - 211.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7857>

RESUMEN

Contextualización: los suelos tropicales ácidos se caracterizan por presentar bajo pH, altas concentraciones de aluminio y baja disponibilidad de nutrientes, lo que limita el desarrollo de la raíz y la producción de los cultivos. Los suelos de la Amazonía colombiana, en donde predominan oxisoles y ultisoles, hacen parte de este grupo de suelos ácidos y de baja fertilidad natural.

Vacío de conocimiento: el comportamiento de las plantas que crecen en suelos ácidos ha ocupado el interés de investigadores en todo el mundo, pero es escasa la información actualizada y de libre acceso que permita entender con suficiencia la naturaleza de estos suelos, así como las estrategias morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de adaptación de los cultivos de importancia agrícola desarrollados en los suelos ácidos de la Amazonía colombiana.

Propósito: presentar una síntesis de los últimos avances científicos relacionados con los suelos ácidos, la relación de la acidez con la disponibilidad de nutrientes y los efectos tóxicos del aluminio, así como los meca-

nismos de adaptación desarrollados por las plantas. En esta revisión también se aborda de manera especial los efectos de la acidez del suelo en ocho cultivos de importancia agrícola para los productores en la Amazonía colombiana.

Metodología: se realizó una búsqueda de artículos de libre acceso publicados en cuatro bases de datos de la Web entre el 2020 y el 2023, sobre las formas del aluminio en el suelo, su relación con la disponibilidad de nutrientes, los efectos tóxicos, los mecanismos de tolerancia de la planta y algunas prácticas de manejo de suelos ácidos.

Resultados y conclusiones: este estudio aporta elementos importantes que ayudan a mejorar la comprensión de los suelos ácidos y plantea escenarios futuros para orientar la gestión del conocimiento, en relación con el manejo de los suelos ácidos y los cultivos agrícolas en la Amazonía colombiana.

Palabras clave: cultivos tolerantes, disponibilidad de nutrientes, encalado, pH del suelo, toxicidad por aluminio

ABSTRACT

Contextualization: acidic tropical soils are characterized by low pH, high concentrations of aluminum and low nutrient availability, which limits root development and crop production. The soils of the Colombian Amazon, where Oxisols and Ultisols predominate, are part of this group of acidic soils with low natural fertility.

Knowledge gap: the behavior of plants that grow in acidic soils has occupied the interest of researchers around the world, but there is a lack of updated and freely accessible information that allows us to sufficiently understand the nature of these soils, as well as the morphological, physiological, and biochemical adaptation strategies of crops of agricultural importance developed in the acidic soils of the Colombian Amazon.

Purpose: present a synthesis of the latest scientific advances related to acidic soils, the relationship of acidity with nutrient availability and the toxic effects of aluminum, as

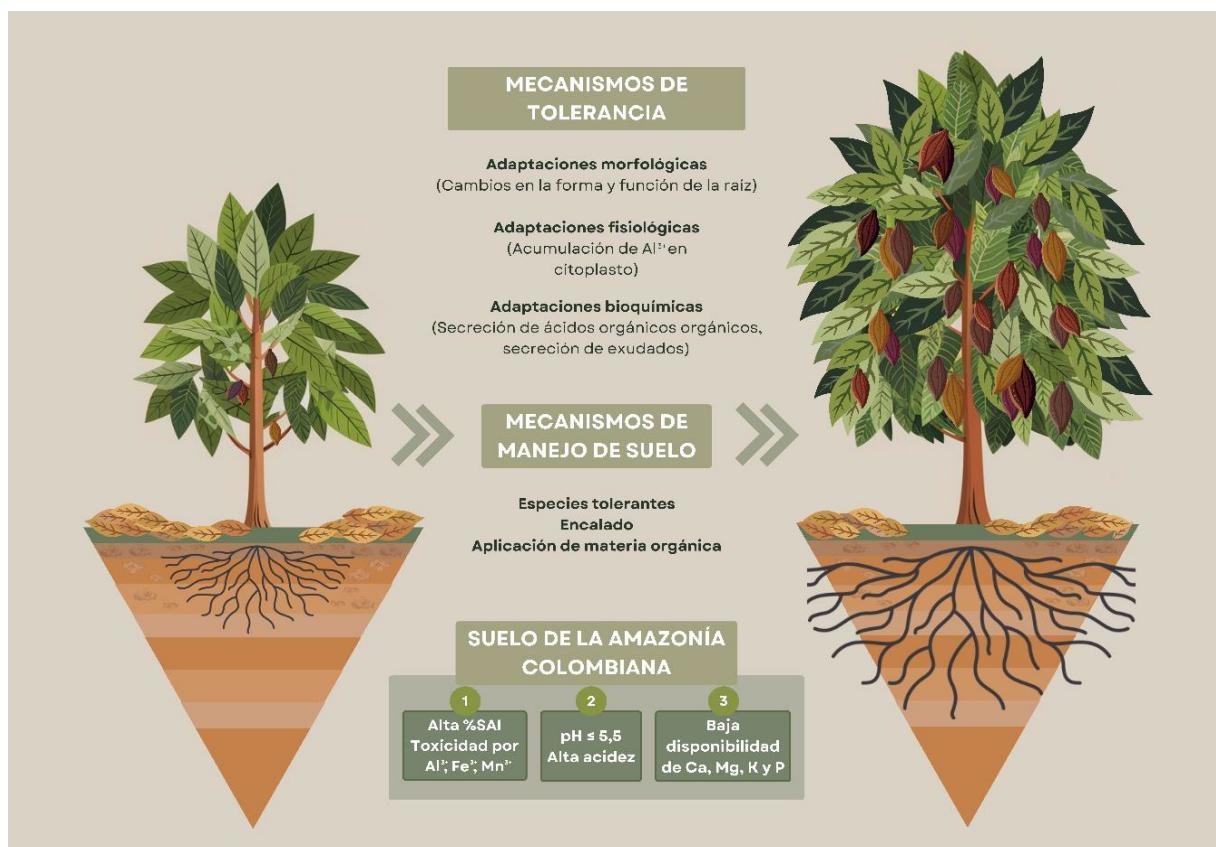
well as the adaptation mechanisms developed by plants. This review also addresses in a special way the effects of soil acidity on eight crops of agricultural importance for producers in the Colombian Amazon.

Methodology: a search was carried out for free access articles published in four Web databases between 2020 and 2023, on the forms of aluminum in the soil, its relationship with nutrient availability, toxic effects, tolerance mechanisms of the plant and some acid soil management practices.

Results and conclusions: this study provides important elements that help improve the understanding of acidic soils and proposes future scenarios to guide knowledge management on the management of acidic soils and agricultural crops in the Colombian Amazon.

Keywords: aluminum toxicity, liming, nutrient availability, soil pH, tolerant crops

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

En las regiones de clima tropical predominan los oxisoles y ultisoles (ferralsoles y acrisoles en sistema de clasificación de suelos de la FAO), suelos ácidos dominados por minerales ricos en sílice, hierro y aluminio (Rosas *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2023). Estos suelos presentan alta evolución y baja fertilidad natural, producto de variados procesos pedogenéticos como la ferrallitización

y la argiluviación, que ocasionan la pérdida de bases y concentración de óxidos de hierro y aluminio (Chiapini *et al.*, 2023).

Los cultivos que se establecen en estos suelos ácidos pueden experimentar estrés abiótico, deficiencias de nutrientes y toxicidad por aluminio (Li *et al.*, 2023) debido a que, en condiciones de pH bajo, el aluminio

se solubiliza e inhibe el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas (Kundu y Ganesa, 2023). Los altos niveles de este metal intercambiable y soluble también promueven la fijación de fósforo en los coloides del suelo y ralentizan la nitrificación y fijación del nitrógeno, lo que genera deficiencias de estos nutrientes y limita la producción agrícola (Li *et al.*, 2023).

Es bien conocido el interés que desde siempre ha tenido la comunidad científica mundial por encontrar estrategias de manejo de estos suelos ácidos, con el propósito de comprender mejor su naturaleza, los procesos edafológicos que desencadenan la toxicidad, así como los principios **morfológicos, fisiológicos y bioquímicos** en que se sustenta la adaptación de las plantas a las condiciones de acidez. El 90% de los suelos de la Amazonía colombiana presentan condiciones de alta acidez (Peña y Cardona, 2010), por lo que desarrollar actividades agrícolas competitivas no resulta fácil cuando se cuenta con suelos con estas situaciones, aún

más, cuando no se conocen las alternativas adecuadas para su manejo. Este es el reto que deben afrontar los técnicos y los productores rurales de la Amazonía colombiana a la hora de establecer sus cultivos, por lo que se hace necesario realizar un registro y análisis de investigaciones recientes de libre acceso con la finalidad de aportar elementos orientadores para enfrentar los desafíos que trae consigo la producción agrícola en suelos ácidos.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es presentar una revisión de las investigaciones recientes publicadas en cuatro bases de datos, open access de la Web, sobre: primero, los suelos ácidos de la Amazonía colombiana y las formas del aluminio en el suelo; segundo, la relación entre la acidez del suelo y la disponibilidad de nutrientes, los efectos tóxicos y los mecanismos de adaptación de las plantas y algunas prácticas de manejo; y tercero, los principales efectos de la acidez del suelo en cultivos considerados de importancia agrícola en la Amazonía colombiana.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la búsqueda y selección de artículos científicos y de revisión de acceso abierto publicados entre los años 2020 y 2023, en las bases de ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Google Scholar como también de algunas de otras fuentes, utilizando términos de búsqueda en español e inglés, como: “suelos ácidos Amazonía”, “acidez en cultivos”, “toxicidad de aluminio en la plan-

ta”, “plantas tolerantes al aluminio”, “manejo suelos ácidos”, “cultivos agrícolas en la Amazonía”, así como nombres científicos y comunes de los cultivos agrícolas seleccionados. A pesar de encontrarse amplia información (especialmente en Google Scholar), solo fue posible acceder a los documentos que eran de acceso abierto.

Se seleccionaron los artículos de investigación y revisión más recientes, no duplicados en las otras bases consultadas y afines al tema de interés, entre otros criterios (Figura 1). Los ocho cultivos incluidos en esta revisión corresponden a las principales alternativas productivas que sustentan la economía de los productores agrícolas de la región

amazónica (Agronet, 2023), estos son: pasturas (*Urochloa* sp.), plátano (*Musa* sp), yuca (*Manihot sculenta* Crantz), caucho (*Hevea brasiliensis* W.A.J. M.), cacao (*Theobroma cacao* L.), caña panelera (*Saccharum officinarum* L.), chontaduro (*Bactris gasipaes* Kunth), y piña (*Ananas comosus* L. Merr.).

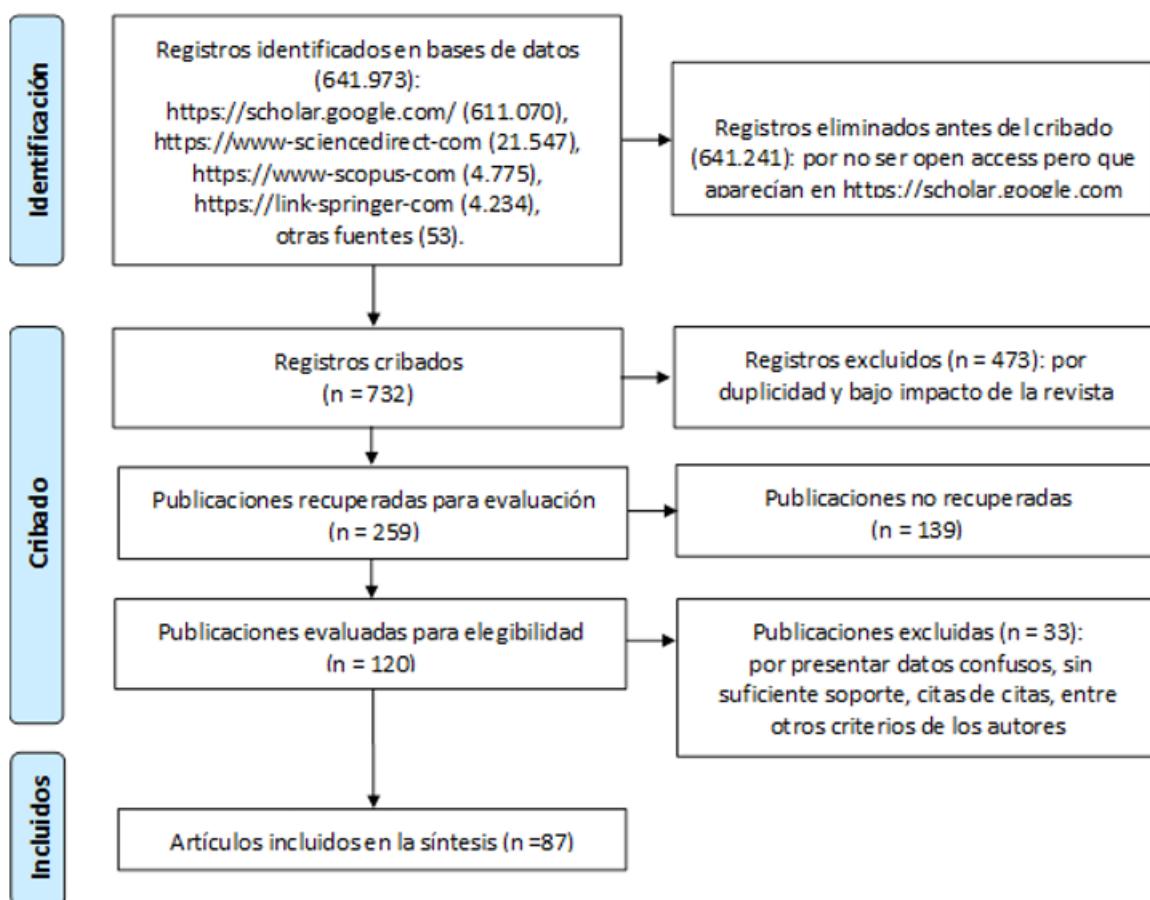


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la revisión

Fuente: adaptado de Page *et al.* (2021).

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelos ácidos en la Amazonía Colombiana

La Amazonía colombiana ocupa una superficie aproximada de 34 millones de hectáreas (Ruiz *et al.*, 2022), está cubierta principalmente por bosque, pasturas y cultivos. Presenta condiciones climáticas propias del trópico húmedo, lo que acelera los procesos de meteorización (Agudelo *et al.*, 2023). Sus suelos ácidos provienen de rocas ígneas y sedimentarias con afinidad metaluminosa y peraluminosa que al intemperizarse producen minerales primarios como cuarzo, biotita, aluminosilicatos, anfíboles, plagioclasas y piroxenos (Rodríguez *et al.*, 2011). Este material inorgánico conforma paisajes de lomerío y altiplanicies con predominio de minerales secundarios (arcillas y minerales amorfos) como caolinitas, goetita, hematita, pirofilita, gibbsita y halloysitas ricas en sílice, hierro y aluminio (Malagón, 2003; Rosas *et al.*, 2017). Estas características pedogenéticas de la fracción fina explican en gran medida el origen de la alta acidez del suelo y la baja disponibilidad de nutrientes para los cultivos. Es decir que la acidez en estos suelos tropicales se presenta de forma natural cuando el Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ se pierden y son remplazados por iones de H^+ y Al^{3+} (Aegnehu *et al.*, 2021).

Muchos minerales del suelo que contienen aluminio se vuelven inestables y se consideran ácidos cuando el $\text{pH} < 5,5$ y el Al^{3+} alcanza niveles tóxicos para los cultivos (Zhu y

Shen, 2023). El aluminio en el suelo se puede encontrar en forma insoluble haciendo parte de la estructura de minerales primarios y minerales secundarios, estas formas se consideran inofensivas para las plantas (Yan *et al.*, 2023), pero en suelos ácidos, el aluminio se encuentra de forma interlaminar, intercambiable, lábil, asociado a la materia orgánica o en forma de aluminosilicato de rango corto (Prietzel *et al.*, 2023). Sin embargo, el aluminio soluble (Al^{3+}) es el mayor responsable de la toxicidad para la planta, aunque otras formas como Al(OH)^{2+} , Al(OH)_3 , Al(OH)_2^+ y Al(OH)^-_4 pueden generar problemas (Zhu y Shen, 2023).

Relación de la acidez y la disponibilidad de nutrientes

El pH puede presentar efectos diferenciados en la disponibilidad de los nutrientes puesto que las relaciones iónicas en el suelo dependen, entre otros factores, de la forma de cada elemento. Por ejemplo, la reacción ácida hace que disminuya la capacidad de intercambio catiónico y que las bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) que son muy solubles, se lixivien y decrezca su concentración en la solución del suelo (Alkharabsheh *et al.*, 2021). En suelos con pH de 4,3 y aluminio intercambiable de 3,7 cmol(+) kg⁻¹ cultivados con plantas de palma de aceite, la presencia de bases aumentó significativamente cuando el pH se incrementó a 4,7 y el aluminio intercambia-

ble se redujo a 0,7 cmol(+) kg⁻¹ (Husain *et al.*, 2021).

Los aniones también se ven afectados por la acidez del suelo; a pH<5,0, los fosfatos ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y molibdatos (MoO_4^{2-}) son adsorbidos fuertemente por los óxidos e hidróxidos de aluminio del suelo (Barrow y Hartemink, 2023). En condiciones de acidez, el Al^{3+} reacciona fácilmente con el P, S y Mo y forma compuestos insolubles (Nie *et al.*, 2020), generando deficiencia de estos elementos en la planta.

Con relación al nitrógeno, los contenidos en el suelo pueden no verse afectados significativamente por las variaciones del pH (Rosas *et al.*, 2017; Bekele *et al.*, 2022); incluso, en suelos arcillosos y de bajo pH, los óxidos e hidróxidos de aluminio llegan a unirse a compuestos orgánicos y contribuyen a la estabilización de la materia orgánica (Zacháry *et al.*, 2023), fuente importante de nitrógeno en suelos amazónicos (Bozzi *et al.*, 2023). Sin embargo, cuando el aluminio se hace soluble afecta negativamente a los microorganismos que intervienen en el ciclo del nitrógeno. En este sentido, Bossolani *et al.*, (2020) reportaron que la neutralización de la acidez del suelo aumenta las arqueas y bacterias que

intervienen en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Además, las elevadas concentraciones de aluminio y los bajos niveles de fósforo (condiciones comunes en suelos con pH < 5,0), limitan el crecimiento y la nodulación de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno en las leguminosas (Bakari *et al.*, 2020). En consecuencia, la toxicidad del aluminio puede tener serias implicaciones en la disponibilidad del nitrógeno en cultivos establecidos en ultisoles y oxisoles.

Estos suelos ácidos de la Amazonia también presentan altas concentraciones de Zn, Cu, Fe y Mn (Gonçalves *et al.*, 2022) que, aunque resultan esenciales para la planta, a pH bajo son altamente solubles y pueden ocasionar deficiencias de otros elementos (como Mg y Si) al igual que toxicidad en cultivos sensibles (Rai *et al.*, 2021; Armatmontree *et al.*, 2023).

Lo anteriormente expuesto manifiesta la clara relación entre las condiciones de acidez y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. La Tabla 1 registra variaciones significativas en la disponibilidad de nutrientes cuando, a partir del encalado, se incrementa el pH (de 4,36 a 5,91) y se disminuye el aluminio intercambiable en suelos ácidos.

Tabla 1.

Relación entre pH y aluminio y la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos del trópico

Nutriente	Acidez del suelo		Fuente
	Alta	Baja	
Nitrógeno (%)	0,15	0,19	Ejigu <i>et al.</i> , 2023*
Fósforo (mg kg ⁻¹)	7,26	10,45	
Potasio (cmol(+) kg ⁻¹)	0,17	0,28	

Calcio ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$)	0,65	4,49	Rosas <i>et al.</i> , 2017**
Magnesio ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$)	0,14	2,99	
Cobre (mg kg^{-1})	1,69	0,92	
Hierro (mg kg^{-1})	102,84	32,52	
Manganoso (mg kg^{-1})	19,10	15,57	
Molibdeno (mg kg^{-1})	0,65	1,70	Rosado <i>et al.</i> , 2021***

*cambio de pH de 4,82 a 5,67 y aluminio intercambiable de 1,44 a 0,45 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$

** cambio de pH de 4,36 a 5,91 y aluminio intercambiable de 1,45 a 0,00 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$

***cambio de pH de 6,3 a 4,92

Fuente: autores.

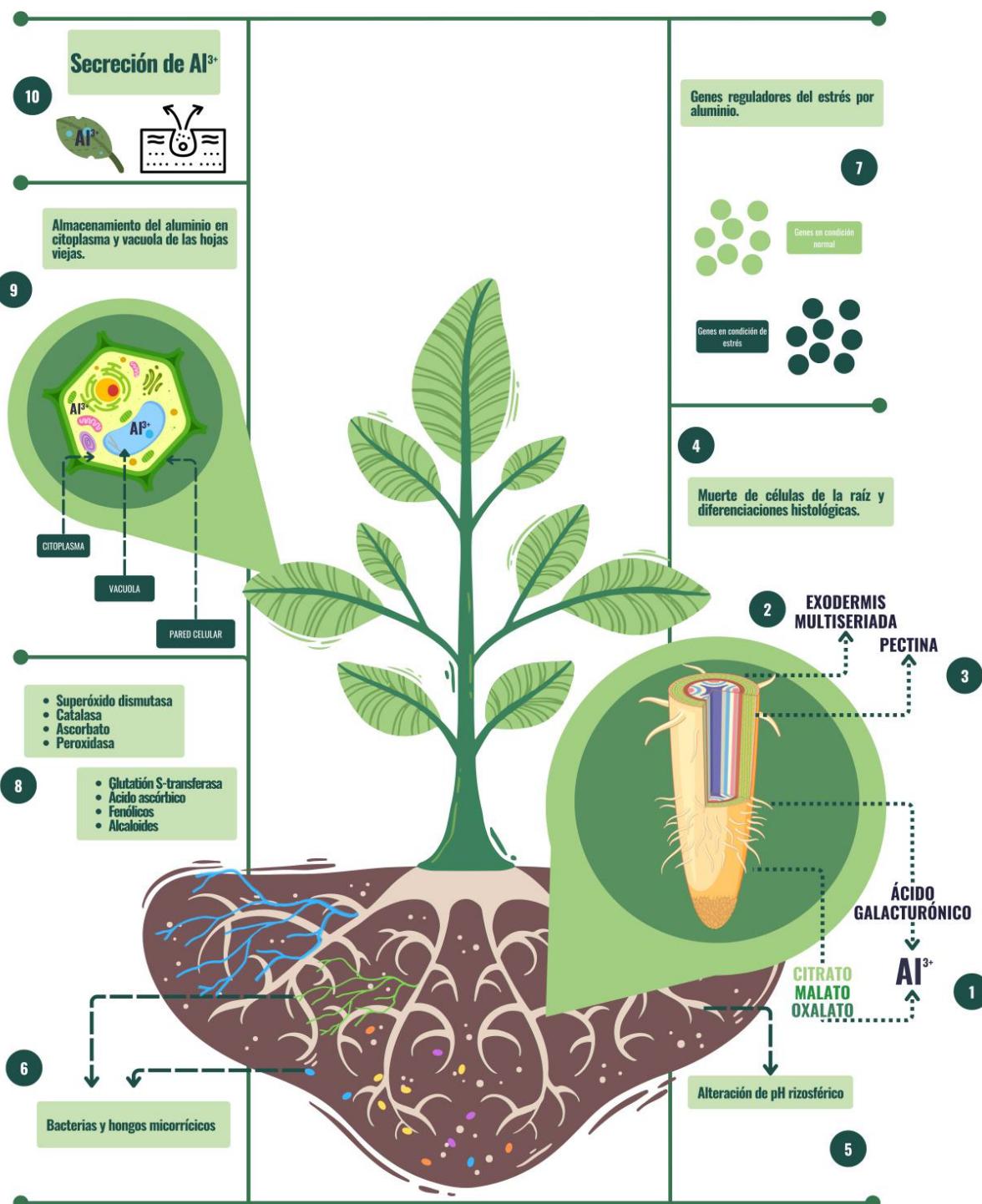
Efectos tóxicos del aluminio en morfología y fisiología de las plantas

Los efectos tóxicos del aluminio y su impacto en las plantas dependen en gran medida de la concentración, el tiempo de exposición, las especies de plantas, la edad de desarrollo y las condiciones de crecimiento (Ofoe *et al.*, 2023), esta toxicidad hace que las plantas disminuyan el contenido de clorofila, longitud de brotes, longitud de las raíces y presenten daños estructurales en el tejido foliar (Lin *et al.*, 2023), ocasionando por la generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Al respecto, Chunquan *et al.*, (2021) encontraron que 50 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de aluminio indujeron la generación de ROS que inhibieron la germinación, el crecimiento de las raíces y la muerte de las células ubicadas el ápice de las raíces. Incluso niveles bajos de aluminio (0,4 $\mu\text{mol L}^{-1}$) pueden afectar el crecimiento de raíz y tallo, el contenido de clorofila, azúcares, almidones, los niveles de potasio,

calcio, magnesio y fósforo (Che *et al.*, 2023). Sin embargo, es importante considerar que las plantas responden de manera diferenciada ante el estrés abiótico originado por las condiciones de acidez (Rosas *et al.*, 2019).

Mecanismos de adaptación y tolerancia de las plantas a la toxicidad por aluminio

Las plantas, ante el estrés por la toxicidad ocasionada por Al^{3+} , generan mecanismos de tolerancia basados en la exclusión (impeir que el aluminio entre en las raíces) y la desintoxicación (contrarrestar el aluminio tóxico absorbido por las raíces) (Yan *et al.*, 2023). Cuando este aluminio no es retenido en la raíz, se transporta a los demás órganos de la planta en el siguiente orden: hojas maduras > raíces > ramas > hojas jóvenes (Fung *et al.*, 2009). Las plantas desarrollan mecanismos de adaptación a las altas concentraciones de aluminio en suelos ácidos, basadas en cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos.



Las plantas desarrollan mecanismos de adaptación a las altas concentraciones de aluminio en suelos ácidos, basadas en cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos (Figura 2). Una estrategia común consiste en que liberan por la raíz ácidos orgánicos de bajo (citrato, oxalato y malato) y alto (ácido galacturónico) peso molecular para formar con el aluminio complejos no tóxicos (Kundu y Ganesan, 2020), acumulando pectina para desarrollar una exodermis multiseriada con celulosa y hemicelulosa que actúa como una barrera para atrapar al aluminio en la raíz (Jiang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022). Estas plantas también regulan la muerte programada de las células de la raíz y desarrollan diferenciaciones histológicas de los pelos radicales para engrosar la endodermis con el fin de retener al aluminio (Yao *et al.*, 2020; Pandey *et al.*, 2022).

Para reducir el efecto de la generación de ROS por la toxicidad, sobreexpresan genes reguladores de estrés (Gallo-Franco *et al.*, 2023), activan enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa, glutatión S-transferasa, ácido ascórbico, fenólicos y alcaloides (Ranjan *et al.*, 2021), almacenan el aluminio que ingresa a la planta en el citoplasma y la vacuola de las hojas viejas (Zhu y Shen, 2023) y secretan el aluminio por los tricomas de la hoja en forma de exudados (Ofoe *et al.*, 2023). Ya en la rizosfera, estas plantas modifican el pH rizosférico mediante los exudados de la raíz para disminuir la concentración de aluminio (Rahman y Upadhyaya, 2021) y potencian interacciones bióticas con bacterias y hongos micorrízicos para mejorar la eficiencia en la toma de nutrientes (Pandey *et al.*, 2022).

Mecanismos de manejo de la acidez en suelos de uso agrícola

El manejo de la acidez del suelo es una práctica de uso común que se realiza con el propósito de elevar el pH (a valores cercanos a 5,5 donde el aluminio deja de ser soluble), reducir la acidez intercambiable (Al^{++} H^+) mediante la formación de complejos insolubles de Al(OH)_3 , mejorar la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) y aumentar la disponibilidad de nutrientes, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ (Rosas *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2020; Ejigu *et al.*, 2023). Existen diferentes alternativas a las que se puede recurrir para controlar la acidez de los suelos agrícolas. La más utilizada es tal vez el encalado, el cual consiste en la aplicación de material fino (< 0,25 micras) de cal agrícola (CaCO_3), cal viva (CaO), cal hidratada (Ca(OH)_2) o cal dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$).

En muchas ocasiones la determinación del requerimiento de cal (RC) es basado exclusivamente en el pH y el aluminio intercambiable del suelo (Rosas *et al.*, 2017), pero este método puede conllevar a que se subestime el RC por hectárea o incluso que se sobreestime el RC, lo que genera deficiencias de Fe, B, Mn, Zn y Cu, liberación excesiva de CO_2 y baja rentabilidad agrícola (Aramburu *et al.*, 2023). El RC para cada suelo puede variar dependiendo de: primero, las condiciones edafológicas como la textura, el contenido de materia orgánica, el poder tampon y la profundidad del encalado (Ruehlmann *et al.*, 2021); segundo, las características (porcentaje de pureza y poder de neutralización) de

la cal a utilizar (Rosas *et al.*, 2017); tercero, la forma de aplicación (superficial o incorporada al suelo con maquinaria), cuando la cal se incorpora se requiere menos dosis y los efectos perduran durante más tiempo (de Campos *et al.*, 2022); y cuarto, la tolerancia del cultivo a la acidez del suelo (Aramburu *et al.*, 2023). Cuando las dosis de cal son adecuadas el proceso de reacidificación es lento, por lo que no es necesario adicionar nuevamente cal durante mucho tiempo, el efecto puede incluso durar más de cuatro décadas (Tiecher *et al.*, 2021).

Pero en ocasiones la cal aplicada en la superficie puede resultar insuficiente para corregir la acidez del subsuelo por lo que el yeso agrícola (CaSO_4) resulta una excelente opción para mejorar el movimiento de la cal en el subsuelo (Lauricella *et al.*, 2021); además, este reduce la fitotoxicidad del aluminio puesto que el sulfato de aluminio soluble (AlSO_4^+) e hidróxidos de aluminio (Al(OH)_3) que se generan en la reacción son inocuos para las plantas (Anderson *et al.*, 2020). Cerdá *et al.*, (2022), encontraron que enmiendas con cal dolomítica y yeso agrícola resultaron eficaces para regular el aluminio soluble (de 1,33 a 0,56 cmol(+) kg^{-1}) e incrementar el pH de 4,3 a 4,9.

El uso de materia orgánica constituye otra práctica importante para regular los efectos de la acidez, aunque en su mineralización se producen ácidos débiles que ocasionan una leve disminución en el pH del suelo (Pavlú *et al.*, 2021), sin embargo, debido a su capacidad complejante se reduce la concentración de aluminio en la solución del suelo (Mbanjwa *et al.*, 2023). Por ello, la incorporación

de materiales orgánicos como el biochar disminuyen la acidez del suelo (Ndiate *et al.*, 2022).

Los subproductos industriales, especialmente los residuos de calderas y escorias, también son utilizados para controlar la acidez de los suelos, sus condiciones alcalinas $\text{pH}>11$ resultan efectivas a la hora de incrementar el pH del suelo, sin embargo, su uso debe ser estrictamente regulado puesto que algunos pueden contener elementos contaminantes como Cd, Pb y Ar (Hadas *et al.*, 2021).

Todas estas alternativas de enmiendas pueden resultar útiles a la hora de manejar los problemas ocasionados por la acidez del suelo, pero es preciso encontrar siempre la opción de mayor viabilidad agroecológica, económica, social y ambiental.

Efecto de la acidez en cultivos de importancia agrícola en la Amazonía colombiana

A pesar de las dificultades que representa constituir proyectos agropecuarios en suelos ácidos, los productores rurales de la región amazónica en Colombia han establecido algunos cultivos que no solo son la base de su subsistencia alimentaria, sino que sustentan en gran medida la economía local. Sin embargo, y aunque algunas variedades pueden presentar adaptación a las condiciones de acidez de los suelos, los rendimientos de producción suelen estar muy por debajo del potencial genético expresado en condiciones de baja acidez (Deenik *et al.*, 2000; Rosas

et al., 2021; Delgado *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2021).

Por esta razón, se realiza una síntesis de investigaciones de libre acceso que dan cuenta del comportamiento en condiciones de acidez de los principales cultivos agrícolas en la Amazonía colombiana (Agronet, 2023), esperando que no solo sea de utilidad a la hora de

establecer y manejar estos cultivos, sino también resaltar la necesidad de que las instituciones que tienen injerencia en el sector agrario local mejoren la gestión de conocimiento relacionado con el uso y manejo de los suelos ácidos para que los productores del campo logren ser más competitivos, contando con una mayor sostenibilidad (Tabla 2).

Tabla 2.

Efecto de la acidez del suelo en principales cultivos de la Amazonía colombiana

Cultivo	pH del suelo		Nivel Crítico de aluminio en el suelo	Tipo de afectación en la planta	Referencia
	Crítico	Óptimo			
<i>Brachiaria</i> spp	< 4,5	4,9	1,33 mmol L ⁻¹	Inhibe desarrollo de raíz	Olivera <i>et al.</i> , (2007); Ferreira <i>et al.</i> , (2020); Furlan <i>et al.</i> , (2020)
Plátano	< 4,7	5,5	78,5 µmol L ⁻¹	Disminuye la absorción de agua y nutrientes	Turner <i>et al.</i> , (1989); Delgado <i>et al.</i> , (2023); Rufyikiri <i>et al.</i> , (2001)
Yuca	< 4,8	5,5	100 µmol L ⁻¹	Reduce el peso de raíz	Anikwe <i>et al.</i> , (2016); Punpom <i>et al.</i> , (2022)
Caucho	< 4,4	5,5	100 µmol L ⁻¹	Limita crecimiento y producción	Ambily, (2022); Yang <i>et al.</i> , (2022)
Cacao	< 4,3	5,5	19% de saturación	Bajo uso eficiente de nutrientes, bajo desarrollo y producción	Baligar y Fageria, (2005); Rosas <i>et al.</i> , (2021)
Caña panelera	< 5,5	5,5	60% de saturación	Restringe el desarrollo de raíz y la absorción de nutrientes y agua	Carreño y Chaparro, (2013)
Chontaduro	< 4,1	5,5	4,4 cmol L ⁻¹	Baja absorción de nutrientes y producción	Deenik <i>et al.</i> , (2000); Bovi <i>et al.</i> , (2004)
Piña	< 4,5	5,5	1,0 cmol(+) kg ⁻¹	Clorosis en hojas jóvenes y bajo desarrollo de raíz	Betancourt <i>et al.</i> , (2005)

Fuente: autores.

Pasturas de *Brachiaria* (*Urochloa* sp.)

Es de amplio conocimiento la capacidad de adaptación de las gramíneas del género *Urochloa* sp. (identificadas por los productores en la región como *Brachiaria*) a condiciones de acidez del suelo (Olivera *et al.*, 2007), estas especies pueden desarrollarse con relativo éxito en suelos de bajo pH (Corre et al., 2020; Villegas *et al.*, 2020). Sin embargo, suelos con pH bajo y presencia de aluminio soluble producen en *U. decumbens*, *U. marandu* y *U. brizantha* cambios fisiológicos y morfológicos como la desorganización del sistema vascular, el colapso de las células corticales y la ausencia de pelos radiculares en la punta de la raíz (Ferreira *et al.*, 2020; Furlan *et al.*, 2020). Existen variedades de *Urochloa* sp, como *U. mulato II* y *U. humidicola*, que presentan mejor tolerancia a la acidez del suelo (Villegas *et al.*, 2023), lo que genera mayores rendimientos de producción en los sistemas ganaderos de la Amazonía.

Plátano (*Musa* spp)

El cultivo de plátano presenta amplia tolerancia al pH del suelo y alcanza altos rendimientos en el rango de 4,7-8,0 pero prefiere suelos con pH neutro (Turner *et al.*, 1989). En condiciones de acidez del suelo, el peso del racimo y el número de manos y dedos se ven afectados negativamente (Delgado *et al.*, 2023). Flarian *et al.* (2023) reportaron que el número de chupones, hojas y dedos por racimo, al igual que el peso y cantidad de dedos del racimo, se correlacionaron positivamente con el pH del suelo.

El Al^{3+} soluble reduce la producción de biomasa en un 65% y la absorción de nutrientes entre 56 y 89%, lo que reduce la producción de la planta (Sancho y Molina, 2016) y afecta negativamente la absorción de agua (hasta en un 50%). Cuando en suelos ácidos se alcanzan incrementos de pH de 3 a 5, la toxicidad de aluminio se reduce significativamente, se incrementa la absorción de nutrientes, mejorando así el desarrollo del plátano (Sancho y Molina, 2016).

Yuca (*Manihot sculenta* Crantz)

La yuca es un cultivo tolerante a los ácidos (Gregory y Wojciechowski, 2020), de hecho, la presencia de aluminio en bajas concentraciones ($50 \mu\text{mol L}^{-1}$) y pH cercanos a 5,5, estimulan la liberación de protones de H^+ los cuales aumentan la solubilidad y absorción de Fe por la planta. Guerra y Chacón, (2012) en una investigación realizada en oxisoles de Colombia, encontraron que la yuca posee alta micotrofía (especialmente con *Glomus* sp) lo que, al parecer, facilita la retención del aluminio en raíz y permite translocar menos cantidad del elemento al tejido foliar (Guerra y Chacón, 2012). A pesar de ello, Anikwe *et al.* (2016) encontraron que aplicaciones de 5 Mg ha^{-1} de CaCO_3 y $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de (CaSO_4) en un ultisol de Nigeria, permitieron mejorar el pH del suelo (de 4,8 a 5,9) favoreciendo al aumento del número de hojas, el índice de área foliar y los rendimientos de cosecha, al pasar de 6 a $9,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Caucho (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll.Arg.)

Aunque el caucho se adapta a los suelos ácidos, en suelos de pH bajo se reduce la extracción de nutrientes (particularmente el fosforo) y se inhibe el crecimiento y engrosamiento del tallo (Diniz *et al.*, 2022). Ambily, (2022) reporta que el caucho prefiere un pH rizosférico neutro o cercanos a 5,5, en donde el efecto de la acidez es tolerable y la disponibilidad de nutrientes es mayor. A pesar de la alta tolerancia de *H. brasiliensis* al aluminio en el suelo, concentraciones elevadas de este pueden afectar el crecimiento del árbol y disminuir los rendimientos (An *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). El árbol de caucho ha desarrollado estrategias de adaptación (probablemente mediante exudaciones de la raíz) a las condiciones de acidez enfocadas a incrementar el pH rizosférico de 4,4 a 5,1 y disminuirlo de 7,4 a 6,2 (Ambily, 2022). Sin embargo, el encalado y las enmiendas orgánicas siempre son una alternativa para mejorar la calidad del suelo y la productividad de las plantaciones de caucho en suelos de alta acidez.

Cacao (*Theobroma cacao* L.)

El árbol de cacao tiene su origen en la Amazonia, pero los cultivos establecidos en la región presentan bajo rendimiento debido a que, la alta acidez y escasa fertilidad del suelo limitan el uso eficiente de nutrientes (Rosas *et al.*, 2021), por lo que los cacaoteros e investigadores de la zona han optado por realizar prácticas de manejo de la acidez del suelo. En otras publicaciones sobre eficiencia de nutrientes en cacao, estos autores hallaron que la acidez del suelo restringe el uso eficiente de N-P-K en clones como ICS-1, ICS-39, TSH-565 y CCN-5 (en menor intensidad), por lo que es necesario encalar y fertilizar teniendo en cuenta las preferencias edáficas para cada clon (Rosas *et al.*, 2019). Sin embargo, cuando se incrementa el pH del suelo a 5,5 mediante el encalado, se aumenta la eficiencia en la absorción de nutrientes y se alcanzan mayores producciones (Rosas *et al.*, 2021).

ciencia de nutrientes en cacao, estos autores hallaron que la acidez del suelo restringe el uso eficiente de N-P-K en clones como ICS-1, ICS-39, TSH-565 y CCN-5 (en menor intensidad), por lo que es necesario encalar y fertilizar teniendo en cuenta las preferencias edáficas para cada clon (Rosas *et al.*, 2019). Sin embargo, cuando se incrementa el pH del suelo a 5,5 mediante el encalado, se aumenta la eficiencia en la absorción de nutrientes y se alcanzan mayores producciones (Rosas *et al.*, 2021).

Caña panelera (*Saccharum officinarum* L.)

El aluminio en suelos ácidos es un factor limitante para el crecimiento de la caña. Los síntomas iniciales de la toxicidad al aluminio son la inhibición del crecimiento radicular, cambios en el desarrollo de los pelos radiculares y clorosis, y quemazón en las hojas superiores (Ribeiro *et al.*, 2021). La aplicación de enmiendas cal es una alternativa vigente para regular los efectos de la acidez en los cultivos de caña.

De Campos *et al.*, (2022), encontraron que la combinación de sistemas de labranza profunda del suelo con la aplicación de cal, es una estrategia potencial para controlar hasta por 42 meses, después del encalado, la acidez del suelo y aumentar la concentración de sacarosa, los rendimientos de tallo y la producción de caña de azúcar. Pero debido a los altos costos del encalado, los ingenieros están optando por desarrollar variedades modificadas genéticamente (transgénicas), las cuales eliminan el aluminio del ápice de la raíz a través de la exudación radicular de

malato y citrato (Ribeiro *et al.*, 2021). Para esta misma táctica, Rosa *et al.* (2020) identificaron y aislaron los genes de variedades de caña tolerantes al estrés de aluminio que inducen la desintoxicación eficiente, la formación de raíces laterales y la activación de enzimas redox.

El suministro de sílice también ayuda a mitigar el estrés abiótico ocasionado por el aluminio en la caña; Junior *et al.* (2023) reportaron que 2 mmol L⁻¹ de Si ayudaron a promover cambios en la morfoanatomía de las raíces para atenuar la toxicidad del aluminio en las plántulas de caña de azúcar al limitar la absorción y el transporte de Al³⁺ a los tejidos.

Mejorar la actividad microbiana en los suelos también contribuye a incrementar la tolerancia de *S. officinarum* al estrés por aluminio. Labanca *et al.* (2020) inocularon plántulas con bacterias promotoras del crecimiento en un suelo con 37% de saturación de Al y pH 4,0, las bacterias aumentaron la biomasa de raíces y brotes, así como los contenidos Ca y B como mecanismo para aliviar el estrés.

Chontaduro (*Bactris gasipaes* Kunth)

El chontaduro es una especie del suroeste de la Amazonia (da Silva y Clement, 2005) de la cual no se encontraron reportes científicos que den cuenta de posibles restricciones o toxicidad ocasionada por el aluminio del suelo. De hecho, Ares *et al.* (2002) manifiestan que *B. gasipaes* se adapta perfectamente a suelos ácidos y poco fértiles, aunque la nu-

trición es necesaria para alcanzar y sostener la producción comercial del cultivo. Deenik *et al.*, (2000) reportaron que el chontaduro puede cultivarse en suelos extremadamente ácidos con saturaciones de aluminio hasta del 71 %, sin embargo, los valores óptimos para su desarrollo corresponden a pH neutros con menos de 1 cmol L⁻¹ de aluminio en solución. Bovi *et al.* (2004) evaluaron los efectos del encalado en el crecimiento y producción de palmito de *B. gasipaes* cultivada en un Ultic Haplorthox con pH de 4,1 y saturación de bases del 26 %, donde encontraron que la mayor absorción de nutrientes al igual que el rendimiento máximo se alcanzaron con 4,3 Mg ha⁻¹ de cal dolomita, cuando el pH se elevó a 4,5 y la saturación de bases a 51,4 %. Sin embargo, se evidenció una disminución significativa en la toma de N, P y micronutrientes, así como en el desarrollo y rendimiento, cuando se aplicaron grandes cantidades de cal (8,7 y 14,6 Mg ha⁻¹) y el pH fue mayor a 4,8. No se encontraron reportes sobre efectos de la acidez del suelo en la producción del fruto de chontaduro.

Piña (*Ananas comosus* L. Merr.)

La piña es un cultivo tropical tolerante a las condiciones de acidez de los suelos, incluso, la piña cayena es considerada una variedad altamente resistente a la presencia de aluminio en solución e incrementa la longitud de raíz y la absorción de Ca, Mg y K (lo cual sería un posible mecanismo para reducir la toxicidad) cuando se somete a 200 µmol L⁻¹ de AlCl₃ (Lin, 2010). Sin embargo, algunos cultivares como Tainung No.17 que son susceptibles a la toxicidad por aluminio,

presentan clorosis en hojas jóvenes y las raíces son cortas y gruesas (Lin, 2010). Al respecto, Cahyono *et al.* (2019) demostraron que aplicaciones de 5 Mg ha⁻¹ de cal dolomita aumentaron el pH de 4,49 a 5,58, la disponi-

nibilidad de potasio, calcio y magnesio en el suelo mejoró la disponibilidad de nutrientes y reguló el efecto tóxico del hierro, lo que influyó en el crecimiento del área foliar.

4 CONCLUSIONES

La información científica consultada en las bases de datos, utilizadas en la búsqueda, permitió concluir que las condiciones de acidez los suelos de la Amazonia colombiana (oxisoles y ultisoles), en particular el aluminio soluble, ocasionan efectos diferenciados en la disponibilidad y absorción de nutrientes como también en la toxicidad de los cultivos. Las especies tolerantes, aunque alcanzan niveles importantes de producción, su rendimiento se ve limitado por la acidez del suelo.

No son del todo claros los mecanismos de respuesta al estrés causado por aluminio reportados para los cultivos abordados en esta revisión (salvo para *Urochloa* sp). Estos parecen presentar adaptación a los suelos ácidos de la región, pero los reportes no son suficientemente concluyentes por lo cual se hace necesario avanzar en el conocimiento sobre los mecanismos de adaptación, los niveles de tolerancia y las prácticas de manejo de estos sembríos.

Por ahora, establecer agriculturas con especies tolerantes a la acidez, es quizás la mejor alternativa para los cultivadores en la región amazónica. Las investigaciones consultadas en esta revisión también sugieren el uso de materiales encalantes y materia orgánica como opción para el manejo de la acidez del suelo, aunque se requiere realizar análisis específicos para la zona, que permitan establecer la dosis requerida, así como su viabilidad económica y edafológica.

Existe información que puede resultar relevante para tomar decisiones relacionadas con el manejo de suelos ácidos, pero en su mayoría, no se encuentra en acceso abierto mientras que su uso se restringe a la escasa capacidad de pago de los investigadores e instituciones académicas y científicas (pocas por demás) que tienen como objeto de estudio los suelos de la Amazonia colombiana.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Gelber Rosas-Patiño: definió la contextualización, el vacío de conocimiento y el propósito de la revisión; definió los términos de bús queda de la bibliografía y demás fundamentos metodológicos de la investigación, lideró la presentación y discusión de la información y las conclusiones; y coordinó

la escritura del manuscrito y ajustes al documento final. **Edgar Álvaro Ávila-Pedraza:** apoyó el proceso de conceptualización, escritura, revisión y edición del manuscrito. **Verenice Sánchez-Castillo:** realizó aportes importantes en la escritura, revisión y edición del documento final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los investigadores de las ciencias del suelo y a los productores del campo, espe-

cialmente a aquellos que deben sortear las dificultades inherentes a los suelos ácidos de la Amazonia colombiana.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

LITERATURA CITADA

Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., Nosworthy, M. G., Beyene, S., & Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 71(9), 852-869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>

Agronet, (2023). *Producción nacional por departamento*. <https://www.agronet.gov.co/Paginas/ProduccionNacionalDpto.aspx>

Agudelo-H. WJ., Castillo, B. NC., & Uriel, M.G. (2023). Scenarios of land use and land cover change in the Colombian Amazon to evaluate alternative post-conflict

- pathways. *Sci Rep*, 13, 2152. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29243-2>
- Alkharabsheh, H.M., Seleiman, M.F., Battaglia, M.L., Shami, A., Jalal, R.S., Alhamad, B.A., Almutairi, K.F., & Al-Saif, A.M. (2021). Biochar and Its Broad Impacts in Soil Quality and Fertility, Nutrient Leaching and Crop Productivity: A Review. *Agronomy*, 11, 993. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>
- Ambily, K. K. (2022). Rhizosphere adaptations of Natural Rubber (*Hevea brasiliensis*) plants. *Research Square*, 1, 1-21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1596248/v1>
- An, F., Li, C.Z., Zhang, T.T., Wang, L.F., Wang, J.K., & Xie, G.S. (2018). Effects of aluminum toxicity on physiological and leaf chlorophyll fluorescent characteristics of rubber tree seedlings. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 29, 4191–4198. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201812.006>
- Anderson, G.C., Pathan, S., Easton, J., Hall, D.J.M., & Sharma, R. (2020). Short- and Long-Term Effects of Lime and Gypsum Applications on Acid Soils in a Water-Limited Environment: 2. *Soil Chemical Properties*. *Agronomy*, 10, 1987. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121987>
- Aramburu M. F., Vasco S. J., Baudron, F., & Hijmans, J. R. (2023). Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. *Geoderma*, 432, 116421. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116421>
- Ares, A., Molina, E., Cox, F., Yost, R., & Boniche, J. (2002). Fertilización fosforada del pejibaye para palmito (*Bactris gasipaes*) en vivero y en plantación. *Agronomía Costarricense*, 26(2), 63-74. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43626206>
- Armatmontree, C., Leksungnoen, P., Nansahwang, A., Aramrak, S., Kongsil, P., & Wisawapipat, W. (2023). Iron toxicity downregulates root-proton efflux and decreases zinc accumulation in cassava. *Annals of Agricultural Sciences*, 68(1), 97-104, <https://doi.org/10.1016/j.aaos.2023.06.004>
- Anikwe M.A.N., Eze, J.C., & Ibusitalo, A.N. (2016). Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta Crantz.*) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu South-eastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 158, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Bakari, R., Mungai, N., Thuita, M., & Masso, C. (2020) Impact of soil acidity and liming on soybean (*Glycine max*) nodulation and nitrogen fixation in Kenyan soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 70(8), 667-678. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1833976>
- Baligar, V. C., & Fageria, N. K. (2005). Aluminum influence on growth and uptake of micronutrients by cacao. *Journal of food agriculture and environment*, 3(3-4), 173-177.
- Barrow, N.J., & Hartemink, A.E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant*

- Soil*, 487, 21–37. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Delgado, L. B., Calle, D.A., Cardona, S. P., Sánchez, D. C., Bernal, M.G., & Henao, S. Z. (2023). Relationship between soil acidity and productivity of banana (*Musa* spp.) in Urabá, Colombia. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 39(2), 228–238. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-20RBL60020>
- Bekele W. M., Haile W. W., & Kebede Y. F. (2022). Effects of minimum tillage and liming on maize (*Zea mays* L.) yield components and selected properties of acid soils in Assosa Zone, West Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100301>
- Betancourt Y, P., Montilla, I., Hernández, C., y Gallardo, E. (2005). Fertilización nitrogenada en el cultivo de piña (*Ananas comosus* L. Merr) en el sector Páramo Negro, municipio Iribarren estado Lara. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(4), 382-393. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182005000400006&lng=es&tlang=es
- Bossolani, J.W., Costa, C. CA., Merloti, L.F., Moretti, L.G., Costa, N.R., Tsai, S.M., & Kuramae, E.F. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, 375, 114476. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>
- Bovi, M. L. A., Spiering, S. H., & Saes, L. A. (2004). Peach palm growth and heart-of-palm yield responses to liming. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 28, 1005-1012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600009>
- Bozzi, Z. L., Ferreira, L. J., dos Santos, A.C., Pellegrino, C. C.E., & Senna, O. T. (2023). Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in Amazon rainforest-Cerrado transition environment. *CATENA*, 231, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107346>
- Cahyono, P., Loekito, S., Wiharso, D., Afandi, Rahmat, A., Nishimura, N., Noda K., & Masateru, S. (2019). Influence of liming on soil chemical properties and plant growth of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) on red acid soil, Lampung, Indonesia. *Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2797-2803. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1671441>
- Carreño, A. y Chaparro G. A. (2013). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum*, 18(3), 283-310. <http://www.scielo.org.co/pdf/unsc/v18n3/v18n3a04.pdf>
- Cerda, M. G., Salgado, M. G., Esquinca, H. y Gómez, A. I. (2022) Manejo agronómico de la acidez y aluminio en suelos de plantaciones de café, *coffee arabica* en berriozabal, motozintla. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*,

- 6(4), 147-164. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2525
- Che, J., Zhao, X.Q., & Shen, R.F; (2023). Molecular mechanisms of plant adaptation to acid soils: A review. *Pedosphere*, 33(1), 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.10.001>
- Chiapini, M., Schellekens, J., Calderi O J., Calegari, R., & Vidal T., P. (2023). Pedogenesis in very deep autochthonous Ferralsols of the Paraná Igneous Province (Brazil). *CATENA*, 224, 106981, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106981>
- Chunquan, Z., Wenjun, H., Xiaochuang, C., Lianfeng, Z., Yali, K., Qianyu, J., Guoxin, S., Weipeng, W., Hui, Z., & Junhua, Z. (2021). Physiological and Proteomic Analyses Reveal Effects of Putrescine-Alleviated Aluminum Toxicity in Rice Roots. *Rice Science*, 28(6), 579-593, <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.03.002>
- Corte, B. J.L., López, A. S.A., Favarin, & J.L. Mazzafera, P. (2020). Review: *Urochloa* in Tropical Agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 2571-581X. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- da Silva, J. B. F., & Clement, C. R. (2005). Wild pejibaye (*Bactris gasipaes* Kunth var. chichagui) in Southeastern Amazonia. *Acta Botanica Brasilica*, 19, 281-284. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000200010>
- de Campos, M., Penn, C. J., González, J. M., & Costa C. C.A. (2022). Effectiveness of deep lime placement and tillage systems on aluminum fractions and soil chemical attributes in sugarcane cultivation. *Geoderma*, 407, 115545. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115545>
- Deenik, J., Ares, A., & Yost, R. S. (2000). Fertilization response and nutrient diagnosis in peach palm (*Bactris gasipaes*): a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, 195-207. <https://doi.org.ezproxy.unal.edu.co/10.1023/A:1009847508353>
- Diniz, A.R., da Silva C. S., Pereira, M. G., Zonta, E., Fernandes D. A.C., Souza, A. C.O., & de Moraes A. G.L. (2022). Influence of spatial variability of soil chemical attributes on the nutritional status and growth of the rubber tree. *Bioscience Journal*, 38, e38052. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-54026>
- Ejigu, W., Selassie, Y. G., & Elias, E. (2023). Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (*Triticum aestivum* L.) yields in northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e13988. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13988>
- Ferreira S. T., Garcia F. B., dos Santos I. R.M., Silva A. S., & Costa F. M.G. (2020). Immunocytochemistry and Density Functional Theory evidence the competition of aluminum and calcium for pectin binding in *Urochloa decumbens* roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.015>
- Flarian, M.M., Frederick, A.O., Samuel, A.O., John, W. K., & Cosmas, W. (2023). Variations in soil chemical properties and growth traits of tissue culture banana under bio-slurry soil amendments

- in Uganda. *Environmental Sustainability*, 6, 341–357. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00274-9>
- Fung, K., Carr, H., Poon, B., & Wong, M. (2009). A comparison of aluminum levels in tea products from Hong Kong markets and in varieties of tea plants from Hong Kong and India. *Chemosphere*, 75, 955–962. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.003>
- Furlan, F., Borgo, L., Silveira R. F.H., Lanzoni R. M., Scaglia L. F., Pinheiro M. A., Antunes A. R., & Lavres, J. (2020). Aluminum-induced toxicity in *Urochloa brizantha* genotypes: A first glance into root Al-apoplastic and -symplastic compartmentation Al-translocation and antioxidant performance. *Chemosphere*, 243, 125362. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125362>
- Gallo F. J.J., Zuluaga Y. I., Restrepo G. A.M., Sosa, C.C., Zapata B. S., Gutiérrez M. J.P., Ghneim H. T. y Quimbaya, M. (2023). Transcriptional analysis in four wild and cultivated rice genotypes identifies aluminum-induced genes. *Plant Stress*, 10, 100247, 2667-064X, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100247>
- Gonçalves, D.A.M., Pereira, W.V.d.S., Johannesson, K.H., Pérez, D.V., Guilherme, L.R.G., & Fernandes, A.R. (2022). Geochemical Background for Potentially Toxic Elements in Forested Soils of the State of Pará, Brazilian Amazon. *Minerals*, 12, 674. <https://doi.org/10.3390/min12060674>
- Gregory, P.J., & Wojciechowski, T. (2020). Chapter one - root systems of major tropical root and tuber crops: root architecture, size, and growth and initiation of storage organs. *Adv. Agron*, 161, 1–25. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.01.001>
- Guerra, B. E., & Chacón, M. R. (2012). Simbiosis micorrízica arbuscular y acumulación de aluminio en *Brachiaria decumbens* y *Manihot esculenta*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 10(2), 87-98. <https://revistas.unicauna.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/812/436>
- Jiang, N., Ren, J., Zu, Y., Sun, W., Ma, X., & Bi, Y. (2022). Aluminum Exposure Effect on Cell Wall Pectin Methyl Esterification in Alfalfa with Different Aluminum Tolerance. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5). <https://doi.org/10.15244/pjoes/149448>
- Junior, G. S.S., Hurtado, A. C., Alves, R. C., Gasparino, E. C., & Santos, D. M. M. (2023). Interactive Role of Silicon on Attenuating Aluminum Toxicity in Sugarcane by Modifying Growth, Root Morpho-anatomy. *Photosynthetic Pigments, and Gas Exchange Parameters*. 1-24. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2662416/v1>
- Hadas, E., Mingelgrin, U., & Fine, P. (2021). Economic cost–benefit analysis for the agricultural use of sewage sludge treated with lime and fly ash. *Int J Coal Sci Technol*, 8, 1099–1107. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00439-z>
- Husain, S.H., Mohammed, A., Ch'ng, H.Y., & Khalivulla, S.I. (2021). Residual ef-

- fects of calcium amendments on oil palm growth and soil properties. IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science*, 756(1), 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012060>
- Kundu, A., & Ganesan, M. (2020). Gh-MATE1 expression regulates Aluminum tolerance of cotton and overexpression of GhMATE1 enhances acid soil tolerance of Arabidopsis. *Current Plant Biology*, 24, 100160, <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100160>
- Kundu, A., & Ganesan, M. (2023). Low pH stress activates several genes for lateral root formation and detoxification of aluminum ions in Cotton plants. *Plant Stress*, 9, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100188>
- Labanca, E. R.G., Andrade, S. A.L., Kura-mae, E. E., & Silveira, A. P.D. (2020). The modulation of sugarcane growth and nutritional profile under aluminum stress is dependent on beneficial endophytic bacteria and plantlet origin. *Applied Soil Ecology*, 156, 103715. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103715>
- Lauricella, D., Butterly, C.R., Weng, Z., Clark, G.J., Sale, P. W.G., Li, G., & Tang, C. (2021). Impact of novel materials on alkalinity movement down acid soil profiles when combined with lime. *J Soils Sediments*, 21, 52–62. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02747-4>
- Li, X., Zhang, X., Zhao, Q., & Liao, H. (2023). Genetic improvement of legume roots for adaption to acid soils. *The Crop Journal*, 11(4), 1022-1033. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.04.002>
- Li, Z., Huang, F., Hu, B., & Qiu, M. (2022). Detoxification of aluminum by Ca and Si is associated to modified root cell wall properties. *Theor. Plant Physiol.*, 34, 131–142. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00235-3>
- Lin, Q., Huai, Z., Riaz, L., Peng, X., Wang, S., Liu, B., Yu, F., & Ma, J. (2023). Aluminum phytotoxicity induced structural and ultrastructural changes in submerged plant Vallisneria natans. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 250, 114484, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114484>
- Lin, Y. H. (2010). Effects of aluminum on root growth and absorption of nutrients by two pineapple cultivars [*Ananas comosus* L.) Merr.]. *African Journal of Biotechnology*, 9(26), 4034-4041. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/82560>
- Malagón, C. D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(104), 319-342. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2082/3506>
- Mbanjwa, W. E., Muchaonyerwa, P., & Hughes, J.C. (2023). Total organic carbon, aluminium and iron in bulk samples and aggregate size fractions of a sandy clay loam humic soil under sugarcane relative to native forest in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Heliyon*, 9(3), e14000, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14000>

Ndiate, N. I., Qun, C. L., & Nkoh, J.N. (2022). Importance of soil amendments with biochar and/or Arbuscular Mycorrhizal fungi to mitigate aluminum toxicity in tamarind (*Tamarindus indica* L.) on an acidic soil: A greenhouse study. *Heliyon*, 8(2), e09009, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09009>

Nie, Z., Li, J., Liu, H., Liu, S., Wang, D., Zhao, P., & Liu, H. (2020). Adsorption kinetic characteristics of molybdenum in yellow-brown soil in response to pH and phosphate. *Open Chem*, 18, 663-8. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0501>

Ofoe, R., Thomas, R. H., Asiedu, S. K., Wang, P. G., Fofana, B., & Abbey, L. (2023). Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1664-462X. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>

Olivera, Y., Machado, R., Del Pozo, P.P., Ramírez, J. y Cepero, B. (2007). Evaluación de accesiones de *Brachiaria brizantha* en suelos ácidos: Época de máximas precipitaciones. *Pastos y Forrajes*, 30(3), 303-313. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942007000300002&lng=es&tlang=es

Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjarts-son, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... & McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and

elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(160). <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>

Pavlú, L., Borúvka, O., & Nokodem, A. (2021). Effect of natural and anthropogenic acidification on aluminium distribution in forest soils of two regions in the Czech Republic. *For. Res*, 32, 363–370. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01061-1>

Peña, V. C.P. y Vanegas, C. G.I. (2010). *Dinámica de suelos amazónicos procesos de degradación y alternativas para su recuperación*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas “SINCHI”. <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/librosuelosweb.pdf>

Prietzl, J., Villalba, A. G., Häusler, W., Eusterhues, K., Mahakot, S., & Klysubun, W. (2023). Aluminum speciation in forest soils and forest floor density fractions using synchrotron-based XANES spectroscopy. *Geoderma*, 431, 116373, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116373>

Punpom, T., Leksungnoen, P., Aramrak, S., Kongsil, P., & Wisawapipat, W. (2022). Triggering root proton efflux as an aluminum-detoxifying mechanism in cassava. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), 173-180, <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2022.10.002>

Rai, S., Kumar P. S., Mankotia, S., Swain, J., & Satbhai, S. B. (2021). Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, 1, 100008, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008>

- Rahman, R., & Upadhyaya, H. (2021). Aluminium Toxicity and Its Tolerance in Plant: A Review. *J. Plant Biol*, 64, 101–121. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>
- Ranjan, A., Sinha, R., Sharma, T. R., Pattayak, A., & Singh, A. K. (2021). Alleviating aluminum toxicity in plants: Implications of reactive oxygen species signaling and crosstalk with other signaling pathways. *Physiologia Plantarum*, 173(4), 1765–1784. <https://doi.org/10.1111/ppl.13382>
- Ribeiro, A. P., Vinecky, F., Duarte, K. E., Thaís R. S., das Chagas, N.C.R.A., Hell, A.F., da Cunha, B.A. D.B., Martins, P.K., da Cruz C. D., de Oliveira, M. P.A., de Almeida, C. G. M., Magalhães, J. V., Kobayashi, A.K., de Souza, W.R., & Molinari, H.B.C. (2021). Enhanced aluminum tolerance in sugarcane: evaluation of SbMATE overexpression and genome-wide identification of ALMTs in *Saccharum* spp. *BMC Plant Biology*, 300, 21, <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02975-x>
- Rodríguez, G. G., Sepúlveda, O. J., Ramírez, C. C., Ortiz, P. F. H., Ramos, C. K., Bermúdez, C. J. G. y Sierra, R. M. I. (2011). Unidades, petrografía y composición química del complejo migmatítico de Mitú en los alrededores de Mitú, Colombia. *Boletín de Geología*, 33(1), 27-42. <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v33n1/v33n1a03.pdf>
- Rosa, S. T.M., Silva, R. G. D., Kumar, P., Kottapalli, P., Crasto, C., Kottapalli, K. R., & Zingaretti, S. M. (2020). Molecular mechanisms underlying sugarcane response to aluminum stress by RNA-Seq. *International journal of molecular sciences*, 21(21), 7934. <https://doi.org/10.3390/ijms21217934>
- Rosado, TL., Freitas, MSM., Carvalho, AJC., Gontijo, I., Pires, AA., Vieira, HD., & Barcellos, R. (2021). Soil chemical properties and nutrition of conilon coffee fertilized with molybdenum and nitrogen. *Rev Bras Cienc Solo*, 45, e0210034. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210034>
- Rosas P. G., Puentes, P. Y. J. y Menjivar, F. J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Cropica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Rosas P. G., Puentes, P. Y. J., & Menjivar, F. J. C. (2019). Liming effect on macronutrient intake for cacao (*Theobroma cacao* L.) in the Colombian Amazon. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* 20, 5–28. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247
- Rosas P. G., Puentes P. Y.J. y Menjivar F. J.C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 24(1), e1643. <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- Ruehlmann, J., Bönecke, E., & Meyer, S. (2021). Predicting the Lime Demand of Arable Soils from pH Value, Soil Texture and Soil Organic Matter Content. *Agronomy*, 11, 785. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040785>

Rufyikiri, G., Dufey, J., Nootens, D., & Delvaux, B. (2001). Efecto del aluminio sobre plátanos (*Musa spp.*) cultivados en soluciones ácidas. II. Absorción de agua y nutrientes. *Frutas*, 56(1), 5-16. <https://doi.org/10.1051/frutas:2001107>

Ruiz, A. C.A., Gutiérrez, B. F., Cortes, G. A.M., & Suárez, A. (2022). A first approximation to the Colombian Amazon basin remnant natural capital. Policy and development implications. *Trees, Forests and People*, 10, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100334>

Sancho, H. y Molina, E. (2016). Efecto del Mg y pH en la reducción de la toxicidad de Al en plantas de banano cultivadas en solución hidropónica. *Siembra*, 3(1), 53–66. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.260>

Teixeira, W. G., Álvarez V., V. H., Neves, J. C. L., & Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 44, e0200078. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200078>

Tiecher, T., Fontoura, S. M.V., Ambrosini, V. G., Araújo, E. A., Alves, L. A., Bayer, C., & Gatiboni, L. C. (2021). Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. *Geoderma*, 435, 116495, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116495>

Turner, D.W., Korawis, C., & Robson, A.D. (1989). Soil analysis and its relationship with leaf analysis and banana yield with special reference to a study at Carnarvon,

Western Australia. *Fruits*, 44, 193-203. [file:///C:/Users/57310/Downloads/CIR-ADjournals,+438351_EN%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/57310/Downloads/CIR-ADjournals,+438351_EN%20(1).pdf)

Villegas, D. M., Velásquez, J., Arango, J., Obregón, K., Rao, I. M., Rosas, G., & Obereson, A. (2020). *Urochloa* grasses swap nitrogen source when grown in association with legumes in tropical pastures. *Diversity*, 12(11), 419. <https://doi.org/10.3390/d12110419>

Villegas, D. M., Arévalo, A., Sotelo, M., Núñez, J., Moreta, D., Rao, I., ... y Arango, J. (2023). Phenotyping of *Urochloa* humicola grass hybrids for agronomic and environmental performance in the Piedmont region of the Orinoquian savannas of Colombia. *Grass and Forage Science*, 78(1), 119–128. <https://doi.org/10.1111/gfs.12582>

Yan, L., Riaz, M., Li, S., Cheng, J., & Jiang, C. (2023). Harnessing the power of exogenous factors to enhance plant resistance to aluminum toxicity; a critical review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 203, 108064, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108064>

Yang, Z., Zhao, P., Peng, W., Liu, Z., Xie, G., Ma, X., An, Z., & An, F. (2022). Cloning, Expression Analysis, and Functional Characterization of Candidate Oxalate Transporter Genes of HbOT1 and HbOT2 from Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*). *Cells*, 11(23), 3793. <https://doi.org/10.3390/cells11233793>

Yao, S., Luo, S., Pan, C., Xiong, W., Xiao, D., Wang, A., Zhan, J., & He, L. (2020). Metacaspase MC1 enhances aluminum-in-

duced programmed cell death of root tip cells in Peanut. *Plant Soil*, 448, 479–494. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04448-w>

Zacháry, D., Filep, T., Jakab, G., Inger, M., Balázs, R., Németh, T., & Szalai, Z. (2023). The effect of mineral composition on soil organic matter turnover in temperate for-

est soils. *J Soils Sediments*, 23, 1389–1402. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03393-8>

Zhu, X.F., & Shen, R. F. (2023). Towards sustainable use of acidic soils: Deciphering aluminum-resistant mechanisms in plants. *Fundamental Research*, 14, 41. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.03.004>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



Fecha de recibido: 02-05-2024

Fecha de aceptado: 19/08/2024

DOI: 10.22490/21456453.8115

COLCHICINA COMO INDUCTORA DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS Y ESTOMÁTICOS EN *Kalanchoe × laetivirens* DESC.

COLCHICINE AS AN INDUCER OF MORPHOLOGICAL AND STOMATAL CHANGES IN *Kalanchoe × laetivirens* DESC.

¹
Seir Antonio Salazar Mercado
²
Cristóbal Zambrano Parada

¹Biólogo MSc., Departamento de Biología. Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia.
seirantoniosm@ufps.edu.co

²Bacteriólogo MSc., Departamento de Biología. Universidad Francisco de Paula Santander. cris-tobalzp@ufps.edu.co

Citación: Salazar, S., y Zambrano, C. (2025). Colchicina como inductora de cambios morfológicos y estomáticos en *Kalanchoe × laetivirens* Desc. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 213 - 228. <https://doi.org/10.22490/21456453.8115>

RESUMEN

Contextualización: una de las estrategias empleadas en fitomejoramiento con plantas medicinales es la inducción artificial de poliploidía.

Vacío de conocimiento: se observa una falta de información sobre los efectos específicos de la poliploidía en *Kalanchoe × laetivirens* Desc. Además, la carencia respecto al tema de cómo estos afectan directamente a la producción de compuestos medicinales u otras características relevantes que permitan su uso medicinal.

Propósito: se evaluó el impacto de diversas dosis de colchicina en la morfología foliar y en la estructura estomática de *Kalanchoe × laetivirens*

Metodología: se aplicaron las soluciones de colchicina a las plantas durante 12 horas (0.025%, 0.05% y 0.1% p/v) y se evaluaron parámetros anatómicos (número de hojas, altura, longitud y ancho foliar) durante 10 semanas. Se analizó el tamaño, la densidad y el número de cloroplastos por estoma de una planta por tratamiento.

Resultados y conclusiones: las concentraciones más altas de colchicina indujeron un aumento relevante en la altura, el número y el ancho de las hojas. De igual manera, se observó una relación dosis-respuesta en las mejoras morfológicas. Las plantas tratadas con colchicina presentaron estomas de tamaño superior, mayor densidad estomática y un incremento en la cantidad de cloroplastos por estoma teniendo en cuenta el control. Los resultados sugieren una asociación entre el nivel de ploidía y las características estomáticas, con posibles implicaciones en la fisiología de la planta. Son necesarios más estudios para entender los efectos a largo plazo de la colchicina y evaluar posibles efectos adversos. La inducción de poliploidía con colchicina en *Kalanchoe × laetivirens* es una técnica prometedora para mejorar la morfología foliar y las características estomáticas, con potencial para aplicaciones en investigación y agricultura.

Palabras clave: *inhibidor mitótico*, índice estomático, planta medicinal, poliploidización

ABSTRACT

Contextualization: One of the strategies used in plant breeding with medicinal plants is the artificial induction of polyploidy.

Knowledge gap: The lack of information on the specific effects of polyploidy in *Kalanchoe × laetivirens* Desc. and how these directly affect the production of medicinal compounds or other characteristics relevant to their medicinal use.

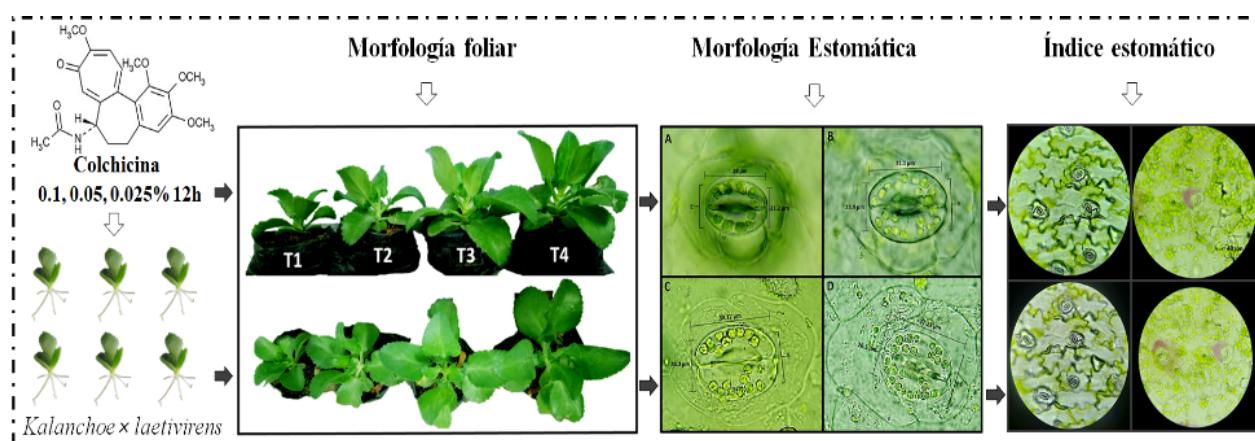
Purpose: The impact of various doses of colchicine on leaf morphology and stomatal structure of *Kalanchoe × laetivirens* was evaluated.

Methodology: Colchicine solutions were applied to plants for 12 hours (0.025%, 0.05% and 0.1% w/v) and anatomical parameters (number of leaves, height, length and leaf width) were evaluated for 10 weeks. The size, density and number of chloroplasts per stomata of one plant per treatment were analyzed.

Results and conclusions: Higher colchicine concentrations induced a relevant increase in leaf height, number and width. A dose-response relationship was observed in morphological improvements. Colchicine-treated plants showed larger stomata, higher stomatal density and an increase in the number of chloroplasts per stomata compared to the control. The results suggest an association between ploidy level and stomatal characteristics, with possible implications for plant physiology. Further studies are needed to understand the long-term effects of colchicine and to evaluate possible adverse effects. Induction of polyploidy with colchicine in *Kalanchoe × laetivirens* is a promising technique for improving leaf morphology and stomatal characteristics, with potential for applications in research and agriculture.

Keywords: mitotic inhibitor, medicinal plant, polyploidization, stomatal index

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Las especies de *Kalanchoe* son principalmente abundantes en Madagascar y África (Shtein y Smith, 2021). Son plantas suculentas que se caracterizan por la formación de pequeñas plantas que se crean en los bordes de sus hojas y se transforman en nuevas plantas si caen sobre el suelo (Roslim *et al.*, 2021). Los fitoquímicos del género *Kalanchoe* están ampliamente descritos y se han utilizado en medicina tradicional y moderna en diferentes partes del mundo, ya que poseen moléculas con propiedades antioxidantes, *antihiperglucémicas*, antimicrobianas, antiinflamatorias, antiulcerogénicas, hepatoprotectoras, antimutagénicas, antiartríticas y anticancerígenas (Eid y Gonaid, 2018; Araújo *et al.*, 2019; da Silva *et al.*, 2021; Sousa *et al.*, 2021).

K. × laetivirens es un híbrido de *K. daigremontiana* y *K. laxiflora* (syn. *Bryophyllum crenatum*) y su área de distribución nativa es Madagascar (Govaerts *et al.*, 2021). Presenta potencial ornamental, pero es poco estudiada, especialmente en relación con su biología (Sousa *et al.*, 2021). *K. × laetivirens* posee múltiples propiedades benéficas para el ser humano, principalmente en disminuir la probabilidad de padecer el cáncer. De acuerdo con Kaewpiboon *et al.* (2014), el extracto de esta planta tiene propiedades medicinales debido a que logra revertir la resistencia al etopósido, medicamento frecuentemente administrado para regímenes quimioterapéuticos en células de cáncer pulmonar. Según Stefanowicz-Hajduk *et al.* (2020), las plantas de *Kalanchoe* son citotóxicas. No

obstante, los datos sobre su uso tradicional en el tratamiento de tumores son escasos.

En la actualidad, se han ideado una variedad de métodos para incrementar los rendimientos de producción, ya sea de forma natural o a través de intervenciones artificiales (Salazar *et al.*, 2021). Estos están dirigidos a inducir la duplicación de cromosomas en las plantas, empleando agentes que interfieren con la mitosis, como la orizalina, colchicina, trifluralina, pronamida, entre otras (Manzoor *et al.*, 2019). Los agentes mencionados tienen la capacidad de ser aplicados tanto en embriones como en plántulas haploides, lo que conlleva a la obtención de plantas homocigotas diploides en ambos casos (Zhao *et al.*, 2023).

La poliploidización artificial se utiliza a menudo para desarrollar poblaciones de plantas de alto rendimiento, ricas en compuestos biológicamente activos. Es una herramienta eficaz para aumentar el número y tamaño de sus órganos vegetativos y generativos, la biomasa vegetal, el contenido de metabolitos secundarios y compuestos biológicamente activos (Niu *et al.*, 2016; Samadadze *et al.*, 2022). Según Eng y Ho (2019), la

colchicina es un potente agente antimitótico que induce la poliploidización en las plantas. Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de colchicina en diferentes especies vegetales conduce a la obtención de individuos con una morfología mejorada (Salazar *et al.*, 2018; Samanhudi *et al.*, 2023; Zou *et al.*, 2024).

Este fenómeno se atribuye principalmente a la poliploidía inducida, la cual genera células y órganos de mayor tamaño. Por lo tanto, se observa un aumento en el peso de las plantas, lo que representa un beneficio considerable para la producción agrícola y forestal (Eng y Ho, 2019). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación radica en determinar el impacto de la colchicina como estrategia de inducción de poliploidía para llevar a cabo un análisis morfológico minucioso en las plantas de *K. × laetivirens*. Se emplearán tres dosis de colchicina: 0,025 %, 0,05% y 0,1% (p/v), así como un grupo control tratado con agua destilada durante 12 horas, con el propósito de evaluar su influencia en el proceso de poliploidización y sus efectos morfológicos subsiguientes.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del cultivo y material biológico

Se seleccionaron brotes de una planta madre, alojada en el municipio de Los Patios, Norte de Santander. Se seleccionaron 40

plantas con una altura comprendida entre 1,4 y 1,8 cm, las cuales mostraban un sistema radicular en buen estado. Las plantas de *K. × laetivirens* se mantuvieron en un entorno con una temperatura en promedio de 29 °C. Las plántulas fueron sumergidas en una

solución de colchicina con concentraciones del 0,025 %, 0,05 % y 0,1 % (p/v) durante un periodo de exposición de 12 horas, mientras que el agua destilada se utilizó como control. Se distribuyeron en cuatro tratamientos, cada uno con 10 repeticiones.

El sometimiento de las plantas a las diversas dosis de colchicina (Sigma-Aldrich) se llevó a cabo en cámara oscura, siguiendo el protocolo descrito por Salazar *et al.* (2021). Cada tratamiento, consistió en un total de 10 plántulas. Posteriormente, estas fueron trasplantadas a bolsas de polietileno de 1 kg, utilizando un sustrato mezclado por abono orgánico de lombrinaza, cascarilla de arroz mezclado y arena.

Análisis morfológico

Se inició 10 días después del trasplante de las plántulas, una vez que habían sido expuestas a las distintas concentraciones de colchicina. Fueron evaluadas diversas características entre las que se incluyen el número de hojas (NH), la altura de las plantas (AP), el ancho de hoja (AH) y la longitud foliar (LH). Se realizaron mediciones de estas variables cada ocho días para realizar un seguimiento preciso de su desarrollo a lo largo del tiempo.

Análisis estomático

Para evaluar las estructuras estomáticas como el largo, el ancho y el número de cloroplastos, se empleó la metodología descrita por Salazar *et al.* (2021). Este método involucró el uso de cinta adhesiva para remover la epidermis, específicamente del área central

de una hoja de 2 cm². La cinta se adhirió a un portaobjetos y luego se ubicó la muestra en el microscopio compuesto BK-6000. La muestra fue enfocada utilizando el objetivo de 100X, y este procedimiento se repitió 10 veces por lámina.

Al calcular el índice estomático (IE) se contabilizó el número de estomas por célula epidérmica, utilizando un campo visual total de 400x. La fórmula utilizada para calcular el IE fue la implementada por Salazar *et al.* (2018) (Ecuación 1).

$$IE = \frac{NE}{CE + NE} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

De acuerdo con las variables de la fórmula, NE representa el número de estomas observados, mientras que CE corresponde al número de células epidérmicas.

Análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorio que constaba de cuatro tratamientos, cada uno con diez repeticiones (Salazar y Botello, 2018; Salazar y Maldonado, 2019; Mercado y Jaimes, 2022); esto permitió evaluar el efecto de los tratamientos en un total de 40 unidades experimentales. La información recopilada del análisis anatómico y estomático fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), luego, se realizaron comparaciones de medias utilizando la prueba de rangos múltiples de Tukey para detectar diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Se uso el software Infostat para los análisis respectivos.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 y la Figura 1 exhiben los hallazgos del análisis de la morfología foliar de *K. × laetivirens*, 10 semanas después de la siembra bajo diferentes tratamientos con colchicina. Se observa que los tratamientos con colchicina (T2, T3 y T4) mostraron un aumento gradual en todas las medidas morfológicas en comparación con el grupo control (T1). A medida que incrementaba la concentración de colchicina, también lo hacen el número de hojas, la altura de la planta, la longitud foliar y el ancho de las hojas de *K. × laetivirens*. El tratamiento T4, que recibió la mayor concentración de colchicina (0,1%), reveló los valores más altos en todas las variables morfológicas evaluadas en comparación con los demás tratamientos. Esto sugiere una correlación dosis-respuesta entre las cantidades de colchicina y el crecimiento de las plantas.

Es importante destacar que en las plantas del tratamiento T4 se observó la formación de 3 hijuelos, lo que señala un efecto adicional de la colchicina en la proliferación vegetativa de *K. × laetivirens* (Figura 2). Además, se determina que las diferencias entre los tratamientos son estadísticamente significativas, lo que indica que la colchicina tuvo una influencia positiva en la morfología foliar de *K. × laetivirens*. Estos resultados respaldan la eficacia de la colchicina como agente inductor de poliploidía y su capacidad para

mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas en términos morfológicos (Manzoor *et al.*, 2019). Sin embargo, es importante considerar los posibles efectos adversos de dosis más altas de colchicina en el vigor y viabilidad, a largo plazo, de las plantas.

Se han empleado características morfológicas para la identificación de poliploides sin necesidad de preparación de laboratorio, siendo la hoja un órgano comúnmente estudiado. Las hojas de poliploides inducidos suelen exhibir diversos rasgos distintivos, como una lámina foliar más gruesa, un color verde más oscuro y cambios en la forma (Zhou *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2017; Dudits *et al.*, 2016; Salazar *et al.*, 2021). En un estudio realizado por Narukulla *et al.* (2023), se probaron concentraciones de colchicina del 0,1%, 0,2%, y 0,3% en cítricos, durante períodos de 16 y 24 horas. Se encontró que el tratamiento con colchicina al 0,1% durante 24 horas resultó en elevadas tasas de mutación para poliploidización, mostrando el porcentaje de inducción tetraploide más alto registrado (18,3%) y un aumento significativo en el área foliar en todos los cultivares de portainjertos evaluados. Sin embargo, se percibió que tanto la alta concentración de colchicina como el largo tiempo de exposición disminuyeron la supervivencia de las plántulas observadas.

Tabla 1.

Análisis de la anatomía foliar de *K. × laetivirens*

Dosis de Colchicina	NH (cm)	AP(cm)	AH (cm)	LH (cm)
T1 (testigo)	6,3 ± 1,48 ^a	2,9 ± 0,67 ^a	2,5 ± 0,63 ^a	3,2 ± 1,35 ^a
T2	7,1 ± 1,67 ^a	3,6 ± 0,899 ^{ab}	2,8 ± 0,345 ^a	3,7 ± 1,6 ^{ab}
T3	8,7 ± 1,70 ^{ab}	5,2 ± 1,9 ^{cd}	3,2 ± 0,621 ^a	4,3 ± 1,67 ^{ab}
T4	9,0 ± 1,93 ^b	6,3 ± 1,98 ^d	3,6 ± 0,75 ^a	5.1 ± 1,86 ^b

Nota. Número de hojas: NH; Altura de la planta: AP; Ancho de la Hoja: AH; Longitud foliar: LH; Evaluación ejecutada a las 10 semanas posteriormente de la siembra. los valores con diferente letra indican diferencias de acuerdo con *Tukey* ($P \leq 0,05$).

Fuente: autores.



Figura 1. Análisis de la morfología foliar de *K. × laetivirens* usando diversas dosis de colchicina

Fuente: autores.

Según los ensayos realizados por Salazar *et al.* (2021), se halló un aumento en la anatomía foliar en las pruebas con colchicina

de 0.025% a 48 horas y 0.1% a 24 horas en *Kalanchoe tubiflora*. Además, se observó una producción de 4 y 6 hijuelos, respecti-

vamente. Estos hallazgos son consistentes con nuestros resultados, ya que ambas apreciaciones sugieren que el uso de la colchicina puede mejorar la morfología y la reproducción celular en plantas. Sin embargo, es importante destacar que los efectos pueden variar dependiendo de la especie vegetal, las concentraciones de colchicina utilizadas y la duración del tratamiento (salazar *et al.*, 2018; Según Eng y Ho, 2019).

Adicionalmente, las concentraciones elevadas de colchicina y un tiempo de exposición más prolongado interfieren con el

crecimiento de las plántulas. Esto ocasiona hiperploidía, pardeamiento y necrosis en el tejido meristemático, lo que eventualmente conduce a la muerte de las plántulas (Narukulla *et al.*, 2023). Sin embargo, en esta investigación no se registraron pérdidas de plántulas durante el estudio en todos los tratamientos con colchicina. Lo anterior resalta la importancia de llevar a cabo investigaciones adicionales para comprender completamente los efectos de la colchicina en diferentes especies vegetales y condiciones experimentales.



Figura 2. Hijuelos formados en el margen de las hojas del T4 (0.1% de colchicina 12h) de *K. x laetivirens*

Fuente: autores.

La Tabla 2, la Figura 2 y la Figura 3 revelan una correlación dosis-respuesta entre la concentración de colchicina y las características estomáticas de *K. x laetivirens*. A medida que aumenta la concentración de colchicina, se observa un crecimiento gra-

dual en el tamaño de los estomas, tanto en longitud como en anchura. Este fenómeno sugiere una relación verdadera entre la dosis aplicada y el volumen de los estomas. Además, el índice estomático, el cual representa la densidad de estomas en la hoja, exhibe un

aumento progresivo en relación con el incremento de la concentración del procedimiento. Esta tendencia sugiere que las concentraciones más altas están asociadas con una mayor densidad estomática. Por último, el número de cloroplastos por estoma también sube con la concentración, lo que indica una

posible mejora en la capacidad fotosintética de las células estomáticas bajo condiciones de tratamiento más elevadas. Lo anterior sugiere que las mayores concentraciones de colchicina inducen cambios morfológicos y fisiológicos en los estomas.

Tabla 2.

Características estomáticas. Índice estomático, largo, ancho y número de cloroplastos por estomas sometidas con colchicina

Dosis de Colchicina	Largo del estoma (μm)	Ancho del estoma (μm)	Índice estomático	Cloroplastos por estomas
T1(testigo)	28,8 ^a	17,4 ^a	12,7 ^a	10,2 ^a
T2 (0,025 %)	31 ^b	21,6 ^b	19,8 ^b	20,4 ^b
T3 (0,05 %)	35,7 ^b	25,2 ^b	20,6 ^b	21,2 ^b
T4 0,1%)	38,4 ^b	29,3 ^b	22,652 ^b	26,5 ^b

Fuente: autores.



Figura 3. Características de los estomas de las hojas de *K. x laetivirens* (A) Estoma del T1: 10 CL. (B) Estoma del T2: 20 CL. (C) Estoma del T3: 21 CL. (D) Estoma del T4: 26 CL.

Aumento total 1000x. CL: cloroplasto

Fuente: autores.

La relación entre el nivel de ploidía y las características estomáticas ha sido objeto de estudio en varios trabajos de investigación recientes. Los hallazgos de Narukulla *et al.* (2023) indican un incremento significativo en el tamaño de los estomas al aumentar el nivel de ploidía, lo que sugiere una correspondencia directa entre estos dos factores. Esta asociación entre el nivel de ploidía y diversas características fisiológicas, incluidas las dimensiones estomáticas, ha sido corroborada por investigaciones previas, como las de Manzoor *et al.* (2019). Se ha observado que las plantas poliploides tienden a exhibir estomas más grandes y separados en comparación con sus contrapartes los diploides, lo cual puede utilizarse como un marcador para identificar poliploides (Šmarda *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2021).

Además del tamaño de los estomas, la ploidía también influye en el tamaño y la cantidad de orgánulos en las células estomáticas. Estudios han demostrado que los estomas más grandes en poliploides están asociados con un aumento en el número de cloroplastos en las células protectoras, lo que puede acarrear consecuencias significativas en la capacidad fotosintética de las plantas (Ræbild *et al.*, 2024). En investigaciones rea-

lizadas por Barceló-Anguiano *et al.* (2021), encontraron que los cloroplastos eran aproximadamente el doble de voluminosos en las células estomáticas de tetraploides en comparación con diploides de la misma especie. Estos cambios anatómicos inducidos por la ploidía en el aparato estomático pueden tener implicaciones importantes en la fisiología de las plantas en lo que respecta a la conductancia estomática y la eficiencia en el uso del agua. Estudios han sugerido que la difusión intracelular de gases y agua puede ser más lenta en células mesófilas grandes y cloroplastos agrandados, lo que puede afectar la eficacia del intercambio gaseoso y la efectividad de la utilidad del agua en las plantas poliploides (Diatta *et al.*, 2022).

Estos hallazgos respaldan la existencia de características estomáticas distintivas en plantas poliploides como el volumen de los estomas, la densidad estomática y el número de cloroplastos en las células. Lo cual sugiere que estas propiedades podrían ser utilizadas como marcadores confiables para la identificación preliminar de poliploides en diversas especies vegetales, lo que podría tener importantes implicaciones en la investigación agrícola.

4 CONCLUSIONES

La colchicina se muestra como una opción factible para la inducción de poliploidía en *K. × laetivirens*, con la posibilidad de generar nuevas variedades con características

morfológicas superiores. Los hallazgos indican mejoras corporales y cambios significativos en las propiedades estomáticas de la planta, lo que sugiere una asociación entre el



nivel de ploidía y estas características. Se recomienda continuar con investigaciones que exploren el uso de diversas dosis y períodos de exposición a la colchicina para comprender mejor sus consecuencias y maximizar su capacidad en la mejora de las plantas medicinales, como también para evaluar los efectos fisiológicos y agronómicos de las plantas poliploides obtenidas.

Sin embargo, es crucial considerar los eventuales impactos adversos que puedan presentar dosis más altas de colchicina en la

viabilidad a largo plazo de las plantas. Este estudio proporciona una base consistente para futuras producciones académicas sobre la inducción de poliploidía en *K. × laetivirens* utilizando colchicina. Así, se destaca la importancia de sopesar cuidadosamente tanto los beneficios potenciales como los posibles riesgos asociados con este enfoque en fitomejoramiento. Además, es necesario evaluar el efecto de estos tratamientos con colchicina en la producción de metabolitos secundarios de plantas de interés medicinal.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Seir Antonio Salazar Mercado: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, revisión y edición bo-

rrador original. **Cristóbal Zambrano Parada:** conceptualización, escritura, análisis de datos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Francisco de Paula Santander.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

LITERATURA CITADA

Araújo, E. R. D., Félix-Silva, J., Xavier-Santos, J. B., Fernandes, J. M., Guerra, G. C. B., de Araújo, A. & Zucolotto, S. M. (2019). Local anti-inflammatory activity: Topical formulation containing *Kalanchoe brasiliensis* and *Kalanchoe pinnata* leaf aqueous extract. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 113, 108721

Barceló-Anguiano, M., Holbrook, N. M., Hormaza, J. I., & Losada, J. M. (2021). Changes in ploidy affect vascular allometry and hydraulic function in *Mangifera indica* trees. *Plant Journal*, 108(2), 541-554. <https://doi.org/10.1111/tpj.15460>

Chen, T., Sheng, Y., Hao, Z., Long, X., Fu, F., Liu, Y., Tang, Z., Ali, A., Ye, P., Lu, L., Hu, X., Shi, J., & Chen, J. (2021). Transcriptome and proteome analysis suggest enhanced photosynthesis in tetraploid *Liriodendron* sino-americum. *Tree Physiology*, 41(10), 1953-1971. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab039>

da Silva Ferreira, D., Santiago, P. A. L., de Lima, B. R., Soares, E. R., de Almeida, R. A., Ohse, K. C., ... & da Silva Santiago, S. R. S. (2021). Caracterização química de uma cianidina glicosilada obtida a partir dos extratos de *Kalanchoe laetivirens* e avaliação do seu potencial antimicrobiano. *Research, Society and Development*, 10(14), e345101421483-e345101421483.

Diatta, O., Kjær, E. D., Diallo, A. M., Nielsen, L. R., Novák, V., Sanogo, D., Laursen, K.

H., & Ræbild, A. (2021). Leaf morphology and stable isotope ratios of carbon and nitrogen in *Acacia senegal* (L.) Wild trees vary with climate at the geographic origin and ploidy level. *Trees*, 36(1), 295-312. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02206-8>

Dudits, D., Török, K., Cseri, A., Paul, K., Nagy, A. V., Nagy, B., Sass, L., Ferenc, G., Vaňková, R., Dobrev, P. I., Vass, I., & Ayaydin, F. (2016). Response of Organ Structure and Physiology to Autotetraploidization in Early Development of Energy Willow *Salix viminalis*. *Plant Physiology*, 170(3), 1504-1523. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01679>

Eid, O., & Gonaid, M. (2018). Future Journal of Pharmaceutical Sciences Crassulaceae (chemistry and pharmacology) - A review. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(2), 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.fjps.2018.07.003>

Eng, W., & Ho, W. (2019). Polyploidization using colchicine in horticultural plants: A review. *Scientia Horticulturae*, 246, 604-617. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.010>

Govaerts, R., Nic Lughadha, E., Black, N. (2021). The World Checklist of Vascular Plants, a continuously updated resource for exploring global plant diversity. *Scientific Data* 8, 215 <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00997-6>

Kaewpiboon, C., Srisuttee, R., Malilas, W., Moon, J., Kaowinn, S., Cho, I., & Johnston, R. N. (2014). Extract of *Bryophyllum laetivirens* reverses etoposide resistance in human lung A549 cancer cells by down-regulation of NF- κ B, 161–168. <https://doi.org/10.3892/or.2013.2844>

Manzoor, A., Ahmad, T., Bashir, M. A., Hafiz, I. A., & Silvestri, C. (2019). Studies on Colchicine Induced Chromosome Doubling for Enhancement of Quality Traits in Ornamental Plants. *Plants (Basel, Switzerland)*, 8(7), 194. <https://doi.org/10.3390/plants8070194>

Mercado, S. A. S., & Jaimes, Y. M. O. (2022). Inclusion of organic components in culture medium to improve the in vitro propagation of *Cattleya warscewiczii* and *Cattleya gaskelliana*. *South African Journal of Botany*, 148, 352-359.

Narukulla, V., Lahane, Y., Fiske, K., Pandey, S., & Ziogas, V. (2023). Induction of Polyploidy in Citrus Rootstocks through In Vitro Colchicine Treatment of Seed-Derived Explants. *Agronomy*, 13(6), 1442. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061442>

Niu, L., Tao, Y. B., Chen, M. S., Fu, Q., Dong, Y., He, H., & Xu, Z. F. (2016). Identification and characterization of tetraploid and octoploid *Jatropha curcas* induced by colchicine. *Caryologia*, 69(1), 58-66.

Ræbild, A., Anamthawat-Jónsson, K., Egertsdotter, U., Immanen, J., Jensen, A. M., Koutouleas, A., Martens, H. J., Nieminen, K., Olofsson, J. K., Röper, A., Salojärvi, J., Strömvik, M. V., Vatanparast, M., & Vivian-Smith, A. (2024). Polyploidy –

A tool in adapting trees to future climate changes? A review of polyploidy in trees. *Forest Ecology and Management*, 560, 121767. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121767>

Roslim, D., Putra, Y., Dewi, Y., Bago, Y., Sitohang, H., & Sofiyanti, N. (2021). First Record Of The Five Dna Barcodes of the Nothospecies Cocor Bebek (*Kalanchoe×Laetivirens*). *Sabrao Journal of Breeding & Genetics*, 53(2).

Shtein, R., & Smith, G. F. (2021). A revision of the climbing *kalanchoes* (Crassulaceae subfam. Kalanchooideae) of Madagascar including the description of *Kalanchoe* sect. *Invasores* and *K. ser. Vilana*. *Phytotaxa*, 482(2), 93-120.

Salazar, S. A., Caleño, J. D. Q., & Urbano, V. J. B. (2021). Impact of colchicine on leaf morphology and stomatics of *Kalanchoe tubiflora* (Harv.) Raym.-Hamet (Crassulaceae). *Botanica Pacifica*, 10(2). <https://doi.org/10.17581/bp.2021.10201>

Salazar, S. A., Valderrama, G. J., y Quintero, J. D. (2018). Efecto de la colchicina sobre la morfología foliar y los estomas de *Kalanchoe daigremontiana* Raym.-Hamet & H.Perrier (Crassulaceae). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 212-222. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7059>

Salazar, S. A., y Botello, E. A. (2018). Viabilidad de semillas de *Glycine max* (L.) Utilizando la prueba de tetrazolio. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 89-98. <https://doi.org/10.22490/21456453.2270>

Salazar, S., Maldonado., H. (2019). Evaluation of cytotoxic potential of chlorpyrifos using *Lens culinaris* Med as efficient bioindicator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183, 109528. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109528>

Samadadze, T. E., Yurkevich, O. Y., Khazieva, F. M., Basalaeva, I. V., Konyaeva, E. A., Burova, A. E., Zoshchuk, S. A., Morozov, A. I., Amosova, A. V., & Muravenko, O. V. (2022). Agro-Morphological and Cytogenetic Characterization of Colchicine-Induced Tetraploid Plants of *Polemonium caeruleum* L. (Polemoniaceae). *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(19), 2585. <https://doi.org/10.3390/plants11192585>

Samanhudi, Hartati, S., Cahyono, O., Wibowo, A. F., & Ardiani, F. (2023). Morphological Characteristics of *Phalaenopsis* spp. by Colchicine Application Based on Qualitative. *Advances in Biological Sciences Research*, 335-342. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-128-9_3

Šmarda, P., Klem, K., Knápek, O., Veselá, B., Veselá, K., Holub, P., ... & Bureš, P. (2023). Growth, physiology, and stomatal parameters of plant polyploids grown under ice age, present-day, and future CO₂ concentrations. *New Phytologist*, 239(1), 399-414.

Sousa, L. N., Albarello, J. B., Cardozo, M. M., Faita, M. R. & Santos, C. M. R. dos. (2021). Reproductive biology of *Kalanchoe laetivirens* (Crassulaceae) in the edaphoclimatic conditions of Santa Catarina, Brazil. *Research, Society and Development*, 10(1), e27010111567. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11567>

opment, 10(1), e27010111567. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11567>

Stefanowicz-Hajduk, J.; Asztemborska, M.; Krauze-Baranowska, M.; Godlewska, S.; Gucwa, M.; Moniuszko-Szajwaj, B.; Stochmal, A.; Ochocka, R. (2020). Identification of Flavonoids and Bufadienolides and Cytotoxic Effects of *Kalanchoe daigremontiana* Extracts on Human Cancer Cell Lines. *Planta Medica*, 86.

Zhao, Y., Kong, B., Uyen, P., Li, L., Du, J., Ma, L., Sang, Y., Wu, J., Zhou, Q., Cheng, X., Kang, X., & Zhang, P. (2023). Gibberellins as a novel mutagen for inducing 2n gametes in plants. *Frontiers In Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1110027>

Zhou, H., Zeng, W., & Yan, H. (2016). In vitro induction of tetraploids in cassava variety 'Xinxuan 048' using colchicine. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 128(3), 723-729. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1141-z>

Zhou, K., Fleet, P., Nevo, E., Zhang, X., & Sun, G. (2017). Transcriptome analysis reveals plant response to colchicine treatment during chromosome doubling. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08391-2>

Zou, P., Zheng, Y., Wang, Y., Hu, X., Dai, S., Wang, W., Lee, S. Y., & Li, G. (2024). In vitro induction of tetraploids in the ornamental plant *Melastoma candidum* using colchicine treatment. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4072444/v1>



Conflictos de intereses

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



Licencia de Creative Commons

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



EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOL COMO FERTILIZANTE ORGÁNICO EN *Megathyrsus maximus*, BAJO CONDICIONES DEL CARIBE SECO COLOMBIANO

EFFECT OF THE APPLICATION OF BIOL AS AN ORGANIC FERTILIZER ON *Megathyrsus maximus*, IN THE COLOMBIAN DRY CARIBBEAN

Luis Fernando Gómez-Ramírez¹

Jorge Leonardo Abril Castro²

Jhon Jacobo Cañas-Álvarez³

1 Biólogo, M.Sc., Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia. lfgomez@agrosavia.co

2 Ing. Agrónomo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia.
jabrilc@agrosavia.co

3 Zoot. M.Sc. PhD., Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, Centro de Investigación Motilonia, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia.
jcanas@agrosavia.co

Citación: Gómez-Ramírez, L., Abril, J., y Cañas-Álvarez, J. (2025). Efecto de la aplicación de Biol como fertilizante orgánico en *Megathyrsus maximus*, bajo condiciones del Caribe seco colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 229 - 246.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7676>

RESUMEN

Contextualización: el biol es un abono orgánico líquido basado en la fermentación de la materia orgánica, que actúa como fuente de nutrientes y microorganismos, estimulante del desarrollo vegetal y mejorador de la calidad del suelo. Su aplicación en pasturas podría contribuir a incrementar la producción de biomasa y reducir la fertilización química y el impacto negativo sobre el suelo.

Vacío de conocimiento: existe un desconocimiento por parte de productores de la región Caribe de Colombia en cuanto al aprovechamiento de coproductos como el estiércol animal para la producción de fertilizantes orgánicos, y los beneficios de su aplicación en pasturas para mejorar la nutrición de los suelos y promover la elaboración de forraje.

Propósito: el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de biol sobre el crecimiento y la calidad nutricional de pasto Guinea (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzania) bajo condiciones del Caribe seco colombiano.

Metodología: se aplicaron cinco tratamientos al momento del corte de la pastura, bajo un diseño en bloques al azar con tres réplicas: testigo sin fertilización (T1), fertilización edáfica con urea (50 kg N/ha) (T2),

fertilización foliar con biol mineralizado al 5% v/v (T3), fertilización foliar con biol mineralizado al 10% v/v (T4) y fertilización foliar con biol mineralizado al 5% v/v más 50% de fertilización con urea (25 kg N/ha) (T5). Al final del ciclo se evaluó la altura de plantas, cobertura, producción y calidad de forraje, así como variables edáficas. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS 8.3 (8.3.0.103).

Resultados y conclusiones: los resultados mostraron que T2, T3, T4 y T5 incrementaron el porcentaje de cobertura, altura, rendimiento de forraje verde y forraje seco de la pastura con respecto al testigo ($p<0.05$). Las plantas tratadas con T5 mostraron resultados similares a T2 ($p>0.05$) en los diferentes parámetros evaluados. En las propiedades de la pastura, carbohidratos solubles, %P, %K y %S se presentaron diferencias entre tratamientos ($p<0.05$). La fertilización con biol podría ser una alternativa que permita mejorar parámetros de crecimiento en *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. y disminuir la fertilización química sin afectar significativamente los rendimientos y la calidad de la pastura.

Palabras clave: calidad nutricional, fermentación, fertilización, forraje, materia orgánica, nutrientes

ABSTRACT

Contextualization: Biol is a liquid organic fertilizer, produced by the anaerobic fermentation of organic matter, used as a source of nutrients and microorganisms, to stimulate plant development and improve soil quality. Its use in pastures could contribute to increasing biomass production and reducing chemical fertilization and soil degradation.

Knowledge gap: Agricultural producers in the Colombian Caribbean are unaware of the use of co-products such as animal manure as an alternative to produce organic fertilizers, and the benefits of their use in pastures to improve soil nutrition and forage production.

Purpose: The objective of this study was to evaluate the effect of biol on the growth and nutritional quality of Guinea grass (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzania) in the Colombian dry Caribbean.

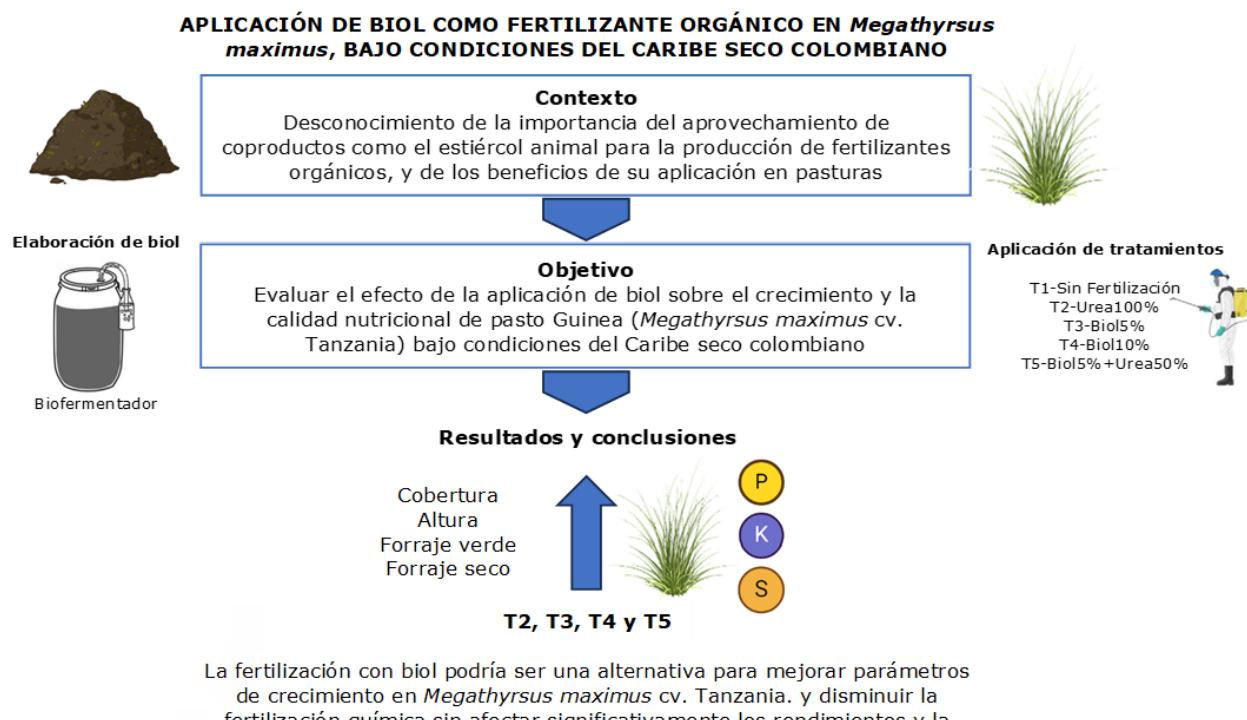
Methodology: Five treatments were applied at the time of cutting the pasture, under a randomized block design with three replicates: control without fertilization (T1), edaphic fertilization with urea (50 kg N/ha) (T2), foliar fertilization with mineralized biol at 5% v/v (T3), foliar fertilization with

mineralized biol at 10% v/v (T4) and foliar fertilization with mineralized biol at 5% v/v plus 50% fertilization with urea (25 kg N / ha) (T5). At the end of the production cycle, plant height, coverage, forage production and quality, as well as edaphic variables, were evaluated. Data were analyzed using SAS 8.3 (8.3.0.103) statistical software.

Results and conclusions: The results showed that T2, T3, T4 and T5 increased the percentage of coverage, height, yield of green forage and dry forage of the pasture compared to the control treatment ($p<0.05$). Plants treated with T5 showed similar results to T2 ($p>0.05$) in the different variables evaluated. Pasture quality in terms of soluble carbohydrates, %P, %K and %S showed differences between treatments ($P<0.05$). The use of biol as organic fertilizer could be an alternative that allows improving the growth of *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. and reduce chemical fertilization, without significantly affecting forage production and its nutritional quality.

Keywords: anaerobic fermentation, fertilization, forage, nutrients, nutritional quality, organic matter

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

La actividad pecuaria es una de las principales apuestas productivas del departamento del Cesar, la cual aporta cerca del 4% del producto interno bruto (PIB) departamental y el 56,6% del PIB agropecuario, destacándose la ganadería bovina como principal actividad productiva dentro de este sector con un inventario de 1,43 millones de animales, 14.049 predios y una producción de 995

mil litros de leche al día, para el 2019 (Camarago, 2023; Gobernación del Cesar, 2020).

El Cesar presenta un área cercana a 2,25 millones de hectáreas, de las cuales 303.437 ha (13%) aproximadamente tienen una vocación ganadera para pastoreo extensivo y semi-intensivo. Sin embargo, en la actualidad la ganadería usa 987.045 ha (43,7%) del área departamental, generando conflictos de

uso del suelo (Gobernación del Cesar, 2020; FAO y ADR, 2019) y problemas de degradación de este recurso a causa de la compactación y la aplicación excesiva de fertilizantes de síntesis química (Martínez *et al.*, 2019).

De acuerdo con lo anterior, uno de los principales retos del sector pecuario en el departamento es reducir las áreas en las cuales se desarrolla su actividad actualmente (uso extensivo), pero al mismo tiempo incrementar el rendimiento y sostenibilidad del sistema productivo (Camargo, 2023), bajo un escenario de variabilidad climática y estacionalidad de las lluvias que condicionan la disponibilidad y calidad de pastos y forrajes, impactando directamente la producción de los hatos ganaderos (Rivera *et al.*, 2021).

En este sentido, es importante la implementación de tecnologías y estrategias de manejo que contribuyan a incrementar la producción de forrajes con alta calidad nutricional que permitan mantener una carga animal elevada durante todo el año, preferiblemente bajo un modelo de producción orgánica o ecológica, reduciendo la aplicación de fertilizantes químicos y el impacto negativo sobre el suelo (Martínez *et al.*, 2019).

El biol es un abono orgánico líquido basado en una fermentación de diversas materias orgánicas, principalmente estiércol animal enriquecido con melaza, leche y minerales esenciales, el cual podría actuar como fuente de nutrientes y estimulador del desarrollo vegetal en los cultivos. Adicionalmente, permitiría mejorar la calidad del suelo al aportar materia orgánica (MO), creando un entorno microbiológico natural (Infante, 2010). En la actualidad, la producción de fertilizantes orgánicos líquidos se convierte en una alternativa para la fertilización de grandes áreas de pasturas, donde el actual encarecimiento de los fertilizantes químicos ha elevado los costos de producción en los sistemas ganaderos. Además, este tipo de abonos posibilitan superar la actual crisis del modelo agroindustrial y la promoción de modelos verdes autosostenibles (Restrepo-Rivera, 2007).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la aplicación de un fertilizante orgánico líquido tipo biol sobre el crecimiento y la calidad nutricional de pasto Guinea (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzania) bajo condiciones del Caribe seco colombiano.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El experimento se realizó en un lote con un área total de 5.000 m², establecido con pasto Guinea (*Megathyrsus maximus* cv.

Tanzania) dedicado al pastoreo por bovinos de la raza criolla Costeño con Cuernos, en el Centro de Investigación (C.I.) Motilonia (AGROSAVIA), ubicado a 10°0'7" latitud Norte y 73°14'51" longitud Oeste, a

una altitud de 131 msnm, en el municipio de Agustín Codazzi, microrregión Valle del Cesar (Cesar, Colombia). Esta zona, enmarcada dentro del Caribe seco colombiano, se caracteriza por presentar una temperatura promedio anual de 28,7 °C, humedad relativa de 70% y precipitación anual promedio de 1.600 mm, con distribución bimodal en los meses de mayo a junio y de septiembre a noviembre. Esta investigación se desarrolló en el segundo semestre del año 2022, desde el mes de agosto hasta octubre, en un periodo de transición entre una primera época moderadamente seca y una segunda lluviosa. Durante el periodo de evaluación, se observó una precipitación media mensual de 299 mm, una temperatura media de 27,2 °C y una humedad relativa promedio de 69.1% (datos obtenidos de la estación meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), localizada en el C.I. Motilonia).

Caracterización del suelo

Previo al establecimiento del experimento, se realizó una evaluación química y microbiológica del suelo. Para ello se tomó una muestra compuesta, la cual fue enviada al Laboratorio de Química Analítica de AGROSAVIA C.I. Tibaitatá para su análisis en términos de fertilidad química completa. Para el examen microbiológico, la muestra de suelo fue extraída siguiendo las recomendaciones de Gelvez-Pardo *et al.* (2020) y remitida al Laboratorio de Microbiología Agrícola del C.I. Tibaitatá para su análisis en términos de: recuento de bacterias, hongos y actinomicetos totales, y recuento de bac-

terias presuntivas fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo. Para el recuento de estos grupos microbianos, se ejecutaron diluciones seriadas 1/10 (10 gramos de suelo en 90 mL del disolvente) hasta 10^{-5} ; las diluciones fueron sembradas por triplicado en placas Petrifilm™ AC para bacterias totales (incubación a 30°C por 72 h), placas Petrifilm™ YM para hongos totales (incubación a 25°C por 3-5 días), agar almidón amoniacal para actinomicetos (incubación a 28°C por 2 a 3 días), agar SRSM para bacterias presuntivas solubilizadoras de fósforo (incubación a 28°C por 24-48 h) y agar LG para bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno (incubación a 28°C por 24-48 h).

Preparación de biol enriquecido con sales minerales

La preparación del biol enriquecido con sales minerales inició dos meses antes del experimento en campo. Dicha preparación se hizo con base en el procedimiento sugerido por Restrepo-Rivera (2007). Para la elaboración del biol se usó un biodigestor artesanal tipo estacionario con una capacidad de 1.000 L, en el cual se adicionaron 250 kg de estiércol bovino, 5 L de melaza, 10 L de leche, 1 kg de levadura de pan y agua hasta completar el volumen de recipiente, dejando una cámara de aire de 10 cm de altura. Luego se realizó una homogenización manual de estos ingredientes y seguidamente, se cerró el biodigestor de forma hermética para iniciar el proceso de fermentación, agregando leche y sales minerales (para 200 L de volumen final: 2 kg de $ZnSO_4$, 2 kg de $CaCl_2$, 2 kg de $MgSO_4$, 0,3 kg de $MnSO_4$, 0,05 kg

de CoSO_4 , 0,1 kg de Na_2MoO_4 , 1,5 kg de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot10\text{H}_2\text{O}$ [Bórax], 0,3 kg de FeSO_4 , y 0,3 kg de CuSO_4) de forma secuencial, cada tres días durante 40 días. Se consideró una fermentación completa al evidenciar ausencia de salida de gases (sin burbujeo), lo cual se observó aproximadamente a los 60 días después del inicio de la fermentación. Una vez maduro, se tomaron dos muestras de 50 mL del fertilizante orgánico líquido para desarrollar una caracterización química.

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se desarrolló en un área de 800 m^2 bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones. Cada uno fue aplicado en parcelas de 20 m^2 , con una separación entre parcelas de 2 m y una separación entre bloques de 3 m. Los tratamientos implementados fueron: T1: control sin fertilización, T2: fertilización edáfica convencional con urea (50 kg N/ha), T3: fertilización foliar con biol enriquecido con sales minerales, diluido al 5% v/v, T4: fertilización foliar con biol enriquecido con sales minerales, diluido al 10% v/v, y T5: fertilización foliar con biol enriquecido con sales minerales, diluido al 5% v/v, más un 50% de la fertilización edáfica convencional con urea (25 kg N/ha). El biol fue empleado utilizando una bomba de espalda manual (RoyalCondor[®]) con capacidad de 20 L y el fertilizante edáfico se suministró manualmente. Antes de la aplicación de los tratamientos, la pastura fue uniformizada a una altura de 20 cm en toda el área experimental.

Variables de respuesta

En cada parcela se establecieron cuadran tes de 1 m^2 donde se midieron las siguientes variables de respuesta: altura de plantas medida desde la base hasta la punta de la hoja más alta utilizando una regla, porcentaje de cobertura, y producción de forraje verde (t/ha) y forraje seco (t/ha) (secado en horno durante 48 h a una temperatura de 60 °C) medido en tres períodos de corte (28, 35 y 42 días después de uniformización). Por otra parte, también se determinó la concentración de nutrientes y calidad de forraje (análisis bromatológico) mediante el uso de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés) a los 35 días después de la uniformización.

Análisis estadístico

Los datos fueron estudiados a través de un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para las variables de crecimiento y rendimiento, y un ANOVA simple para las variables de calidad de forraje después de confirmar su distribución normal y homocedasticidad a través de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Los resultados que no cumplieron con estos supuestos fueron inicialmente transformados usando la función logaritmo natural (ln), y aquellos no paramétricos fueron analizados mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparación de medias de tratamientos. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS 8.3 (8.3.0.103).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo

En el área de estudio previo al establecimiento del experimento, el suelo se caracterizó por presentar una textura franco-arenosa, un pH de 6,78 (neutro), conductividad eléctrica (CE) de 0,12 dS/m (no salino), un porcentaje de MO del 3,7%, Nitrógeno-N total de 0,1%, carbono orgánico de 1,84%, baja concentración de azufre-S (1,37 ppm), moderada concentración de fósforo-P (31,23 ppm), alta concentración de potasio-K (164,2 ppm), bajas concentraciones de magnesio-Mg (111,9 ppm) y bajas o moderadas concentraciones de elementos menores (B: 0,09 ppm, Zn: <1 ppm, Mn: 2,89 ppm, Cu: <1 ppm y Fe: 34,19 ppm). También se identificó una baja capacidad de intercambio catiónico (CICE) con un valor de 4,48 meq/100 g. Teniendo en cuenta las características fisicoquímicas del suelo en el área de estudio, se puede afirmar que corresponde a un suelo de moderada fertilidad y con una aptitud alta para el desarrollo de pasturas como *Megathyrsus maximus* de acuerdo con lo reportado por Ipaz-Cuastumal *et al.* (2023), quienes encontraron características similares del suelo para la misma zona. Sin embargo, en el actual estudio, la CICE y la concentración de algunos elementos mayores y menores fueron más bajas, lo que justifica la implementación de estrategias de fertilización (tanto química como orgánica) para mejorar su ca-

lidad y favorecer la nutrición de la pastura (Cruz *et al.*, 2021).

Al evaluar la fertilidad química del suelo 42 días después de la aplicación de los tratamientos, se pudo evidenciar un leve incremento en parámetros como el S (1,81 ppm), B (0,20 ppm), Fe (37,59 ppm), Cu (1,01 ppm), Mn (4,62 ppm), pH (7,03) y CICE (5,19 meq/100 g), cuando se aplicó biol al 5% v/v sobre el pasto; mientras que cuando se aplicó biol al 5% v/v en conjunto con el 50% de la fertilización nitrogenada, se mejoraron parámetros como P (37,43 ppm), S (2,63 ppm), B (0,26 ppm), Fe (46,58 ppm), Cu (1,12 ppm), Mn (5,50 ppm) y CICE (5,40 meq/100 g) (datos no mostrados). Cruz *et al.* (2021) evidenciaron un efecto positivo de la aplicación de bioles producidos a partir de estiércol bovino en las propiedades del suelo para la producción de forrajes.

A nivel microbiológico, se encontró una población total de bacterias aerobias, hongos y actinomicetos de $6,8 \times 10^6$, $1,6 \times 10^3$ y <100 UFC/g de suelo, respectivamente, valores inferiores a los obtenidos por Melo *et al.* (2015) para la misma zona; mientras que las poblaciones de grupos funcionales como bacterias presuntivas solubilizadoras de fósforo y fijadoras de nitrógeno fueron relativamente altas, con valores de $2,1 \times 10^4$ y $2,4 \times 10^5$ UFC/g de suelo, concernientemente, los cuales son resultados similares a los reportados por Montenegro-Gómez *et al.* (2022). Esto puede representar una ventaja teniendo

en cuenta el potencial de estas bacterias para movilizar el fósforo y fijar el nitrógeno en el suelo, promoviendo una mayor eficiencia en la asimilación de nutrientes y un incremento en la producción de biomasa en las pasturas (Abril *et al.*, 2017); dicha actividad microbiana puede ser estimulada mediante la aplicación de abonos orgánicos como el biol, mejorando así la calidad del suelo (Cruz *et al.*, 2021).

Características químicas del fertilizante orgánico líquido

El fertilizante orgánico líquido (biol) obtenido al finalizar el proceso de fermentación, presentó un pH moderadamente ácido (5,26), baja salinidad (CE de 0,48 dS/m), carbono y nitrógeno orgánico de 9,50 y 0,64 g/L, respectivamente, y un aporte importante de elementos mayores como P (0,22 g/L), K (4,74 g/L), Ca (1,38 g/L), Mg (1,31 g/L) y S (2,68 g/L), y elementos menores como Fe (80,30 ppm), Mn (556 ppm), Cu (43,70 ppm), Zn (1.030 ppm) y B (713 ppm) (Tabla 1).

El pH ácido del biol obtenido es una buena señal de la eficiencia fermentativa del pro-

ceso y se asocia a la producción de ácidos orgánicos por parte de los microorganismos a partir de la MO y la presencia de una fuente energética en condiciones de anaerobiosis (Quiñones-Ramírez *et al.* 2016). Sin embargo, es importante tener en cuenta que, para su aplicación, el biol debe ser diluido, como se hizo en este estudio, con el fin de evitar problemas por fitotoxicidad (Aguado *et al.*, 2023). Otro indicador de la calidad del biol fue la baja CE, siendo incluso menor a la obtenida por Funes-Pinter *et al.* (2022), lo que revela baja salinidad del fertilizante orgánico, favoreciendo su uso en agricultura orgánica (Jara-Samaniego *et al.*, 2021); por su parte, la concentración de macronutrientes (N, P, K, S, Ca y Mg) y la mayoría de los micronutrientes (Zn, Mn, Cu, Fe y B) fueron mayores en esta investigación comparados con los valores obtenidos en el biol Supermargo reportado por López *et al.* (2016). En este sentido, la aplicación de este tipo de fertilizantes orgánicos líquidos directamente al suelo o sobre el follaje de las plantas puede mejorar la disponibilidad y asimilación de nutrientes, como lo evidencian Oliveira *et al.* (2014).

Tabla 1.

Caracterización fisicoquímica de fertilizante orgánico líquido (biol)

Variable	Unidad	Resultado
pH		5,26
Densidad	g/cm ³	1,02
Conductividad eléctrica	dS/m	0,48

Carbono orgánico oxidable	g/L	9,50
Sólidos insolubles		0,14
Nitrógeno total		0,64
Nitrógeno orgánico		0,64
Fósforo total		0,22
Potasio total		4,74
Potasio soluble		4,70
Calcio total		1,38
Magnesio total		1,31
Azufre total		2,68
Hierro total		80,30
Manganoso total		556
Cobre total		43,70
Zinc total		1.030
Boro total		713

Fuente: autores.

Desarrollo de la pastura frente a la aplicación de tratamientos

A nivel de cobertura de *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania, se evidenció una diferencia entre los tratamientos ($p<0,05$), destacándose la aplicación de Urea100%, Biol5%+Urea50% y Biol10% con los porcentajes más altos, con valores promedios de 89,44, 87,22 y 83,89%, respectivamente, mientras que Biol5% y las plantas no fertilizadas mostraron la cobertura más baja con valores de 79,89 y 67,22%, correspondientemente (Tabla 2). Al observar la interacción con la edad de corte ($p<0,05$), igualmente sobresalieron los tratamientos Urea100% y Biol5%+Urea50%, los cuales lograron una cobertura superior al 86% a los 28 días después de la uniformización (DDU) y del 90 y 86,67% a los 42 DDU, concernientemente. Por su parte, como era de esperarse, el tratamiento sin fertilización mantuvo los porcentajes más bajos de cobertura du-

rante las tres edades de corte, alcanzado sólo el 66,67% a los 42 DDU (Tabla 2).

Un comportamiento similar se evidenció en la altura promedio de las plantas, la cual fue mayor ($p<0,05$) cuando se realizó una fertilización con Urea100% ($143,97 \pm 14,1$ cm) y Biol5%+Urea50% ($140,28 \pm 8,7$ cm) en comparación con los valores obtenidos cuando se aplicó Biol5% ($118,78 \pm 9,8$ cm), Biol10% ($119,53 \pm 13,4$ cm) o cuando no se fertilizó ($111,62 \pm 13,8$ cm). Al elaborar esta misma comparación en el tiempo, se observó que la aplicación de Biol5%+Urea50% favoreció un mayor crecimiento de las plantas hacia los 28 DDU, consiguiendo una altura de $130,17 \pm 4,7$ cm, seguido de Urea100% con $127,75 \pm 9,3$ cm. Sin embargo, en el día 35 DDU este último tratamiento alcanzó la mayor altura con un valor de $153,67 \pm 5,4$ cm y se mantuvo hasta los 42 DDU, aunque

sin diferencias significativas ($p=0,6261$) (Tabla 2).

Como era de esperarse, los mayores porcentajes de cobertura y altura media de las plantas estuvieron asociados a la aplicación de urea, sin embargo, el uso de bioles mejoró estos dos parámetros de forma significativa comparado con el testigo sin fertilización, lo que demuestra su potencial como estimulante del crecimiento en *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. Diferentes investigaciones se han realizado evaluando el manejo de bioles como estrategia de fertilización en pasturas. Condo y Ulloa (2019) reportaron aumentos en altura y cobertura de pasturas usando biol bovino, atribuyendo estos resultados a los fitoestimulantes, macro y micronutrientes presentes en este fertilizante orgánico, lo que contribuye en la promoción del crecimiento y desarrollo de las plantas. De igual manera, Gutiérrez-Arce *et al.* (2019) encontraron incrementos en altura de pasturas a partir de los 30 días del proceso, empleando biol a base de estiércol animal.

El rendimiento de forraje verde se incrementó ($p<0,05$) con la aplicación de todos los tratamientos en comparación con el testigo sin fertilización (6,77 t/ha), aunque se destacaron la fertilización con sólo Urea100% (26,39 t/ha) y Biol5%+Urea50% (19,32 t/ha) con incrementos del 289 y 185%, respectivamente. En términos de forraje seco, el comportamiento fue similar, sobresaliendo Urea100% y Biol5%+Urea50% con rendi-

mientos de 5,45 y 4,45 t/ha, correspondientemente, mientras que las plantas no fertilizadas presentaron un rendimiento de 1,75 t/ha (Tabla 2). Sin embargo, cabe resaltar que, si bien los rendimientos de forraje fresco y seco no fueron los más altos con el suministro de Biol5% y Biol10%, sí fueron superiores ($p<0,05$) al testigo sin fertilización (Tabla 2), demostrando el efecto positivo que puede tener el uso de bioles sobre el desarrollo vegetal. Además, la administración de Biol5%+Urea50% arrojó resultados estadísticamente similares a los obtenidos con la aplicación de Urea100%, por lo que podemos inferir que su implementación podría permitir disminuir en un 50% la fertilización química sin afectar significativamente las obtenciones de biomasa en *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania, contrastado con una fertilización química completa.

Estos resultados son congruentes con los obtenidos por Alvarado y Medal (2018), quienes encontraron que la aplicación de biol en combinación con una fertilización química (urea) reducida a la mitad (50%) resulta ser una estrategia eficaz para incrementar la biomasa fresca y seca en pasturas, contribuyendo en gran medida a la disminución de costos para los productores. De igual manera, Kovacevic Viteri (2021) determinó que la mejor forma de administración de bioles es en conjunto con una fertilización química en dosis adecuadas, lo cual optimiza la eficiencia en el uso de nutrientes y la relación costo beneficio en pasturas.

Variable	Tratamiento (T)	Días después de la uniformización (DDU)			Media	s.e.	p valor		
		28	35	42			T	DDU	T x DDU
Cobertura (%)	Sin Fertilización	71,67 ^b	63,33 ^b	66,67 ^b	67,22 ^c	1,38	<0,0001*	0,6150	0,0023*
	Urea100%	93,33 ^a	85,00 ^a	90,00 ^a	89,44 ^A				
	Biol5%	78,33 ^b	78,33 ^b	83,00 ^{ab}	79,89 ^B				
	Biol10%	83,33 ^{ab}	81,67 ^b	86,67 ^a	83,89 ^A				
	Biol5%+Urea50%	86,67 ^a	88,33 ^a	86,67 ^a	87,22 ^A				
	Media	82,67	79,33	82,60					
s.e.		2,28	2,62	2,33					
Altura de planta (cm)	Sin Fertilización	95,67	118,70	120,50	111,62 ^c	2,55	<0,0001*	<0,0001*	0,6261
	Urea100%	127,75	153,67	150,50	143,97 ^A				
	Biol5%	107,58	122,50	126,25	118,78 ^{BC}				
	Biol10%	104,08	128,33	126,17	119,53 ^B				
	Biol5%+Urea50%	130,17	144,67	146,00	140,28 ^A				
	Media	113,05 ^y	150,42 ^z	133,88 ^z					
s.e.		4,03	3,71	3,27					
Forraje Verde (t/ha)	Sin Fertilización	5,14	7,28	7,89	6,77 ^D	1,22	<0,0001*	<0,0001*	0,2009
	Urea100%	23,53	21,71	33,92	26,39 ^A				
	Biol5%	7,82	10,33	11,60	9,91 ^C				
	Biol10%	7,83	12,74	13,04	11,20 ^C				
	Biol5%+Urea50%	15,88	22,57	19,52	19,32 ^B				
	Media	12,04 ^y	14,93 ^z	17,20 ^z					
s.e.		1,86	1,79	2,52					
Forraje seco (t/ha)	Sin Fertilización	1,31	1,84	2,10	1,75 ^C	0,25	<0,0001*	<0,0001*	0,5038
	Urea100%	4,36	4,63	7,37	5,45 ^A				
	Biol5%	1,94	2,56	3,04	2,52 ^B				
	Biol10%	1,94	3,07	3,29	2,77 ^B				
	Biol5%+Urea50%	3,47	4,95	4,93	4,45 ^A				
	Media	2,60 ^x	3,41 ^y	4,15 ^z					
s.e.		0,31	0,35	0,52					

Tabla 2.

Comportamiento de variables de crecimiento y rendimiento de *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania durante diferentes días de desarrollo, frente a la aplicación de los diferentes tratamientos evaluados

^{ABC} Letras distintas indican diferencias significativas entre la media de los tratamientos ($p<0,05$) según la prueba de Tukey; ^{xyz} Letras distintas indican diferencias significativas entre la media de los DDU ($p<0,05$) según la prueba de Tukey; ^{abc} Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de la interacción de los tratamientos x DDU ($p<0,05$) según la prueba de Tukey. * Significancia ($p<0,05$). s.e.= error estándar de la media

Fuente: autores.

Calidad nutricional de la pastura

En cuanto a la calidad del forraje de las variables evaluadas, sólo carbohidratos solubles, P, K y S presentaron distinciones entre los tratamientos ($p<0,05$), mientras que variables como proteína cruda, cenizas, extracto etéreo, Fibra Detergente Neutro-FDN, Fibra Detergente ácido-FDA, Ca, Mg, Na, digestibilidad y energía digestible no fueron diferentes ($p>0,05$).

De acuerdo con lo anterior, la concentración de carbohidratos solubles fue mayor en el forraje sin fertilización, con 3,34 g/100 g de materia seca (MS), superando a todos los tratamientos fertilizados (Tabla 3). Hernández *et al.* (2020) también reportaron una reducción en los carbohidratos solubles en pasturas tropicales fertilizadas, lo cual se atribuye presuntivamente a que la aplicación de nitrógeno por medio de la fertilización estimula la producción de aminoácidos y proteínas, que a su vez se sintetizan a partir de azúcares, lo que conlleva a una disminución en el contenido de azúcares no estructurales en las plantas.

La concentración de nutrientes como P, K y S presentó los mayores valores ($p<0,05$) en

las plantas fertilizadas con Urea100%, con concentraciones de 0,24, 2,50 y 0,23%, seguido de la aplicación de Biol5%+Urea50% con valores de 0,22, 2,04 y 0,21%, comparado con el tratamiento testigo (sin fertilización) que presentó las concentraciones más bajas de estos nutrientes, con valores de 0,18, 1,89 y 0,17%, respectivamente (Tabla 3). Estos resultados se relacionan con el aporte de nutrientes por parte de los fertilizantes químicos y orgánicos aplicados, los cuales son aprovechados por las plantas mejorando su desarrollo (Oliveira *et al.*, 2014).

Cabe resaltar que, si bien no hubo diferencias significativas en parámetros como proteína cruda y extracto etéreo, sí se observó una tendencia al incremento de estas dos variables en el forraje cuando se aplicó Urea100%, Biol5% y Biol5%+Urea50% ($p>0,05$). De igual manera, características como digestibilidad de la materia seca y energía digestible fueron levemente mejoradas con la aplicación de Urea100% y Biol5%+Urea50% ($p>0,05$) (Tabla 3), lo que se asocia con la formación de estructuras de mayor aprovechamiento y una limitada conformación de carbohidratos estructurales (Moreno *et al.*, 2022).

Tabla 3.

Comparación de la calidad de forraje entre los diferentes tratamientos evaluados

Variable Sin Fertilización	Tratamientos					s.e.	p valor	
	Urea100%	Biol5%	Biol10%	Biol5%+Urea50%				
Proteína cruda	g/100 g MS	6,26	8,90	6,39	5,06	6,80	0,45	0,0801
Ceniza		11,42	11,10	11,46	11,16	11,66	0,19	0,9224
Extracto etéreo		1,58	1,77	1,63	1,57	1,60	0,04	0,2851
FDN		70,48	69,72	71,23	73,75	69,47	1,05	0,6860
FDA		34,98	35,07	35,43	37,04	35,60	0,55	0,5628
Carbohidratos Solubles		3,34 a	2,03 b	2,74 ab	2,98 ab	2,07 b	0,17	0,0116*
Calcio		0,43	0,48	0,44	0,48	0,34	0,03	0,3917
Fósforo		0,18 b	0,24 a	0,20 ab	0,20 ab	0,22 ab	0,01	0,0194*
Magnesio		0,18	0,21	0,18	0,18	0,19	0,01	0,2050
Potasio		1,89 b	2,50 a	1,87 b	1,98 b	2,04 b	0,07	0,0067*
Sodio		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01	0,4497
Azufre		0,17 b	0,23 a	0,18 ab	0,18 ab	0,21 ab	0,01	0,0354*
Digestibilidad MS		53,49	55,57	53,45	51,88	53,72	0,50	0,1947
ED Rumiantes	Mcal/kg MS	2,13	2,24	2,13	2,06	2,17	0,02	0,1886

*Significancia ($p<0,05$). s.e.= error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,05$) según la prueba de Tukey

Fuente: autores.

4 CONCLUSIONES

La implementación de una fertilización utilizando biol mineralizado, sólo o en conjunto con una fertilización química reducida a la mitad, se convierte en una alternativa que permite mejorar parámetros de crecimiento y rendimiento en *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. Adicionalmente, la aplicación conjunta de biol con una fertilización química reducida a la mitad puede generar beneficios en cuanto a la disminución

del uso de fertilizantes químicos, sin afectar significativamente los rendimientos y la calidad de la pastura, frente a una fertilización química completa.

Es importante efectuar evaluaciones en el mediano y largo plazo, con múltiples aplicaciones del fertilizante orgánico líquido sobre la pastura y el suelo, con el fin de observar si se genera un resultado mayor y estable a lo largo del tiempo, sobre la calidad del sue-

lo y el crecimiento vegetal. También es importante realizar un análisis comparativo económico, con el fin de determinar cómo la disminución del 50% del fertilizante quí-

mico más la adición de Biol5% puede lograr una rentabilidad mayúscula en el sistema ganadero al momento de fertilizar grandes coberturas de pasto.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Luis Fernando Gómez Ramírez: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original, revisión y edición. **Jorge Leonardo Abril Castro:** metodología, investigación,

conceptualización, escritura y revisión. **Jhon Jacobo Cañas Álvarez:** administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura y revisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto “Programa de mejoramiento genético de razas criollas” con ID 1002462, ejecutado en el Centro de Investigación Motilonia de La Corporación Colombiana de Investigación

Agropecuaria (Agrosavia), por aportar los recursos necesarios para el desarrollo de las actividades. También agradecen al Centro de Investigación por facilitar los espacios para el desarrollo de esta investigación.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto *Programa de mejoramiento genético de razas criollas* (ID 1002462) finan-

ciado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia).

LITERATURA CITADA

Abril, J. L., Roncallo, B., y Bonilla, R. (2017). Efecto de la inoculación con bacterias del género *Bacillus* sobre el crecimiento de *Megathyrsus maximus* Jacq., en condiciones de estrés hídrico. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 37(1), 25–37. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-369X2017000100003&lng=es&tlang=es

Aguado, G. D., Uliarte, E. M., y Funes-Pinter, M. I. (2023). Effect of different concentrations of bioslurry on the germination and production of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76(1), 10149–10156. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n1.99647>

Alvarado, W. E., y Medal, R. A. (2018). *Efecto del Biol como fertilizante orgánico en tres cultivares de Pennisetum purpureum Juigalpa, Chontales, Nicaragua, 2015–2016.* [Tesis de pregrado], Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/3783>

Camargo, O. (2023). *Caracterización de pequeña y mediana ganadería bovina del departamento del Cesar.* Editorial Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83669>

Condo, L., y Ulloa, L. (2019). Evaluación del Biol en la producción de *Brachiaria brizantha* en el Cantón El Triunfo. *Revista*

Caribeña de Ciencias Sociales (RCCS), 6, 73. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/biol-produccion-brachiaria.html>

Cruz, E. C., Marín, I. G., y Cuervo, J. L. (2021). Efecto de la aplicación de biol producido a partir de estiércol bovino en las propiedades de un suelo dedicado a la producción de forraje. *Revista RedBioLAC*, 5(1), 60–65. <http://revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/45>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Agencia de Desarrollo Rural (ADR). (2019). *Plan integral de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial.* Tomo II, Departamento del Cesar. <https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/CESAR-TOMO-II.pdf>

Funes-Pinter, I. F., Salomón, M. V., Martín, J. N., Uliarte, E. M., e Hidalgo, A. (2022). Effect of bioslurries on tomato *Solanum lycopersicum* L. and lettuce *Lactuca sativa* development. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 54(2), 48–60. <https://doi.org/10.48162/rev.39.082>

Gelvez-Pardo, I. M., Moreno, J. M., y Santos, A. M. (2020). *Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404098>

Gobernación del Cesar. (2020). *Plan de desarrollo departamental 2020-2023: "Lo hacemos mejor"*. Gobernación del Cesar. <https://cesar.gov.co/d/index.php/es/menvertpolpla/menvertplandes/232-art-menplandes>

Gutiérrez-Arce, F., Díaz, S., Rojas, Z., Vallejos, L. A., y Gutiérrez, W. (2019). Elaboración de abono orgánico (biol) para su utilización en la producción de alfalfa (*Medicago sativa v. vicus*) en Cajamarca. *Revista Perspectiva*, 20(4), 441–447. <https://doi.org/10.33198/rp.v20i2.00057>

Hernández, E. A., Juárez, F. I., Pell, A. N., Montero, M., Pinos, J. M., y Blake, R. W. (2020). Degradación ruminal in vitro de las fracciones de carbohidratos contenidas en pastos tropicales fertilizados con nitrógeno. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(1), 266–282. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4829>

Infante, A. (2010). *Manual de biopreparados para la Agricultura Ecológica*. TRAMA Impresores S.A. <https://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/148553>

Infante, A. (2010). *Manual de biopreparados para la agricultura ecológica*. TRAMA Impresores S.A. <https://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/148553>

Ipaz-Cuastumal, C. M., Gómez-Ramírez, L. F., y Tauta-Muñoz, J. L. (2023). Productividad hídrica de *Megathyrsus maximus* cv. bajo fertiriego en un suelo con pH variable en el Caribe seco colombiano. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), e-21013019. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.13019>

Jara-Samaniego, L. J., Gallegos-Núñez, J. M., y Cruz-Torres, M. A. (2021). Elaboración y caracterización de bioles de residuos orgánicos. *InterSedes*, 22(45), 189–203. <https://doi.org/10.15517/isucr.v22i45.46013>

Kovacevic, V. (2021). *Efecto de la aplicación en diferentes dosis de biofertilizante producido a partir de los residuos de establos sobre pasturas*. [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/97ae6236-7cd3-4196-99a7-59b1ac494ea7>

López, M. A. R., Junqueira, A. M. R., y Mejía, L. M. (2016). Estabilidade do biofertilizante Supermagro. *Revista Brasileira de Agroecología*, 11, 152–156. <https://periodicos.unb.br/index.php/rbagroecologia/article/view/49812>

Martínez, J., Suárez, E., Rodríguez, J. L., y Mejía, S. (2019). Calidad del suelo para la producción de forrajes en sistemas ganaderos, Capítulo I. En: Mejía S; Suárez, E; Martínez, J; Atencio, L; Sánchez, D; Pérez, JE; Mancipe, E. (Eds.). *Modelo productivo de carne bovina en la región Caribe colombiana*. Mosquera, Colombia. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.740-272-8>

Melo, R. A., Ariza, P., Lissbrant, S., y Tofiño, A. (2015). Evaluation of agrochemicals and bioinputs for sustainable bean management on the Caribbean coast of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 33(2), 203–211. <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n2.49858>

Montenegro-Gómez, S. P., Nieto-Gómez, L. E., y Giraldo-Díaz, R. (2022). Efecto de prácticas agroecológicas en la conservación del suelo de la Zona de Reserva Campesina de San Isidro, Pradera, Valle del Cauca. *Entramado*, 18(2), e210. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.8002>

Moreno, J. A., Bernal, M. C., Acosta, L. M., y Riveros, D. A. (2022). Evaluación de bioles en pasto estrella (*Cynodon nemfluensis*), para el subsector ganadero. Caso Fusagasugá-Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(4), e02. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542022000400002&lng=pt&tlang=es

Oliveira, J. R. D., Gomes, R. L., Araújo, A. S., Marini, F. S., Lopes, J. B., y Araújo, R. M. (2014). Estado nutricional e produção da pimenteira com uso de biofertilizantes líquidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 1241–1246. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriam-bi.v18n12p1241-1246>

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriam-bi.v18n12p1241-1246>

Quiñones-Ramírez, H. Q., Cadillo, W. T., y Morales, J. J. (2016). Evaluación de la calidad de un abono líquido producido vía fermentación homoláctica de heces de alpaca. *Ecología aplicada*, 15(2), 133–142. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.753>

Restrepo-Rivera, J. (2007). *El ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas*. 1a ed. Servicio de Información Mesoamericano sobre Agricultura Sostenible (SIMAS). Managua. https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Libro-de-Agricultura-Organica-GuiasPDF.Net_.pdf

Rivera, J. E., Serna, L. P., Solano, C., Gómez, M., Hernández, D., y Chará, J. (2021). Los sistemas de producción bovina en el departamento del Cesar, Colombia. Una estimación de las emisiones de GEI y sus alternativas de mitigación. *Livestock Research for Rural Development*, 33(52). <http://www.lrrd.org/lrrd33/4/3352jeriv.html>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



CONTAMINACIÓN DE ALIMENTOS POR PLOMO EN COLOMBIA Y TECNOLOGÍAS PARA SU MANEJO AMBIENTAL

FOOD CONTAMINATION BY LEAD IN COLOMBIA AND TECHNOLOGIES FOR ITS ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

Luz Adriana Vargas Mendoza¹

María Eugenia Buitrago González²

Luis Carlos Villegas Méndez³

¹Especialista en Gestión Ambiental, Unidad Central del Valle del Cauca, Tuluá-Colombia. luz.vargas01@uceva.edu.co

²Magíster en Educación, Universidad del Valle, Cali-Colombia.
mbuitrago@uceva.edu.co

³Magíster en Estudios Biológico-Naturistas y homeopatía, Universidad de León, España. lville-gas@uceva.edu.co

Citación: Vargas, L., Buitrago-González, M., y Villegas, L. (2025). Contaminación de Alimentos por plomo en Colombia y Tecnologías para su Manejo Ambiental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 247 - 279. <https://doi.org/10.22490/21456453.7273>

RESUMEN

Contextualización: el plomo es un metal pesado que se encuentra presente en el ambiente de forma natural o producto de actividades industriales como la fabricación de baterías, pigmentos para pinturas y la industria electrónica. El aumento en su utilización hace que se generen vertimientos industriales o restos de fertilizantes que contienen este metal, provocando así la contaminación de las fuentes hídricas y el suelo. Estos, al ser utilizados para el riego o como terrenos de cultivo, llegan a los alimentos, llevando a problemas para la salud y el ambiente debido a su capacidad de bioacumulación.

Vacio de conocimiento: la creciente utilización de plomo representa un problema global con impactos ambientales y sanitarios significativos. Se requiere compilar datos que demuestren los efectos de la contaminación por plomo en alimentos y desarrollar tecnologías de manejo ambiental pertinentes.

Propósito del estudio: evaluar los impactos del plomo en alimentos de Colombia y proponer tecnologías de mitigación ambiental.

Metodología: revisión sistemática mediante búsqueda de información a través de bases de datos como SciELO, Scopus, Redalyc, GALE, Science Direct, PubMed y entidades estatales, entre el periodo de 2015 hasta 2023. Como palabras clave se emplea-

ron los términos: plomo, contaminación, alimentos contaminados, tecnologías y plomo en Colombia. Se incluyeron artículos publicados en inglés y español, donde se evidenciarán los efectos del plomo en los alimentos y medidas de control empleadas en casos de contaminación con este metal. Esta metodología se fundamentó en las etapas delineadas en la guía PRISMA.

Resultados y conclusiones: en Colombia se reportó plomo en alimentos para bebés, arroz importado de Ecuador, panela, papas frescas, leche de bovino, fresas y carne de ganado bovino. La contaminación se atribuye a diversas fuentes como el uso de suelos con presencia de metales pesados, minería ilegal, agua de riego con restos de fertilizantes y pesticidas, reciclaje de baterías de plomo-ácido y uso excesivo de agroquímicos. La mayoría de los departamentos del país registran contaminación por plomo.

Entre los efectos de la contaminación por plomo en la salud se encontraron daños en los sistemas nervioso, cardiovascular, renal y hematológico. En el ámbito neurológico, este metal afecta especialmente el desarrollo del sistema nervioso central en niños y fetos, causando retraso en el desarrollo cognitivo, disminución del coeficiente intelectual, trastornos del comportamiento, hiperactividad y problemas de atención. Además, puede ocasionar daño renal, manifestado como ne-

fropatía por plomo, comprometiendo la función renal y llevando a la insuficiencia renal.

Las tecnologías destinadas a prevenir la ingesta de plomo a través de los alimentos se basan en el tratamiento de suelos y fuentes de agua contaminados. Se destacan dos tec-

nologías efectivas para la descontaminación del plomo: la fitorremediación y biorremediación.

Palabras clave: biotecnología, contaminación alimenticia, impacto ambiental, metal pesado, plomo, salud

ABSTRACT

Contextualization: Lead is a heavy metal that is present in the environment naturally or as a product of industrial activities such as the manufacture of batteries, paint pigments, and the electronics industry. The increase in its use causes industrial discharges or remains of fertilizers that contain this metal to be generated, thus causing contamination of water sources and soil. These, when used for irrigation or as a crop land, reach food, leading to health and environmental problems due to their capacity for bioaccumulation.

Knowledge gap: The increasing use of lead represents a global problem with significant environmental and health impacts. It is necessary to compile data that demonstrate the effects of lead contamination in foods and develop relevant environmental management technologies.

Purpose: Evaluate the impact of lead on Colombian foods and propose environmental mitigation technologies.

Methodology: Systematic review by searching for information through databases such as SciELO, Scopus, Redalyc, GALE,

Science Direct, PubMed and state entities, between the period from 2015 to 2023. The terms: lead, contamination, food was used as keywords. Contaminated, technologies and lead in Colombia. Articles published in English and Spanish were included, which will demonstrate the effects of lead in food and control measures used in cases of contamination with this metal. This methodology was based on the stages outlined in the PRISMA guide.

Results and conclusions: In Colombia, lead was reported in baby food, rice imported from Ecuador, panela, fresh potatoes, bovine milk, strawberries, and bovine meat. Pollution is attributed to various sources such as the use of soils with the presence of heavy metals, illegal mining, irrigation water with traces of fertilizers and pesticides, recycling of lead-acid batteries and excessive use of agrochemicals. Most departments in the country register lead contamination.

Among the health effects of lead contamination were damage to the nervous, cardiovascular, renal, and hematological systems. In the neurological field, this metal espe-

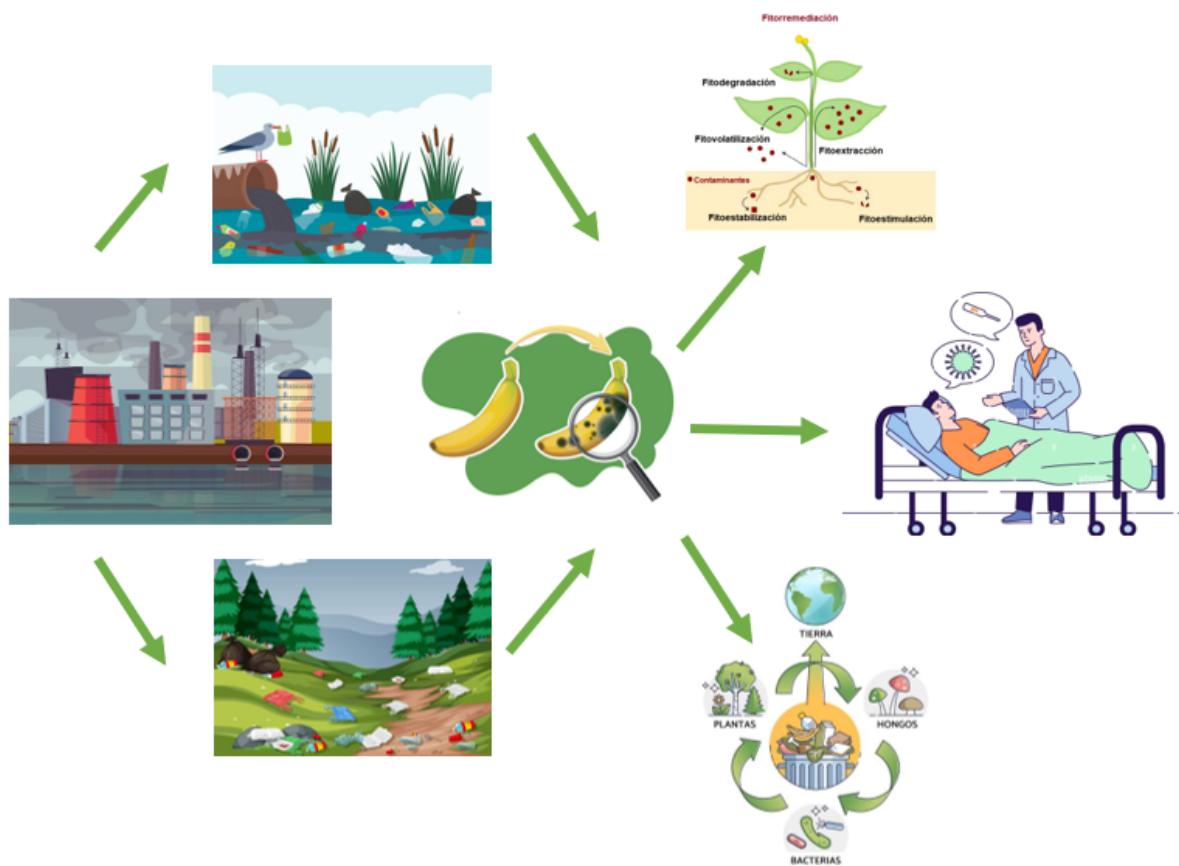
cially affects the development of the central nervous system in children and fetuses, causing delayed cognitive development, decreased IQ, behavioral disorders, hyperactivity, and attention problems. Additionally, it can cause kidney damage, manifested as lead nephropathy, compromising kidney function, and leading to kidney failure.

Technologies aimed at preventing lead ingestion through food are based on the treat-

ment of contaminated soil and water sources. Two effective technologies stand out for lead decontamination: phytoremediation and bioremediation.

Keywords: biotechnology, environmental impact, food contamination, health, heavy metal, lead

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Por más de 9000 años, el plomo (Pb) ha sido uno de los metales de mayor empleo por parte de la humanidad (Rivera y Pernia en 2021). Aunque este metal existe de forma natural en el entorno, el aumento de la actividad industrial ha provocado su conversión en un contaminante dado su potencial para bioacumularse en seres vivos y ecosistemas. (Guanoliquín, 2021; Khanam *et al.*, 2020). La peligrosidad de la contaminación por plomo no solo se presenta por la exposición de los trabajadores ante este, sino también por la contaminación ambiental que genera en el agua, aire o suelo. Por tanto, la toxicidad por plomo resulta directamente proporcional al desarrollo industrial (Rodríguez *et al.*, 2016).

Las concentraciones de plomo presentes en el ambiente de forma natural no constituyen una fuente de contaminación ambiental. Es por ello que, entre las principales fuentes antropogénicas se destacan actividades como la fabricación de baterías, aditivo en la gasolina, industria electrónica y de cómputo, revestimiento de cables y tuberías, pigmentos para pinturas, soldaduras, entre otros (García *et al.*, 2018).

Las vías de exposición a este metal varían dependiendo de la actividad que se realice, dentro de estas se encuentran la inhalación de partículas, el contacto con elementos que contengan plomo o la ingesta de agua y alimentos contaminados, siendo esta última una de las más comunes (Ikechukwu *et al.*, 2022). Entre los principales factores que contribuyen a la contaminación de los ali-

mentos por plomo está el agua de riego contaminada con sustancias provenientes de vertimientos industriales o restos de fertilizantes (Vitola *et al.*, 2022); Augustsson *et al.*, (2023) además, Su *et al.*, (2023) plantean que otra forma de contaminación de alimentos como la lechuga, perejil, acelga y col risada, es ocasionada por la contaminación atmosférica, como la adhesión de partículas de plomo. Salas *et al.* (2019), hacen referencia a la detección de plomo en jugos de caña, tomate, piña, yuca, papa, fresa, toronja y guayaba que debido a su tendencia a acumularse en las partes comestibles, puede dar lugar a cuestiones de salud tanto en seres humanos como en animales.

Es relevante destacar que el plomo no solo se encuentra en las actividades previamente mencionadas, también puede estar presente en los envases de alimentos procesados y utensilios de cocina, como ollas y platos, que están fabricados con materiales que contienen plomo (Ortiz, 2023). Estos utensilios representan una fuente de exposición cuando se utilizan para almacenar alimentos. Por otro lado, una forma común de riesgo ocurre debido al uso inapropiado o la falta de equipo de protección personal por parte de los trabajadores involucrados en la aplicación de pinturas y esmaltes que contienen este metal pesado, lo que lleva a su inhalación. (García *et al.*, 2016). Cuando este metal ingresa al organismo se distribuye en los riñones, hígado, encéfalo y huesos debido a su similitud con el calcio (Azcona *et al.*, 2015); el mayor depósito de plomo son

los huesos, en ellos puede permanecer hasta por 20 años e interfiere con las funciones del calcio, ocasionando problemas en la salud (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

Por ende, la contaminación por plomo es considerada un problema de salud pública a nivel global, según información proporcionada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) citada por Salas *et al.*, (2019), se reportó que 494.550 personas perdieron la vida debido a la exposición al plomo en el año 2015, siendo los niños la población más afectada. Una concentración de tan solo 10 µg/dL puede requerir la hospitalización inmediata. La presencia del plomo en el cuerpo afecta diversos sistemas, incluyendo el nervioso, cardiovascular, renal, sanguíneo y gastrointestinal.

La Organización Mundial de la Salud, (OMS, 2022) menciona que no hay niveles de plomo en la sangre que se consideren seguros para la salud. Incluso una concentración de tan solo 5 µg/dL puede tener efectos perjudiciales en el sistema cognitivo, causar dificultades de aprendizaje y alterar el comportamiento de los niños. Por lo tanto, a medida que aumenta el nivel de exposición al plomo, también acrecientan los efectos negativos asociados.

El plomo destaca como uno de los metales pesados más ampliamente utilizados en la industria debido a sus propiedades distintivas. Se ha puesto en manifiesto los daños causados por su toxicidad y su presencia en determinados alimentos. Como señala Reyes *et al.* (2016), en varias regiones de la India se emplea agua contaminada con plomo para el riego de los cultivos, lo que da lugar a un

incremento en las concentraciones de este metal en el suelo. Como resultado, el riesgo de acumulación de plomo en los alimentos y en los organismos aumenta de manera significativa. Aunque los estudios realizados en estos sitios de la India han revelado niveles por debajo de los límites establecidos, es esencial tenerlos en consideración y llevar a cabo análisis continuos. Esto es debido a la capacidad de bioacumulación de este metal en los seres vivos, lo cual afecta toda la cadena trófica.

Según Calao y Marrugo (2015), la exposición de los organismos al agua contaminada con plomo disminuye las actividades antioxidantes en órganos vitales como el riñón, el hígado y el cerebro, indicando un aumento en el estrés oxidativo. Esto subraya la importancia, como menciona la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), de comprender cómo el plomo afecta los sistemas biológicos y su impacto a largo plazo en la salud y el medioambiente. Además, resalta la necesidad de investigar los mecanismos precisos del efecto del plomo en la función antioxidante de órganos y tejidos, para desarrollar estrategias que mitiguen sus efectos negativos en la salud pública y los ecosistemas naturales (Calao y Marrugo, 2015).

A nivel latinoamericano, en la ciudad de Torreón, México, se detectó intoxicación por plomo en niños, resultado directo de la actividad industrial en la región. El plomo, entró en contacto con el entorno local y, a través de procesos naturales y humanos, se incorporó en la cadena trófica, lo que significa que se propagó desde el suelo y el agua hasta los cultivos y, en última instancia, a los

seres humanos que consumieron esos alimentos contaminados (Reyes *et al.*, 2016).

La contaminación por plomo, originada por la actividad industrial, puede tener consecuencias graves en la salud pública. Además, se destaca la importancia de la regulación y control de las emisiones industriales, así como de la implementación de prácticas agrícolas seguras, para prevenir la acumulación de metales pesados en los alimentos y su impacto perjudicial en la salud de las comunidades locales. Es fundamental que las autoridades tomen medidas proactivas para abordar estos problemas y salvaguardar la salud al igual que el bienestar de las poblaciones afectadas (Rodríguez *et al.*, 2016).

En Ecuador se detectó plomo en cultivos de arroz en áreas cercanas a la cuenca del río Guayas. Se hallaron concentraciones de 4,35 mg/kg, superando los límites establecidos en dicho país (Romero, 2020). La presencia de plomo en los alimentos no se limita a los productos de forma natural, también se encuentra presente en productos alimentarios elaborados por la industria, como es el caso del chocolate en polvo. Dado su alto consumo en Ecuador, podría representar una causa importante de intoxicación a largo plazo (Zambrano, 2020). De la misma manera, según Narváez *et al.*, (2020), en la ciudad de Tulcán, Ecuador, se observaron cambios emocionales, disminución de habilidades y destrezas, depresión y tristeza sin causa aparente, en carpinteros dedicados a actividades como fundición, reciclaje inseguro y al uso frecuente de pinturas o gasolina, la cual contiene plomo.

Según la Organización Mundial de la Salud (2022), en Senegal y Nigeria los niños están constantemente expuestos a tierras y polvos contaminados por plomo, generados por la minería y el reciclaje de baterías. Estos contaminantes causan intoxicaciones masivas y han resultado en múltiples muertes. Tanto la Organización Mundial de la Salud como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible han establecido niveles de peligro relacionados con la presencia de plomo y otros metales pesados en el agua potable y los alimentos. Sin embargo, se ha detectado la presencia de concentraciones significativas de plomo que exceden los límites establecidos. Es fundamental recordar que todas las concentraciones de metales pesados, en este caso el plomo, pueden tener efectos adversos en el organismo por su capacidad de bioacumulación en los tejidos (Hon *et al.*, 2017).

En Colombia es frecuente que los trabajadores del sector informal estén expuestos al plomo, debido al aprovechamiento de manera inadecuada e ilegal de las baterías para fundición de rejillas, soldaduras y otros procesos. Esto ocasiona problemas de salud pública y ambiental, que son la principal causa de morbilidad. En el sector informal del reciclaje de baterías en Cundinamarca, se determinó que la intoxicación por plomo se debe a niveles elevados de exposición, ausencia de equipos de protección personal y falta de conciencia sobre las afectaciones en la salud que puede provocar este tipo de contaminación; a su vez se resaltó la importancia de la higiene y el consumo de alimentos dentro de lugares establecidos y que no interfieran con la inocuidad de los víveres (Díaz *et al.*, 2022).

Otra de las vías principales de exposición al plomo en Colombia surge de la contaminación de ríos y lagunas. Según lo indicado por Reyes *et al.* (2016), se detectaron niveles elevados de este metal en diferentes cuerpos de agua, como los ríos Bogotá, Marmato, Achi y Cauca, así como en las localidades de La Pintada y Pinillos. Además, Lizarazo *et al.* (2020) señalan la presencia de plomo en alimentos cultivados en proximidad a la represa de Muña, la cual recibe el agua del río Bogotá. Estos hallazgos evidencian la contaminación por plomo en estas zonas, resaltando la importancia de llevar a cabo investigaciones en las comunidades circundantes para evaluar los posibles impactos en la salud derivados del consumo de alimentos y agua provenientes de estas fuentes.

Por otra parte, como lo indican Calao y Marrugo, (2015) en la región de la Mojana, que comprende once municipios de los departamentos de Bolívar, Córdoba, Antioquia y Sucre, se encontraron concentraciones elevadas de plomo y otros metales pesados en la sangre de la población expuesta. Estas concentraciones variaron entre 36,1 µg/L y el valor máximo registrado de 52,46 µg/L, superando los límites permitidos. Según los estándares de la Organización Mundial de la Salud, los niveles a partir de 5 µg/L se consideran altos, siendo el valor máximo permitido de 10 µg/L.

Se debe tener en cuenta que estas poblaciones se alimentan de pescado y arroz producido en la zona. Aunque actualmente no se hayan realizado estudios para determinar el plomo en el agua y los diferentes alimentos del territorio, los resultados de esta

investigación muestran que el consumo de alimentos contaminados es una de las principales fuentes de intoxicación por plomo. Esto es debido a dos factores importantes del lugar: las inundaciones del río Cauca que transportan sustancias tóxicas de actividades industriales y mineras, y la presencia de fertilizantes y plaguicidas con metales pesados en los cultivos de arroz. La exposición al plomo en la población no está vinculada a la ocupación laboral, sino al riesgo ambiental y el consumo de alimentos contaminados, lo cual resalta la necesidad de tomar medidas para reducir esta exposición y promover prácticas agrícolas y de pesca más seguras en la zona (Calao y Marrugo, 2015).

Vega Clavijo y Vega Castro, (2021), muestran que existe presencia de plomo en el suelo y la lechuga cultivada en huertos urbanos de la ciudad de Bogotá; para el caso del suelo este arrojó en promedio 24,27 ppm/Pb, en un rango entre 0 y 110 ppm/Pb, el cual presenta valores normales comparados con los valores de la EPA, citada por los mismos autores, en la que el plomo en suelos de uso agrícola e industrial puede estar entre los 400 y 1200 ppm. Para el caso de la lechuga, esta también presenta niveles por debajo de los límites establecidos por la normatividad colombiana. A pesar de que el contenido de plomo no supera los límites establecidos, es importante estar en constante monitoreo, debido a que como ya se sabe, el plomo tiene la capacidad de acumularse en el organismo y al estar en constante consumo de estos alimentos podría reflejarse en diferentes problemas de la salud en dichas poblaciones.

En la región del Magdalena Medio, donde las principales actividades económicas son la industria petroquímica y la agropecuaria, se detectaron metales pesados como el plomo, los cuales tienen un impacto negativo en los pastos de las especies del género *Brachiaria* (*B. humidicola* y *B. decumbens*), dado que presentan bioacumulación en sus estructuras y ocasionan la incorporación de este metal pesado en la cadena trófica por medio del ganado que consume estos pastizales (Peláez *et al.*, 2016); y los habitantes de este lugar, al consumir su carne o leche, se encuentran expuestos a sufrir problemas de salud (Castro *et al.*, 2018).

Las especies vegetales no son los únicos alimentos que presentan contaminación por plomo en Colombia, Figueroa *et al.* (2017) al igual que Vergara y Rodríguez (2015), revelan que en la laguna de Sonso, ubicada en el municipio de Buga y en la cuenca alta del río Chicamocha, específicamente en la vereda Volcán – Paipa, la especie *Oreochromis niloticus* (tilapia de Nilo) exhibe cambios en sus tejidos que son indicativos del daño causado por contaminantes ambientales como el plomo; adicionalmente se descubrió que los órganos internos de esta especie contienen este metal, aunque los niveles detectados no sobrepasan los límites permitidos por la normativa colombiana. Sin embargo, es evidente que hay un proceso de bioacumulación, lo cual podría representar un problema significativo para la salud de las personas y el medioambiente.

Aunque en ciertos casos se han establecido límites máximos permisibles para la concentración de plomo en alimentos en Colombia,

es esencial mantener una supervisión rigurosa. Esto se debe a que en la mayoría de los estudios realizados se ha confirmado la existencia de este metal pesado en la comida. Sin embargo, en algunas investigaciones aún no se ha establecido de manera definitiva cuál es el impacto que estas cantidades específicas pueden tener en la salud humana y en el entorno ambiental. Por tanto, la importancia de llevar a cabo análisis exhaustivos y continuos radica en garantizar la seguridad alimentaria y ambiental, así como en comprender plenamente las implicaciones a largo plazo de la presencia de plomo en los alimentos.

Por lo anterior, y de acuerdo con el Ministerio de Salud y Protección Social (2021), la exposición al plomo conlleva a consecuencias económicas significativas tanto para las poblaciones afectadas como para la sociedad en su conjunto. Estos costos engloban gastos médicos vinculados al tratamiento de la intoxicación por este metal pesado, los desembolsos asociados a la necesidad de educación especial debido a la disminución intelectual inducida por este metal, así como pérdidas de productividad que resultan de la disminución de los ingresos a lo largo de la vida de aquellos afectados. De igual manera, el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2020), establece que la exposición infantil al plomo conlleva un impacto económico de alrededor de 1 billón de dólares en países de ingresos bajos y medios, resultado de la reducción del potencial económico de esta porción de la población.

Por lo tanto, ante esta problemática, autores como Zapata-Muñoz *et al.* (2018) mencionan la importancia de determinar

las principales fuentes que provocan la presencia de plomo en la producción y manejo de alimentos en Colombia, comprender sus efectos, y fomentar el uso de tecnologías que ayuden a reducir la contaminación por plomo. Todo esto es necesario para proteger al ambiente y la salud de las poblaciones.

A partir de lo expuesto esta investigación tuvo como objetivo evaluar los impactos

del plomo en alimentos de Colombia y proponer tecnologías de mitigación ambiental. Estas propuestas no solo tienen la intención de reducir los riesgos para la salud de los consumidores, sino también de proteger la integridad del ecosistema y la seguridad alimentaria en el país, reflejando un enfoque proactivo hacia la gestión sostenible de esta problemática.

② MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio corresponde a una revisión sistemática (enmarcada en una investigación de tipo documental) que analizó la presencia de plomo en los alimentos en Colombia, al mismo tiempo que identificó los impactos en la salud y el entorno.

Protocolo

Para la recopilación de información, se llevó a cabo una búsqueda a través de instituciones como la Organización Mundial de la Salud, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y el Ministerio de Salud y Protección Social, así como en diversas bases de datos, entre las que destacan SciELO, Scopus, Redalyc, GALE, Science Direct, PubMed, Ambientalex y trabajos de grado, entre otras fuentes pertinentes. Se estableció una restricción de idioma que incluyó tanto fuentes en inglés como en español, priorizando especialmente aquellos estudios realizados en Colombia. No obstante, se consideraron igualmente las técnicas y tecnologías aplicadas en otras regiones que

pudieran ser adaptadas al contexto de estudio. El rango de búsqueda abarcó desde 2015 hasta 2023, con el propósito de asegurar la obtención de información actualizada y relevante (Figura 1).

Estrategia de búsqueda bibliográfica

En el proceso de búsqueda de artículos y documentos se consideraron las siguientes palabras clave: “plomo”, “contaminación”, “alimentos contaminados”, “intoxicación”, “tecnologías”, “mitigación” y “plomo en Colombia”. Para la elaboración de la ecuación de búsqueda, se implementó el operador booleano “and” con el fin de optimizar la precisión de los resultados. Una vez establecida esta estrategia, se procedió a llevar a cabo la investigación en varias bases de datos de renombre, entre las cuales se encontraron SciELO, Scopus, Redalyc, GALE, Science Direct, PubMed y Ambientalex. Este proceso integral de búsqueda y selección de

información se realizó con el propósito de obtener un panorama amplio y actualizado de la problemática asociada al plomo en el contexto de la contaminación alimentaria en Colombia.

Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión que rigieron el proceso de selección se sustentaron en la elección de artículos originales que aportaron información sustancial a través de estudios experimentales y de casos concretos, así como investigaciones que propusieron medidas de control. Con el objetivo de acotar y refinar el alcance de la búsqueda, se consideró una limitación de idioma abarcando únicamente trabajos publicados en inglés y español. Asimismo, se estableció un marco temporal definido, comprendido entre los años 2015 y 2023, con el propósito de asegurar que la información recopilada estuviera actualizada y relevante para la temática abordada. En relación con las medidas de control, no se aplicaron restricciones de ubicación geográfica, con el fin de considerar enfoques y soluciones que pudieran ser usados tanto en Colombia como en otros contextos internacionales. Mediante el empleo de estos rigurosos criterios, se aspiró a garantizar la obtención de resultados sólidos y pertinentes que respaldaran el objetivo central de la investigación.

Criterios de exclusión

Durante el proceso de búsqueda y selección de información, se llevaron a cabo criterios rigurosos para garantizar la calidad y

relevancia de los documentos incluidos en el estudio. Se excluyeron de manera sistemática aquellos documentos con fechas de publicación anteriores al periodo de tiempo propuesto, así como artículos que carecían de la disponibilidad de texto completo o que no guardaban relación directa con el tema de estudio. Además, se implementó una estrategia para eliminar cualquier duplicado encontrado en las bases de datos.

En la fase de identificación de los alimentos contaminados por plomo y sus efectos, se aplicó una restricción específica: se excluyeron los estudios que no hubieran sido realizados en Colombia. Esta decisión se basó en la necesidad de seleccionar con precisión las técnicas y tecnologías de mitigación, considerando los focos de contaminación predominantes y los productos alimentarios más susceptibles a la presencia de plomo en el contexto colombiano. Esta estrategia aseguró que las medidas propuestas fueran pertinentes y aplicables a la realidad local, maximizando así la efectividad de las estrategias de mitigación y prevención.

Extracción de datos

Durante la fase de selección de la información, se implementó un enfoque metodológico detallado para garantizar la integridad y relevancia de los datos recopilados. Inicialmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los títulos y resúmenes de los documentos identificados, y posteriormente se aplicaron los criterios predefinidos de inclusión y exclusión para evaluar el contenido completo de cada artículo.

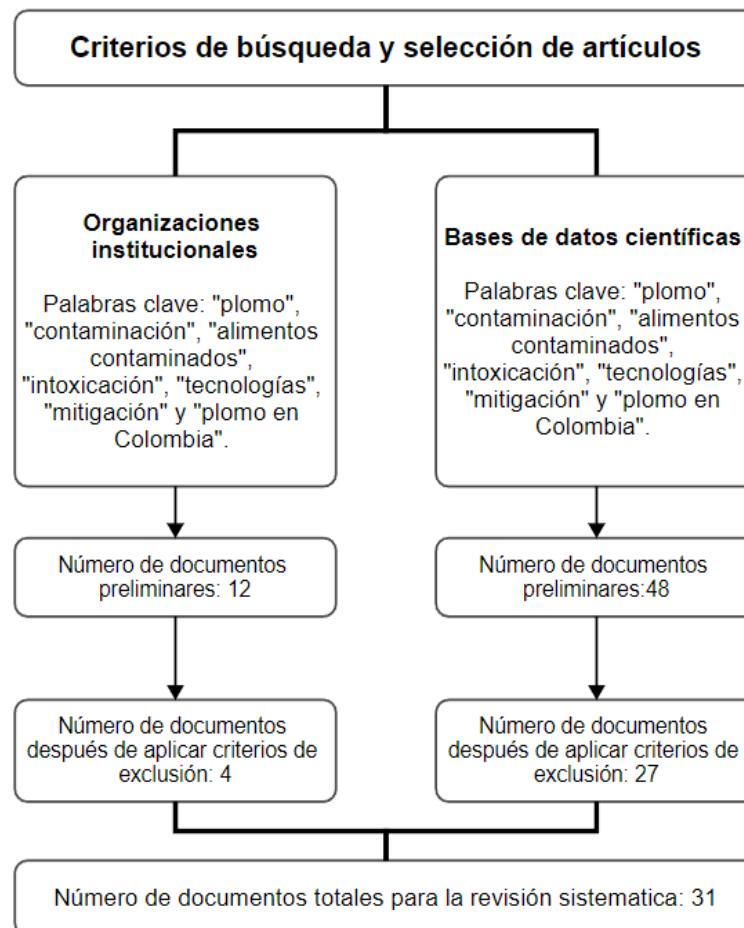


Figura 1. Flujograma de búsqueda y elección de documentos para la revisión basado en las etapas delineadas en la guía PRISMA

Fuente: autores.

La organización y sistematización de la información obtenida se estructuró cuidadosamente para asegurar su manejo eficiente y análisis efectivo. Se empleó una base de datos en formato Excel, en la cual se registraron de manera ordenada los alimentos identificados con presencia de plomo, los niveles específicos de plomo detectados, los valores permisibles establecidos, las fuentes de contaminación involucradas y las técnicas de tratamiento aplicadas. Esta estructura permitió conseguir una visión clara de los alimentos más afectados por la contaminación y sus principales fuentes de origen, ya

sea a través del suelo, agua u otros procesos de producción.

Adicionalmente, se procedió a mapear la información recopilada sobre los alimentos contaminados por plomo en Colombia. Mediante la representación visual en un mapa, se logró identificar de manera geográfica las áreas afectadas y la magnitud de los casos encontrados en cada departamento. Para facilitar la interpretación, se asignaron colores específicos a diferentes rangos de casos, lo que proporcionó una perspectiva rápida y

clara de la distribución de la contaminación por plomo en el país.

En un enfoque más analítico, se priorizó el análisis de las actividades más recurrentes en Colombia, como la minería y el reciclaje de baterías de plomo-ácido, que se destacan por ser prácticas relevantes y a la vez preocupantes en términos de contaminación. A partir de esta focalización, se elaboró una matriz de identificación y valoración de impactos ambientales. Este enfoque permitió evaluar en detalle los efectos resultantes de la contaminación y la intoxicación por plomo derivados de estas prácticas, contribuyendo así a una comprensión más profunda de las consecuencias ambientales y de salud asociadas a estos procesos en el contexto colombiano.

El análisis de las actividades seleccionadas fue realizado utilizando la metodología propuesta por Vicente Conesa en 1997. En este enfoque, se evaluaron las distintas ac-

tividades vinculadas a cada fuente de contaminación en términos de su impacto en el medioambiente y la sociedad. Esta evaluación se fundamentó en la consideración tanto de aspectos cuantitativos como cualitativos de los efectos de cada actividad, tanto en el contexto de la minería como en el del reciclaje de baterías de plomo-ácido.

Cada criterio y sus opciones se asignaron a un valor numérico que permitió medir cuantitativamente el impacto generado y su importancia. El resultado final se obtuvo sumando los valores de todos los criterios evaluados para cada impacto, excepto la Magnitud, que se multiplicó por 3, y la Cobertura, que se multiplicó por 2. Estas ponderaciones reflejaron la importancia relativa de estas variables en la evaluación final del impacto, teniendo en cuenta los criterios que se muestran en la Tabla 1 y el resultado se obtendrá a partir de la Ecuación 1.

$$\text{Importancia(IMP)} = CA * (3MG + 2EXT + DUR + REV + REC + PE + TD + TP + PO)$$

(Ecuación 1)

Con este resultado se obtuvieron calificaciones Irrelevante (< -25), Moderado (-25 a <-50), Severo (-50 a -75) y Crítico (> -75), esto permitió clasificar los impactos e iden-

tificar las etapas en las que se requiere implementar medidas de tipo preventivas o correctivas para contribuir a la disminución de los efectos de la contaminación por plomo.

Tabla 1.

Criterios de evaluación para el cálculo de la importancia

Criterios	Rangos
Carácter (CA)	Positivo o negativo
Magnitud (MG)	
Probabilidad de ocurrencia (PO)	Bajo (1) - medio (4) - alto (8)
Tendencia (TD)	Simple (1) - Acumulativo (2)
Tipo (TP)	Indirectos (1) - directos (2)
Extensión (EXT)	Puntual (1) – local (4) – regional (8)
Duración del impacto (DUR)	Efímero (1) tiene una duración menor a un año Transitorio (4) en un período entre 1 a 3 años Persistente (8) se encuentra entre 4 y 10 años Permanente (12) dura más de 10 años o es indefinida
Reversibilidad (REV)	Corto plazo (1) puede revertirse en menos de 1 año Mediano plazo (4) puede revertirse en un período de 1 a 3 años Largo plazo (8) puede revertirse en un período de 4 a 10 años Irreversible (12) no puede ser revertido
Recuperabilidad (REC)	Corto plazo (1) presenta una recuperación natural inferior a 2 años Mediano plazo (4) la recuperación natural ocurre en un periodo de tiempo que oscila entre 2 a 6 años Largo plazo (8) se trata de una recuperación natural que requiere un período de 6 a 15 años Irreversible (12) no es posible una recuperación natural
Periodicidad (PE)	Irregular o esporádico (1) Periódico (4) Discontinuo (8) Continuo (12)

Estos son los criterios que se tienen en cuenta para realizar el cálculo de la importancia, teniendo en cuenta sus rangos de calificación

Fuente: autores.

Finalmente, en la selección de las tecnologías se elaboraron tablas de datos que contenían el título de la investigación, los autores, el nombre de la técnica o tecnología utilizada, el tipo de investigación, el lugar de aplicación y una breve descripción de las características de la tecnología. Además, se realizó una evaluación de cada una de las técnicas y tecnologías identificadas, tomando en consideración los siguientes criterios: facilidad de implementación, eficiencia en términos porcentuales, costos asociados, generación de residuos y contribución ambiental.

Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizó una escala de puntuación del 0 al 5, donde

0 representaba la valoración más baja y 5 la más alta. Posteriormente, se calculó un promedio de las puntuaciones otorgadas a cada criterio para determinar cuáles técnicas y tecnologías habían obtenido los mejores resultados. A partir de esta valoración, se procedió a crear fichas técnicas que presentaban de manera organizada la información relevante de las tecnologías seleccionadas. Estas fichas técnicas incluían tanto las ventajas como las desventajas de la implementación de cada tecnología, brindando una visión completa y estructurada de sus características y potencialidades.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Alimentos contaminados con plomo en Colombia

A continuación, se presentan casos reportados de contaminación de alimentos por plomo en Colombia, en los años 2015 a 2023.

Plomo en alimentos para bebés

La presencia de plomo en alimentos para bebés, como jugos de frutas, vegetales de raíz y galletas, son motivo de preocupación, ya que, aunque en niveles bajos, al ser un metal pesado bioacumulable, tienen un impacto considerable en bebés, lo que plantea una problemática seria para la salud. La EPA estima que más del 5% de los menores supera los niveles diarios de ingesta de plomo establecidos por la FDA, y los alimentos son la princi-

pal fuente de exposición al plomo en la mayoría de los niños pequeños (Zuraw, 2017).

Arroz contaminado con plomo

En 2019, se detectó arroz importado de Ecuador contaminado con plomo en Colombia (Vargas, 2019), con fuentes de contaminación provenientes del suelo y la minería ilegal.

Plomo en panela

Ruiz *et al.* (2018) encontraron presencia de plomo en panela, a pesar de cumplir con normas sanitarias. Aunque los niveles estaban dentro de los límites permitidos, la alta ingesta de panela podría aumentar la exposición.

Plomo en tubérculos como la papa

Se encontró plomo en papas frescas con cáscara en distintos municipios (Moreno et al., 2016), atribuido a la contaminación del suelo y al uso excesivo de agroquímicos.

Plomo en leche fresca de bovino

Serna y Valderrama (2017) evaluaron la presencia de plomo en leche cruda y procesada, encontrando niveles dentro de los límites permisibles.

Plomo en frutos y bayas pequeñas como la fresa

Huertas (2018) detectó plomo en fresas frescas debido a la contaminación del agua de riego, superando los límites permitidos.

Plomo en carne

Bustamante *et al.* (2016) revelaron la presencia de plomo en carne de ganado bovino criado en Colombia, con niveles superiores a los límites permitidos en algunos casos.

Se identificaron factores asociados a la presencia de plomo en los alimentos, como la falta de higiene en la preparación y el consumo de alimentos, así como hábitos alimenticios que pueden aumentar la absorción de plomo. Además, se resalta que la exposición al plomo puede provenir del agua, el suelo y el aire, afectando la seguridad alimentaria. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos.

Tabla 2.

Alimentos contaminados por plomo en Colombia

Alimento	Niveles de Pb hallados	Valor permisible de Pb	Fuente de contaminación	Técnica de tratamiento	Referencia
Productos para bebés (jugos y galletas)	0,086 mg	0,01 mg/kg	Suelo y procesos de producción	Ninguna	(Zuraw, 2017)
Jugos de fruta para bebés	Más de 5 ppb	• 50 ppb para jugos de fruta • 5 ppb para agua embotellada	Suelo	Reducir el consumo de productos procesados	(Zuraw, 2017)
Arroz	0,7 mg/kg	0,5 a 3,6 mg/kg	• Agua a través de la minería ilegal • Productos fertilizantes con plomo	Detención del producto contaminado y estudio en el arroz nacional	(Vargas, 2019)
Panela	0,0060 a 0,0783 mg/kg	0,2 mg/kg	Suelo y procesos de producción	Ninguna por ser valores bajos	(Ruiz <i>et al.</i> , 2018)
Tubérculos como la papa	0,085 a 0,150 mg/kg	0,1mg/kg	Suelo	Tratar el agua de riego empleando técnicas de medición como la técnica voltamétrica	(Moreno <i>et al.</i> , 2016)

Leche de bovino	0,0029 a 0,02254 mg/l	0,02 mg/l	Suelo y agua como fuente de alimento para los bovinos	Seguimiento de muestras del alimento a partir de técnicas como el método de espectrofotometría absorción atómica por llama	(Serna y Valderrama, 2017)
Frutos y bayas pequeñas	0,3012 ppm	0,20 ppm	Agua de riego contaminada	Seguimiento de muestras del alimento usando la técnica voltametría de onda cuadrada (SWV)	(Huertas, 2018)
Carne	0,10 a 0,62 ppm	0,1 ppm	Suelo y agua como fuente de alimento para los bovinos	Seguimiento de muestras del alimento usando espectrofotometría de absorción atómica	(Bustamante et al, 2016)

Fuente: autores a partir de la revisión de información reportada en bases de datos consultadas.

Los resultados del análisis de diversos alimentos ponen de manifiesto la presencia alarmante de plomo en productos consumidos comúnmente en Colombia. Se destaca particularmente la preocupación por la contaminación con Pb en alimentos destinados a bebés, como jugos y galletas; encontrándose niveles de plomo hasta de 0,086 mg, que supera ampliamente el valor permisible de 0,01 mg/kg. Lo anterior, conlleva a graves consecuencias en la salud de este grupo vulnerable, puesto que el cerebro en desarrollo de los niños es susceptible al Pb, incluso en pequeñas cantidades, desencadenando trastornos de desarrollo intelectual (Qin *et al.*, 2021), particularmente la disminución del nivel de coeficiente intelectual en ellos, hasta en 1,94 puntos (Chowdhury y Alam, 2024). Este caso es solo un ejemplo entre muchos otros productos alimenticios afectados por la presencia de plomo, como se muestra en la Tabla 2, registrando niveles alarmantes de contaminación (Zuraw, 2017). En este contexto, la presencia de plomo en una amplia gama de alimentos en Colombia, incluyendo productos para bebés, arroz, panela, papas, leche, frutas y carne

de ganado bovino, es una preocupación seria, destacando la necesidad de una regulación más estricta, controles de calidad rigurosos al igual que la identificación y mitigación de las fuentes de contaminación para proteger la salud pública.

Por ejemplo, para el caso del arroz, la contaminación del suelo de los arrozales con Pb, es un problema importante y amenaza la seguridad alimentaria, ya que se transmite a través del sistema suelo-planta (Liu, 2024), como se ha determinado en estudios realizados en suelos severamente contaminados con Pb, ubicados cerca a zonas industriales y en los que se cultiva arroz, registrando para este alimento valores de Pb en un rango de 114 mg/kg (Kumar *et al.*, 2022) hasta 1200 mg/kg (Qin *et al.*, 2021).

Para la papa se reporta que, en cuencas como la del Atrato, supera el límite permisible de Pb establecido por la OMS/FAO, siendo un tubérculo que consumen frecuentemente sus habitantes (Caicedo-Rivas, 2023). Alhaj Hamoud *et al.* (2024) estudiaron la acumulación del Pb en la papa, encontrando

que los niveles de consumo y concentración de Pb están determinados por la ingesta diaria de los alimentos, registrando valores para la papa de $4\mu\text{g}/\text{kg}$ día de Pb, siendo así, que una alta tasa de ingesta diaria de este alimento, representa mayores riesgos para la salud.

Por otra parte, la leche y sus derivados son alimentos fundamentales en la dieta de los seres humanos (Castro-González *et al.*, 2021), pero su calidad plantea riesgos, especialmente en zonas contaminadas, debido a que las vacas son alimentadas con forrajes con presencia de plomo (Özbay *et al.*, 2023), y también beben agua subterránea proveniente de pozos, o agua superficial contaminada con Pb (Kandhro *et al.*, 2023). Se ha demostrado que la leche cruda y otros productos lácteos contienen niveles de plomo en un rango de $(2,31 \pm 0,127 \text{ mg/L})$ por encima de los límites permitidos, lo que representa un riesgo para la salud, especialmente en niños entre 6 meses y 5 años que consumen diariamente leche de vaca (Tadese Tola *et al.*, 2024). Para el caso de la leche de vaca procesada se ha encontrado un contenido de plomo metálico menor que en la no procesada (Rachmawati, 2024).

La acumulación de Pb en la fresa tiene como principal contribuyente el agua contaminada utilizada para el riego de este cultivo (Hassan *et al.*, 2024). También la fresa posee un riesgo de contaminación por la presencia de Pb en el suelo. Para garantizar la seguridad del consumo de este fruto se requiere reconocer los peligros ocasionados por la contaminación de este metal pesado (Yang *et al.*, 2022).

En la carne, se ha encontrado que el ganado corre un riesgo mayor debido al consumo de forraje, alfalfa, maíz y sorgo contaminado con Pb, debido al riego de estos cultivos con aguas residuales. Por lo que es fundamental determinar la acumulación de Pb en la carne de ganado, para establecer los peligros de la exposición humana al consumo de este alimento (Alhaj Hamoud *et al.*, 2024).

Ante este panorama, es esencial abordar esta problemática y aplicar técnicas de tratamiento y seguimiento efectivas para garantizar la seguridad alimentaria y la salud pública. La implementación de medidas adecuadas se convierte en una necesidad urgente para mitigar la exposición al plomo en alimentos y asegurar un entorno alimentario seguro para la población (Ruiz *et al.*, 2018). Estos hallazgos subrayan la importancia de intervenciones decisivas que promuevan la protección de la salud en la comunidad.

Distribución por departamentos de la contaminación por plomo en alimentos en Colombia

Los casos de contaminación se distribuyen en diferentes departamentos de Colombia, lo que resalta la gravedad de la presencia de plomo en la salud pública. Es importante adoptar medidas para prevenir y reducir la exposición al plomo en los alimentos y proteger la salud de la población.

Estos casos se pueden ver reflejados en el mapa de Colombia presentado en la Figura 2, los cuales muestran que se distribuyen a

nivel general en el país, siendo solo unos pocos los departamentos en los que no se encontró registro de la presencia de plomo en

la investigación, lo cual prueba la gravedad a nivel de este metal pesado en la salud de los colombianos.

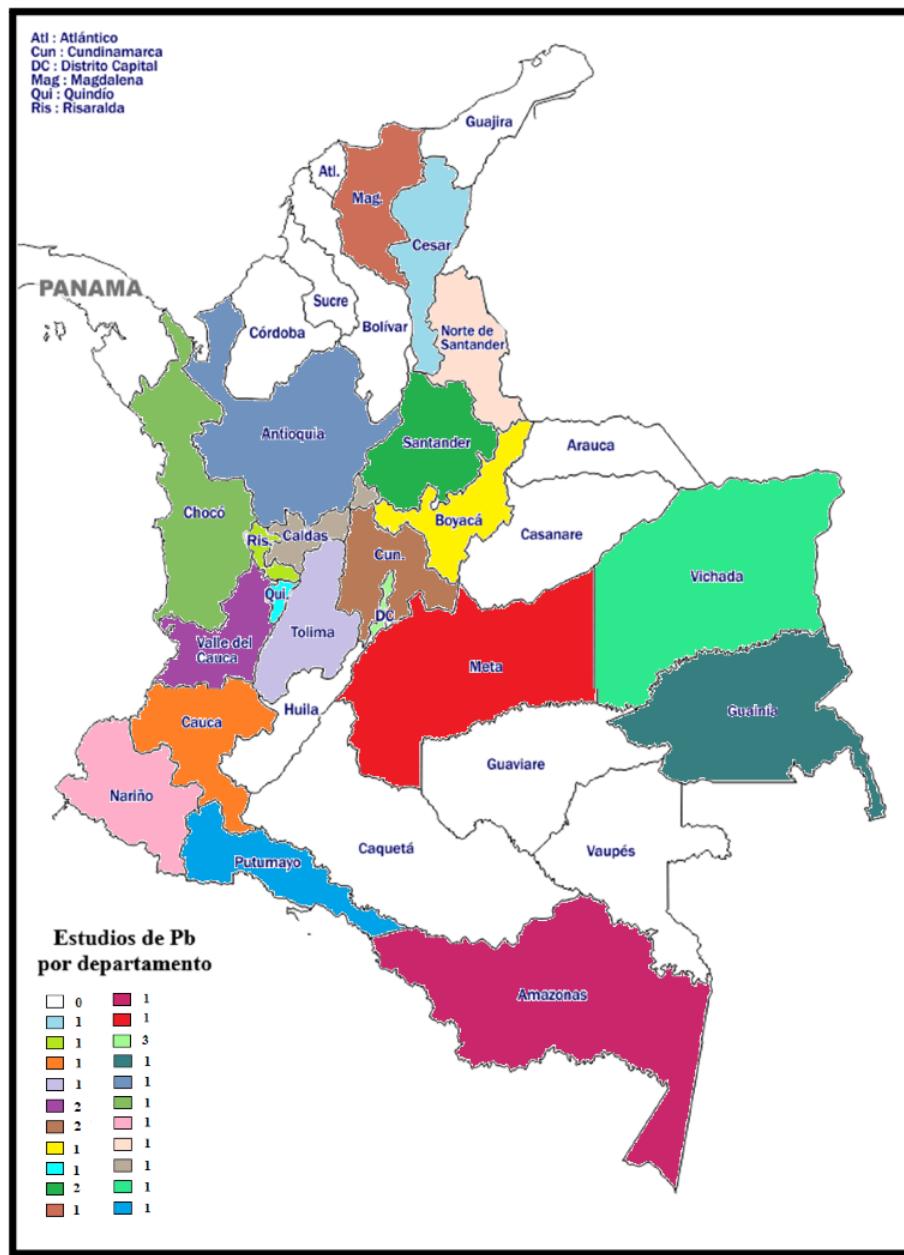


Figura 2. Casos por departamento contaminación por plomo en alimentos. Muestra los casos analizados para determinar las zonas afectadas del país por plomo en alimentos

Fuente: elaborado a partir de la revisión de información reportada en las bases de datos consultadas.

En la Figura 2 se evidencian las áreas afectadas por la contaminación de alimentos con plomo en varios departamentos de Colombia. Los casos analizados fueron obtenidos mediante una revisión sistemática de la información recopilada de bases de datos consultadas. Este proceso permitió identificar regiones específicas del país donde se han registrado problemas de contaminación con este metal pesado en alimentos, en consonancia con lo reportado por Hernández-Rodríguez (2021), al establecer que el plomo está ampliamente distribuido en el territorio colombiano y que más del 70% de los casos reportados en alimentos sobrepasan los límites establecidos por la normatividad. Díaz *et al.* (2024) han establecido la presencia de Pb en el suelo del corredor industrial de Boyacá (Colombia), un suelo expuesto a actividades industriales y agrícolas, donde se presenta un uso excesivo de productos químicos para promover el crecimiento de los cultivos. Estas actividades generan un alto impacto negativo en los suelos urbanos y rurales, contribuyendo al aumento de las concentraciones de Pb en el ambiente.

Estos resultados proporcionan una visión crítica sobre la extensión y gravedad de dicha problemática en Colombia, suministrando información útil para abordar y mitigar de manera efectiva esta preocupación en términos de salud pública.

Efecto contaminante y toxicológico del plomo presente en los alimentos

A continuación, se describen los impactos y efectos del plomo en los seres humanos,

así como el mecanismo de toxicidad y su toxicocinética:

Impactos y efectos del plomo en los seres humanos

Entre los impactos y efectos reportados en la información revisada se presenta:

- Según la Unicef (2020), hasta 800 millones de niños a nivel mundial, aproximadamente 1 de cada 3, tienen niveles de plomo iguales o superiores a 5 µg/dL en la sangre, lo que requiere intervención médica. La mitad de estos niños reside en Asia meridional.
- El plomo es una neurotoxina potente que puede causar daños irreparables en el cerebro de los niños, así como repercusiones duraderas en adultos, como hipertensión arterial (Chowdhury y Alam, 2024) y lesiones renales. También puede provocar abortos, partos prematuros y malformaciones en embarazadas.
- Los niños menores de cinco años son especialmente vulnerables debido a que sus cerebros aún están en desarrollo, lo que puede llevar a deterioro neurológico, cognitivo y físico de por vida.
- La exposición al plomo puede provenir de diversas fuentes como el agua contaminada por tuberías de plomo, actividades industriales, pintura a base de plomo y reciclaje inseguro de baterías de plomo-ácido.
- En Colombia, se encontró que más del 7% de los niños en edad escolar presentan concentraciones elevadas de plomo en la

sangre, especialmente en estratos bajos debido a prácticas de reciclaje inseguro.

Mecanismo de toxicidad del plomo

- El principal mecanismo de toxicidad del plomo es la suplantación de cationes polivalentes, como calcio y zinc, en las proteínas del organismo, lo que afecta a múltiples procesos biológicos.
- El plomo altera el metabolismo del calcio, reemplazando al calcio y comportándose como un segundo mensajero intracelular. También activa enzimas y proteínas reguladoras, afectando la función celular y nerviosa.

Toxicocinética del plomo

- El plomo puede ser absorbido por inhalación, ingestión y, en menor medida, absorción percutánea.
- La absorción de plomo se ve afectada por factores como el tipo de plomo, tránsito gastrointestinal, estado nutricional, tamaño de partículas, hábitos alimenticios y edad.

- Despues de la absorción, el plomo se distribuye en tejidos como hígado, riñón y sistema nervioso central, y también se almacena en el sistema óseo.
- El plomo almacenado en el hueso puede ser liberado y excretado, principalmente a través de la orina. La exposición continua por medio de alimentos representa un alto riesgo para la salud.

Matriz de identificación y valoración de impactos ambientales

- Un proyecto minero involucra varias fases, desde exploración hasta cierre, cada una con actividades específicas como exploración, remoción de vegetación, excavaciones, extracción mineral, entre otras.

A partir de la identificación de los impactos mencionados, se realizó una evaluación de su significancia que determinó los que necesitaban ser atendidos con prioridad. Esta valoración, se presenta en la siguiente matriz (Tabla 3) que categoriza los impactos en función de su magnitud: Irrelevante (< -25), Moderado (-25 a <-50), Severo (-50 a -75) y Crítico (> -75).

Tabla 3.

Matriz de evaluación de impactos socioambientales proyecto minero

		Componentes del entorno		Impactos		CA	MG	EXT	DUR	REV	REC	PE	TD	TP	PO	MP	Calificación Importancia	Promedio IMP
Biótico	Agua	Hidrología		Caudales	Disponibilidad de agua	-1	4	8	8	12	12	1	2	1	1	-65	Severo	-63
		Dinámica fluvial			Variación en los cauces y caudales de los ríos y quebradas	-1	4	8	4	12	12	1	2	1	1	-61	Severo	
		Usos agua		Restricción de usos	-1	8	8	8	8	8	8	1	2	8	-83	Crítico	-84	
		Calidad físicoquímica		Alteración de la calidad físicoquímica por plomo	-1	8	8	8	8	8	8	2	2	8	-84	Crítico		
		Calidad bacteriológica		Alteración de la calidad bacteriológica	-1	8	8	8	8	8	8	2	2	8	-84	Crítico		
	Hidrogeología	Calidad físicoquímica aguas subterráneas		Alteración en propiedades físicoquímicas y bacteriológica del agua subterránea	-1	1	8	8	12	12	4	2	1	1	-59	Severo	-50	
		Nivel freático		Contaminación de las aguas subterráneas al sobrepasarse el nivel freático en las excavaciones	-1	1	4	4	12	12	4	1	1	1	-46	Moderado		
		Capacidad de infiltración		Cambio en la capacidad de infiltración	-1	1	1	4	12	12	4	2	1	4	-44	Moderado		
	Suelo	Calidad físicoquímica		Alteración de la calidad físicoquímica por plomo	-1	1	8	8	12	12	4	2	1	1	-59	Severo	-53	
		Usos del suelo		Agricultura	-1	1	8	4	12	12	4	1	1	1	-54	Severo		
		Paisajismo		Paisajismo	-1	1	4	4	12	12	4	1	1	1	-46	Moderado		

Abiótico	Fauna	Especies	Cambio en la presencia y cantidad	-1	8	8	8	8	8	12	2	2	8	-88	Crítico	-72
		Hábitat	Cambio en el estado del hábitat	-1	8	8	8	8	8	12	2	2	8	-88	Crítico	
		Dinámica de la población	Cambio en la dinámica de la población	-1	4	1	4	4	4	4	2	1	8	-41	Moderado	
Socioeconómico	Dimensión demográfica	Salud de la población	Afectación a la salud por inhalación de plomo, contacto directo en la piel y consumo de alimentos contaminados	-1	4	8	12	12	12	8	2	2	8	-84	Crítico	-84

Fuente: autores.

Estas actividades pueden tener impactos socioambientales significativos, como la degradación del suelo, contaminación del agua y aire, alteración de ecosistemas y afectación de la salud de las comunidades locales.

La actividad minera conlleva a la contaminación por plomo de recursos naturales como el suelo, y además se distribuye por medio del polvo a los hogares y al agua potable (Raj y Das, 2023). El Pb está reconocido como cancerígeno para los seres humanos (Kumar *et al.*, 2022; Caicedo-Rivas, 2023; Kandhro *et al.*, 2023; Chowdhury y Alam, 2024), y con varios riesgos para la salud (Collin *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022; Abd *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024, Hettiarachchi *et al.*, 2024).

Se espera que la producción mundial de plomo aumente debido al incremento de la fabricación de productos que contienen

este metal (automóviles y baterías de teléfonos móviles). También por la industria de alimentos enlatados, siendo esta una de las principales causas de la afectación en la salud por consumo de plomo, debido a las características de lixiviación de estos alimentos (Raj y Das, 2023). Adicionalmente, es importante considerar que la biodisponibilidad y bioaccesibilidad del Pb absorbido por la ingestión de alimentos, en conjunto con otros metales pesados, tiene un impacto determinante en el riesgo para la salud (Xiao, 2024).

Tecnologías para reducir la contaminación de plomo en alimentos en Colombia

Las tecnologías utilizadas para eliminar plomo y metales pesados en agua y suelo se

presentan en las tablas 4 y 5, y además en los anexos A, B, C, D, E, F, G y H. Estas tecnologías están enfocadas en mitigar la dispersión

de plomo en la cadena alimentaria y su impacto en la producción de alimentos.

Tabla 4.

Tecnologías aplicadas para remoción de plomo. Estudio 1

Ficha de evaluación tecnología	
Título del estudio:	Tratamiento de un suelo contaminado con escorias de plomo mediante las técnicas de lavado y encapsulamiento
Autor o Autores:	Ing. Ortiz, T.
Nombre de la tecnología o técnica:	
Técnicas de lavado y encapsulamiento	
Tipo de estudio:	Tesis de maestría
Descripción de la tecnología o técnica:	
En este proyecto se evaluaron dos métodos para tratar suelo contaminado con escorias de plomo: lavado y encapsulamiento. El método de lavado involucró la extracción del suelo y su procesamiento con ácido clorhídrico-goma xantana, logrando remover el 92% del plomo. La técnica de encapsulamiento estabilizó el plomo y luego lo encapsuló en el suelo. Ambos métodos inmovilizaron el 99% del plomo y produjeron bloques ecológicos con una resistencia mucho mayor al límite normativo. Sin embargo, la técnica de encapsulamiento resultó más viable en términos de costo y efectividad, con un 99% de eliminación de plomo. Estas técnicas ofrecen ventajas al evitar la necesidad de confinamiento en vertederos de residuos y permiten su uso en la construcción de rellenos sanitarios.	
Criterios de evaluación	
Criterio	Puntaje
Facilidad de implementación	5
% Eficiencia	5
Costos	4
Generación de residuos	5
Aporte ambiental	5
TOTAL	4.8

Se muestra las técnicas de lavado y encapsulamiento para la remoción de plomo en suelos

Fuente: autores.

Tabla 5.

Tecnologías aplicadas para remoción de plomo. Estudio 2

Ficha de evaluación tecnología	
Título del estudio:	Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost.
Autor o Autores:	Munive, R.; Gamarra, G.; Munive , Y.; Puertas, F.; Valdiviezo ,L.; Cabello, R.
Nombre de la tecnología o técnica:	
Técnicas de fitorecuperación con adición de enmiendas	
Tipo de estudio:	Artículo de revista
Descripción de la tecnología o técnica:	
La fitorecuperación es una técnica moderna que utiliza plantas capaces de sobrevivir en suelos contaminados con plomo y otros metales pesados. En este proyecto, se emplea el girasol como planta fitorremediadora, aprovechando su capacidad de retener y extraer el plomo a través de su sistema de raíces y tejidos. Para mejorar las condiciones del suelo, se usan compost y vermicompost como enmiendas orgánicas y agentes quelantes. Esta técnica es natural, económica y alternativa a procesos químicos costosos. Sin embargo, su principal desventaja es que puede requerir tiempo para lograr un crecimiento vegetal significativo y una descontaminación efectiva.	
Criterios de evaluación	
Criterio	Puntaje
Facilidad de implementación	5
% Eficiencia	3.5
Costos	5
Generación de residuos	5
Aporte ambiental	3.5
TOTAL	4.4

Se muestra las técnicas electrocinéticas para la remoción de plomo en suelos

Fuente: autores.

Las fichas técnicas presentadas previamente representan tecnologías destinadas a la recuperación de recursos naturales que han sido contaminados por plomo y otros agentes contaminantes. Estas se emplean en situaciones de contaminación natural o como respuesta a la intervención humana como la minería, el vertimiento de residuos, entre otras actividades. Es importante resaltar, como lo

menciona Elika (2021), que una vez que el plomo se acumula en animales y vegetales, no se puede eliminar de manera efectiva para su consumo. Por lo tanto, la medida principal para reducir la exposición al plomo en la dieta de los colombianos consiste en la preventión y el tratamiento de áreas.

Esta razón fundamenta la relación directa entre las tecnologías presentadas y el trata-

miento de suelos y agua, ya que son elementos críticos en la producción de alimentos y en la obtención de nutrientes para los animales. Este enfoque busca prevenir la contaminación por plomo a lo largo de la cadena alimentaria, evitando su paso a los seres humanos.

La investigación se orientó en abordar diversas tecnologías utilizadas para la descontaminación provocada por la presencia de plomo, considerando factores como la facilidad de implementación, el impacto ambiental y los costos asociados. El objetivo era convertir estas tecnologías en soluciones reales en el país, mejorando la calidad de los alimentos que llegan a los hogares colombianos. En este sentido,

destacan tecnologías como la fitorrecuperación y la biorremediación, que en conjunto demuestran la capacidad de generar resultados positivos. Además, su costo es bastante asequible y su implementación resulta sencilla y efectiva. Particularmente se han identificado diferentes tipos de cepas bacterianas para la biorremediación del plomo, como la *Rhodobacter sphaeroides*, que cambia el plomo a formas menos letales. *Leclercia adecarboxylata* tiene capacidad de absorber plomo. En contraste, *Kocuria flava* disminuye la disponibilidad de plomo en el suelo por medio de la quelación. Además, cepas de hongos como *Metarrhizium anisopliae* y *Paecilomyces javanicus* contribuyen en el proceso de remediación (Raj y Das, 2023).

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a través de la revisión sistemática de casos de contaminación por plomo en alimentos en varios departamentos de Colombia, aproximadamente el 70% evidencian la amplia distribución y gravedad de este problema en el país. La contaminación por plomo se presenta en alimentos como arroz, panela, papas, leche y carne de bovino, fresas y alimentos para bebés. Se expuso que el plomo en alimentos proviene principalmente de los suelos contaminados y del uso de aguas para riego con presencia de este metal, especialmente en zonas con actividades industriales y agrícolas intensivas.

Las fuentes reportadas de contaminación por plomo en Colombia fueron la minería, pesticidas y fertilizantes al igual que décadas de uso de gasolina con plomo. El agua de riego utilizada en la agricultura también puede ser una fuente importante de contaminación por plomo, especialmente en zonas donde se utilizan aguas superficiales contaminadas. El reciclaje informal de baterías de plomo-ácido es otra fuente crítica de contaminación, ya que el proceso no controlado y sin medidas de protección adecuadas libera plomo al aire, el suelo y el agua circundantes. En conjunto, estas fuentes de contaminación por plomo destacan la necesidad urgente de abordar este problema de manera integral, implementando medidas de prevención,

control y remediación para proteger la salud humana y preservar el medio ambiente en Colombia.

Las consecuencias de la exposición continua al plomo son graves, especialmente cuando es a través de la dieta, ya que el plomo puede persistir en los huesos durante más de 30 años, desarrollar cáncer y producir daño cognitivo, entre otros riesgos a la salud. La prevención es clave, involucrando prácticas de higiene, adecuada asepsia de alimentos, lavado de manos y entornos de vida limpios. Aunque grupos como bebés, niños y mujeres embarazadas enfrentan una mayor vulnerabilidad debido a sus sistemas de salud en desarrollo, todos estamos en peligro. La falta de certeza completa sobre los efectos neurotóxicos de niveles de plomo en sangre agrega otra capa de complejidad.

Las tecnologías para prevenir la ingestión de plomo en alimentos radican en el tratamiento de suelos y fuentes de agua contaminados, ya que los productos con plomo no pueden ser limpiados eficazmente una vez contaminados. Además, existen múltiples opciones viables y de bajo costo que pueden ser combinadas para lograr un tratamiento más eficaz. Es crucial continuar con inves-

tigaciones que actualicen los conocimientos sobre los efectos del plomo en la salud humana y las estrategias tecnológicas para tratar la contaminación en diferentes zonas del país.

La realización de proyectos de tratamiento para la contaminación por plomo en diversas zonas del país permitirá medir la efectividad de diferentes tecnologías, incluyendo la fitorrecuperación, biorremediatión y el uso de barreras permeables, que pueden ser combinadas para maximizar resultados. En resumen, es importante continuar investigando, concientizando y aplicando estrategias para abordar el problema de la contaminación por plomo en alimentos y proteger la salud de la población y el medio ambiente.

Generar conciencia ambiental es fundamental para garantizar el cumplimiento de normativas por parte de empresas, especialmente en la gestión de desechos como las baterías de plomo-ácido que requieren un adecuado reciclaje. Campañas que refuerzen prácticas de higiene y lavado de alimentos también son esenciales para reducir los riesgos de la ingesta de plomo. Además, se debe considerar el reemplazo de tuberías metálicas con alternativas de plástico o PVC para mitigar el riesgo de contaminación.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Luz Adriana Vargas Mendoza: metodología, investigación, recolección, conceptualización, análisis e interpretación de información, escritura, borrador original.

María Eugenia Buitrago González: supervisión, revisión y edición. **Luis Carlos Villegas Méndez:** supervisión, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Central del Valle del Cauca, en donde se llevó a cabo el proyecto “Formulación de estrategias para la mitiga-

ción de los efectos de la contaminación e intoxicación con plomo en los alimentos en Colombia”.

FINANCIAMIENTO

Unidad Central del Valle del Cauca (UCEVA).

LITERATURA CITADA

Abd, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Al-horiény, N. A., Abd Elaty, A. E., Elgendi, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., & Mahmoud, Y. A. (2023). Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>

Alhaj, Y., Shaghaleh, H., Zia-ur-Rehman, M., Rizwan, M., Umair, M., Usman, M., Ashar Ayub, M., Riaz, U., Alnusairi, G.S.H., Suliman Alghanem, S.M. (2024). Cadmium and lead accumulation in important food crops due to wastewater irrigation: Pollution index and health risks assessment. *Heliyon*, 10(3), e24712. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24712>

Augustsson, A., Lundgren, M., Qvarforth, A., Hough, R., Engström, E., Paulukat, C., & Rodushkin, I. (2023). Managing health

risks in urban agriculture: The effect of vegetable washing for reducing exposure to metal contaminants. *Science of The Total Environment*, 863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160996>

Azcona, M. I., Ramírez y Ayala, R., y Vicente-Flores, G. (2015). Efectos tóxicos del plomo. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 20(1), 72-77. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47345916012>

Caicedo-Rivas, G., Salas-Moreno, M., & Marrugo-Negrete, J. (2022). Health Risk Assessment for Human Exposure to Heavy Metals via Food Consumption in Inhabitants of Middle Basin of the Atrato River in the Colombian Pacific. *International journal of environmental research and public health*, 20(1), 435. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010435>

Calao, C. R., y Marrugo, J. L. (2015). Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de

La Mojana, Colombia. *Revista Biomédica*, XXXV(2), 139-151. <https://www.redalyc.org/pdf/843/84340725015.pdf>

Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Fuentes de María-Torres, M. T., Silva-Morales S. S., González-Juárez, F. E. (2021). Heavy metals in blood, milk and cow's urine reared in irrigated areas with wastewater. *Heliyon*, 7(4), e06693. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06693>

Castro, N., Moreno, R., Calderón, F., Moreno, A., y Tamariz, J. (2018). Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlazcala. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, IX(3), 466-485. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v9n3/2448-6698-rmcp-9-03-466.pdf>

Chowdhury, A. I., & Alam, M. R. (2024). Health effects of heavy metals in meat and poultry consumption in Noakhali, Bangladesh. *Toxicology reports*, 12, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.01.008>

Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Sibiya Stacey, R. G., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>

Díaz A. J., Fonseca A. P., Vergara G. I., Díaz L. M., Videira-Quintela D., Montalvo, G. (2024). Assessment of potentially haz-

ardous elements in soils of the Boyacá industrial corridor (Colombia) using GIS, multivariate statistical analysis, and geochemical indexes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115725>.

Díaz, S. M., Téllez, E., Palma, R. M., Narváez, D. M., y Varona, M. (2022). Evaluación de la exposición a plomo en trabajadores informales colombianos que reciclan baterías. *Revista Salud Ambiental*, 22(1), 35-43. <https://ojs.diffundit.com/index.php>

Elika. (2021). *Plomo*. <https://seguridadalimentaria.elika.eus/fichas-de-peligros/plomo/#exposicion>

Figueroa, R., Caicedo, D., Echeverry, G., Peña, M., y Méndez, F. (2017). Condición socioeconómica, patrones de alimentación y exposición a metales pesados en mujeres en edad fértil de Cali, Colombia. *Revista Biomédica*, XXXVII(3), 341-352. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/843/84354827008/84354827008.pdf>

Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (UNICEF). (2020). *Un tercio de los niños del mundo está intoxicado por plomo, según un nuevo análisis innovador*. UNICEF. <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/un-tercio-de-los-ni%C3%B1os-del-mundo-est%C3%A1-intoxicado-por-plomo-seg%C3%BAn-un-nuevo>

García, C., Villada, L. A., y Robayo, J. (2018). Evaluación de la adaptación de *Helianthus annuus* en asocio con hongos micorrízicos en suelos contaminados con plomo.

Revista Cuaderno Activa, 10(1), 93-111.
<https://doi.org/10.53995/20278101.497>

García, D., Lima, L., Ruiz, L., Santana, J., y Calderon, P. (2016). Agroecosistemas con probables riesgos a la salud por contaminación con metales pesados. *Revista Cubana de Química, XXVIII*(1), 378-393.

Guanoliquín, C. D. (2021). *Estudio bibliográfico sobre la presencia de metales pesados arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en pollos de engorde (Gallus gallus)*. UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24718>

Hassan, J., Rajib, M. M. R., Khan, M. N., Khandaker, S., Zubayer, M., Ashab, K. R., Kuba, T., Marwani, H. M., Asiri, A. M., Hasan, M. M., Islam, A., Rahman, M. M., & Awual, M. R. (2024). Assessment of heavy metals accumulation by vegetables irrigated with different stages of textile wastewater for evaluation of food and health risk. *Journal of environmental management, 353*, 120206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120206>

Hernández, C. B., Gutiérrez-Malaxechebarria, A. M., & Zafra Mejía, C. A. (2021). Reported Lead Levels in Different Environmental Matrices in Colombia. *Ingeniería Y Universidad, 25*. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued25.rlld>

Hettiarachchi, G. M., Betts, A. R., Chandima Wekumbura, W.G., Lake, L., Mayer, M. M., Scheckel, K. G., Basta, N. T. (2024). Chapter 6 - Lead: The most extensively spread toxic environmental contaminant. En R. Naidu (Ed.), *Inorganic Contaminants and Radionuclides* (113-150).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90400-1.00006-9>

Hon, K. L., Fung, C. K., & Leung, A. K. (2017). Childhood lead poisoning: an overview. *Hong Kong medical journal, 23*(6), 616-621. <https://doi.org/10.12809/hkmj176214>

Ikechukwu N. J., Clarke, L. J., Symeonakis, E., & Brearley, F. Q. (2022). Assessment of human exposure to food crops contaminated with lead and cadmium in Owerri, South-eastern Nigeria. *Journal of Trace Elements and Minerals, 2*. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100037>

Kandhro, F., Kazi, T. G., Afridi, H. I., Baig, J. A., Lashari, A. A., & Lashari, A. (2023). Determination of toxic elemental levels in whey milk of different cattle and human using an innovative digestion method: risk assessment for children < 6.0 months to 5 years. *Environmental science and pollution research international, 30*(14), 41923–41936. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25059-1>

Khanam, R., Kumar, A., Nayak, A. K., Shahid, M., Tripathi, R., Vijayakumar, S., . . . Pathak, H. (2020). Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health. *Science of The Total Environment, 699*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134330>

Kumar, S., Rahman, A., Islam, R., Hashem, A., Mahmudur Rahman, M. (2022). Lead and other elements-based pollution in soil, crops and water near a lead-acid battery recycling factory in Bangladesh.

Chemosphere, 290, 133288. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133288>

Lizarazo, M. F., Herrera, C. D., Celis, C. A., Pombo, L. M., Teherán, A. A., Piñeros, L. G., . . . Rodríguez, O. E. (2020). Contamination of staple crops by heavy metals in Sibaté, Colombia. *Helijon*, 6(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04212>

Liu, M., Xu, R., Cui, X., Hou, D., Zhao, P., Cheng, Y., Qi, Y., Duan, G., Fan, G., Lin, A., Tan, X., Xiao, Y. (2024). Effects of remediation agents on rice and soil in toxic metal(loid)s contaminated paddy fields: A global meta-analysis, *Science of The Total Environment*, 925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171656>.

Londoño, L., Londoño, P. T., y Muñoz, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Revista Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 145-153. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017&lng=en&nrm=iso&tlang=es

Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). *Definición del problema para el Análisis de Impacto Normativo para la definición del contenido de plomo en pinturas*. [https://www.minsalud.gov.co/Normativa/PublishingImages/Paginas/analisis-de-impacto-normativo/AIN%20Pinturas-%20Problematica%20\(12-abr-2021\).pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normativa/PublishingImages/Paginas/analisis-de-impacto-normativo/AIN%20Pinturas-%20Problematica%20(12-abr-2021).pdf)

Narváez, M. E., Pozo, C. E., y Alonso, O. M. (2020). Intoxicación por plomo y efectos neurocomportamentales en la asociación de carpinteros ciudad de

Tulcán, 2018. *Revista Universidad y Sociedad*, XII(5), 431-437. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000500431

Organización Mundial de la Salud. (OMS). (2022). *Intoxicación por plomo y salud*. OMS. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Ortiz, J. P. (2023). Detección de plomo en alimentos preparados en utensilios de barro vidriado, un peligro latente para la salud pública. *Salud Pública de México*, 65(1), 106-107. <https://doi.org/10.21149/14190>

Özbay, S., Dikici, E., Soylukan, C. (2023). Evaluation of biological (feed, water), seasonal, and geological factors affecting the heavy metal content of raw milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 121, 105401. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105401>

Peláez, M., Bustamante, J., y Gómez, E. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena medio colombiano. *Revista Luna Azul*, 43, 82-101. <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321745921005.pdf>

Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., Xiang, P. (2021). Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere*, 267, 129205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>

Rachmawati, S., Candraningtyas, C., Hanggara C., Fadhilah, R., Muazulfa, T., Fer-

- managh., Suryadi, I. (2024). Analysis of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) heavy metals in cow's milk in Central Java, Indonesia. *IOP Conference Series.: Earth Environmental Science*, 1314, 012005 DOI 10.1088/1755-1315/1314/1/012005
- Raj, K. and Das, A. P. (2023). Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 79–85. 10.1016/j.enceco.2023.02.001.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., y González, E. (2016). Contaminación por metales pesados. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, XVI(2), 66-77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rivera, K., y Pernia, B. (2021). Determinación de los niveles de plomo en sangre en trabajadores de fábricas de baterías ubicadas en Guayaquil-Ecuador. *Enfoque UTE*, 12(2), 1-18. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-65422021000200001&script=sci_arttext
- Rodríguez, A., Cuellar, L., Maldonado, G., y Suardiaz, M. E. (2016). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, XXXV(3), 251-271. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubinvbio/cib-2016/cib163f.pdf>
- Romero, B. (2020). *Contaminación por metales pesados en alimentos en Ecuador Meta-Análisis*. [Trabajo de grado]. Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/48744/1/TESIS%20EM-PASTAR.PDF>
- Salas, M., Garduño, M., Mendiola, P., Veneces, J., Zetina, V., Martínez, O. C., y Ramos, M. (2019). Fuentes de contaminación por plomo en alimentos, efectos en la salud y estrategias de prevención. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, XX(1). <https://www.redalyc.org/journal/813/81359562002/81359562002.pdf>
- Su, C., Wang, J., Chen, Z., Meng, J., Yin, G., Zhou, Y., & Wang, T. (2023). Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China. *Science of The Total Environment*, 857(1). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159389>
- Tadese, A., Salale, G., & Regassa, G. (2024). Assessment of essential and potentially toxic metals in raw cow milk from Mukakuri town, Oromia Regional State, Ethiopia. *Science of The Total Environment*, 926, 171987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171987>
- Vega, L. T., y Vega, D. A. (2021). Contenidos de plomo en hortalizas cultivadas en huertos urbanos de la ciudad de Bogotá, Colombia. *Idesia (Arica)*, 129-137. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292021000400129&script=sci_arttext&tlang=pt
- Vergara, E. J., y Rodríguez, P. E. (2015). Presencia de mercurio, plomo y cobre en tejidos de *Orechromis niloticus*: sector de la cuenca alta del Rio Chicamocha, vereda Volcán, Paipa, Colombia. *Revis-*

ta Producción + limpia, 114-126. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bits-tream/10567/1433/1/902-2580-1-PB.pdf>

Vitola, D., Pérez, A., y Montes, D. (2022). Utilización de microalgas como alternativa para la remoción de metales pesados. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 195-203. <https://doi.org/10.22490/21456453.4568>

Xiao, W., Yang, Y., Tang, N., Huang, X., Zhang, Q., Zhao, S., Chen, D., Guo, B., Zhao, Z., Jiang, Y., & Ye, X. (2024). Innovative accumulative risk assessment of co-exposure to Cd, As, and Pb in contaminated rice based on their in vivo bioavailability and in vitro bioaccessibility. *The Science of the total environment*, 912, 168922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168922>

Yang, Y., Zhang, H., Qiu, S., Sooranna, S. R., Deng, X., Qu, X., Yin, W., Chen, Q., & Niu, B. (2022). Risk assessment and early warning of the presence of heavy metal pollution in strawberries. *Ecotox-*

icology and environmental safety, 243, 114001. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114001>

Zambrano, D. C. (2020). *Detección de contaminación por plomo en el chocolate en polvo de venta en la ciudad de Guayaquil-Ecuador*. [Trabajo de grado]. Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48749>

Zapata, Y. L., Trujillo, J. M., y Torres, M. A. (2018). Distribución espacial del plomo (Pb) en el municipio de Villavicencio usando briófitos como medio de verificación de la calidad ambiental urbana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 269–280. <https://doi.org/10.22490/21456453.2167>

Zuraw, L. (20 de 06 de 2017). Detectan plomo en 20% de muestras de alimento para bebés. *CNN Español*. <https://cnnespanol.cnn.com/2017/06/20/detectan-plomo-en-20-de-muestras-de-alimento-para-bebes/>

■ **Conflictos de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y FOSFATOS EN EL RÍO CESAR ENTRE ZAMBRANO (LA GUAJIRA) Y LAS PITILLAS (CESAR)

NITRATES AND PHOSPHATES CONCENTRATION IN THE CESAR RIVER BETWEEN ZAMBRANO (LA GUAJIRA) AND LAS PITILLAS (CESAR)

Jean Carlos Ospino-Jiménez¹

María I. Téllez Luna²

Yessica L. Perdomo Useche³

Néstor F. Plata⁴

Javier G. Gómez⁵

¹ Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. jcarlosospino@unicesar.edu.co

² Magíster en Gestión Ambiental, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia. mtellez10@estudiantes.areandina.edu.co

³ Magíster en Gestión Ambiental, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia. yperdomo11@areandina.edu.co

⁴ Maestría en Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. nestor.plata@upb.edu.co

⁵ PhD. Química, Universidad Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil. javiergomezg@unicesar.edu.co

Citación: Ospino-Jiménez, J., Téllez, M., Perdomo, Y., Plata, N. y Gómez, J. (2025). Concentración de nitratos y fosfatos en el río Cesar entre Zambrano (La Guajira) y Las Pitillas (Cesar). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 281 - 297.

<https://doi.org/10.22490/21456453.7820>

RESUMEN

Contextualización: las actividades antrógenicas influyen en el ciclo de nitrógeno y fósforo en aguas superficiales, siendo un problema ambiental significativo.

Vacío de conocimiento: en la actualidad, no existen investigaciones que aborden el estudio de los iones de NO_3^- (Nitratos) y PO_4^{3-} (Fosfatos) mediante métodos espectrofotométricos en la cuenca del río Cesar (Colombia).

Propósito: esta investigación estudió las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} en el río Cesar, entre Zambrano y Las Pitillas, durante estaciones lluviosas (septiembre 2022) y seca (enero 2023), en zonas con actividades de pastoreo, agrícolas y domésticas, para evaluar el Índice de Contaminación por Nutrientes (NPI).

Metodología: se utilizaron métodos espectrofotométricos para detección de NO_3^- y PO_4^{3-} .

Resultados y conclusiones: la concentración de NO_3^- osciló entre $0.460 \pm 0.044 \text{ mg.L}^{-1}$ en San Juan y $1.182 \pm 0.032 \text{ mg.L}^{-1}$ en Salguero en la estación lluviosa, mientras que la estación seca fluctuó entre $0.936 \pm 0.151 \text{ mg.L}^{-1}$ en Zambrano y $1.865 \pm 0.150 \text{ mg.L}^{-1}$ en Las Pitillas. En cuanto a PO_4^{3-} , los valores oscilaron entre $1.514 \pm 0.022 \text{ mg.L}^{-1}$ en San Juan y $2.739 \pm 0.022 \text{ mg.L}^{-1}$ en Salguero en la estación lluviosa, mientras que la estación seca varió entre $2.405 \pm 0.156 \text{ mg.L}^{-1}$ en San Juan y $5.553 \pm 0.143 \text{ mg.L}^{-1}$ en Salguero. Comparando con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS y WHO, 2004), solo en Salguero ($5.553 \pm 0.143 \text{ mg.L}^{-1}$) superó el valor permisible para PO_4^{3-} durante la estación seca. Finalmente, El NPI indicó una contaminación moderada en Salguero en la estación seca.

Palabras clave: cuenca fluvial, espectroscopía, eutroficación, iones

ABSTRACT

Contextualization: Anthropogenic activities influence the nitrogen and phosphorus cycle in surface waters, being a significant environmental problem.

Knowledge gap: At present, there is no research that addresses the study of NO_3^-

(Nitrates) and PO_4^{3-} (Phosphates) ions by spectrophotometric methods in the Cesar River basin (Colombia).

Purpose: This research studied the concentrations of NO_3^- and PO_4^{3-} in the Cesar River, between Zambrano and Las Pitillas,

during rainy (September 2022) and dry (January 2023) seasons, in areas with grazing, agricultural and domestic activities, to evaluate the Nutrient Pollution Index (NPI).

Methodology: Spectrophotometric methods were used to detect NO_3^- and PO_4^{3-} .

Results and conclusions: NO_3^- concentration ranged between $0.460 \pm 0.044 \text{ mg.L}^{-1}$ at San Juan and $1.182 \pm 0.032 \text{ mg.L}^{-1}$ at Salguero in the rainy season, while in the dry season it fluctuated between $0.936 \pm 0.151 \text{ mg.L}^{-1}$ at Zambrano and $1.865 \pm 0.150 \text{ mg.L}^{-1}$ at Las Pitillas.

As for PO_4^{3-} , values ranged between $1.514 \pm 0.022 \text{ mg.L}^{-1}$ at San Juan and $2.739 \pm 0.022 \text{ mg.L}^{-1}$ at Salguero in the rainy season, while the dry season ranged between $2.405 \pm 0.156 \text{ mg L}^{-1}$ in San Juan and $5.553 \pm 0.143 \text{ mg.L}^{-1}$ in Salguero. Compared with the limits established by the World Health Organization (WHO, 2004), only in Salguero ($5.553 \pm 0.143 \text{ mg.L}^{-1}$) exceeded the permissible value for PO_4^{3-} during the dry season. Finally, the NPI indicated moderate pollution in Salguero during the dry season.

Keywords: eutrophication, ions, river basin, spectroscopy

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo humano ha sido frecuentemente asociado a impactos negativos sobre el medioambiente, especialmente en el agua (Salgot y Folch, 2018). Los contaminantes del agua son variados, aunque los más comunes corresponden por ejemplo a contaminantes orgánicos e inorgánicos (NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- , NH_3^- , HTP, HAP, BTEX, AOX), (De Girolamo *et al.*, 2019), iones de metales pesados, metaloides tóxicos o compuestos químicos orgánicos sintéticos (Braun *et al.*, 2019).

En el caso particular de los nitratos y fosfatos, diversas fuentes puntuales o difusas contribuyen al incremento de las concentraciones de los mismos en aguas superficiales, como pueden ser la agricultura intensiva y los vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y ganaderas (Soro *et al.*, 2023; Priya *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2020; Bhateria y Jain, 2016). Estos fenómenos ocasionan una severa degradación de la calidad del agua, provocando el crecimiento excesivo de plantas acuáticas y floraciones de algas (Vu *et al.*, 2019), situación que conlleva a una disminución en la concentración de oxígeno disuelto en el agua, generando condiciones de anoxia e hipoxia, las cuales puede ocasionar la asfixia y muerte de organismos acuáticos (Soro *et al.*, 2023).

El río Cesar constituye una fuente vital de agua dulce en los territorios de los departamentos del Cesar y La Guajira (Colombia). Recibe en su cauce, afluentes con descargas de naturaleza doméstica (Oñate y Cortez, 2020) e industriales, procedentes de actividades como minería, agricultura y ganadería, dando lugar a la degradación de la calidad del agua (Madera *et al.*, 2016). Oñate y Madera utilizaron macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la contaminación del río Cesar, evidenciando una baja calidad del agua en ciertos tramos debido a actividades antropogénicas (Oñate y Cortez, 2020; Madera *et al.*, 2016), sin embargo, no existe información que refiera al estudio de la concentración NO_3^- y PO_4^{3-} del río Cesar empleando métodos espectrofotométricos.

El objetivo de esta investigación fue determinar las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} en el río Cesar, entre Zambrano (La Guajira) y Las Pitillas (Cesar), usando métodos espectrofotométricos como metodología para evaluar el NPI. Se compararon los resultados obtenidos con los límites establecidos por la OMS (2004) para estos iones en aguas superficiales.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Cesar, según la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR), citado por Guzmán (2013), nace en las estribaciones surorientales de la Sierra Nevada de Santa Marta, delimitada por el valle del río Ariguaní y la Serranía del Perijá, culminando su trayecto al desembocar en la ciénaga de Zapatosa. Esta cuenca abarca un territorio de 1.776.900 hectáreas, distribuyéndose en un 65% en el departamento del Cesar y el 35% restante en el departamento de La Guajira.

El río Cesar desempeña un papel crucial en el desarrollo de las localidades ribereñas, siendo el epicentro de actividades económicas primordiales en la región, tales como: la agricultura, la pesca, la explotación de materiales de arrastre y la ganadería (Guzmán, 2013). El clima en la cuenca al norte del departamento del Cesar se presenta como cálido semiárido con una temperatura media anual superior a 28°C. La precipitación media anual oscila entre 1000 y 1500 mm. Además, el patrón de precipitaciones presenta un carácter bimodal, con dos estaciones se-

cas y dos estaciones lluviosas; los períodos secos están comprendidos entre los meses de junio a julio, y los meses entre diciembre a abril, mientras que las estaciones lluviosas comprenden el mes de mayo, y los meses entre agosto a noviembre (IDEAM, s.f.).

Para el muestreo en el río Cesar, se seleccionaron seis sitios distribuidos a lo largo de su longitud de estudio (Figura 1). Se tomaron muestras de aguas superficiales en estos sitios durante los meses de septiembre de 2022 y enero de 2023, correspondientes a las estaciones lluviosa y seca, respectivamente. Las muestras se filtraron y conservaron refrigeradas a 4°C en recipientes de vidrio ámbar, siguiendo las directrices del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (2020). Los análisis se realizaron en las 24 horas posteriores a la toma de las muestras en las instalaciones del laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental (MAGYA) de la sede Sabana de la Universidad Popular del Cesar (Valledupar, Colombia). La Tabla 1 detalla los sitios de muestreo, las coordenadas geográficas y el uso del suelo en las cercanías de las cuencas fluviales.

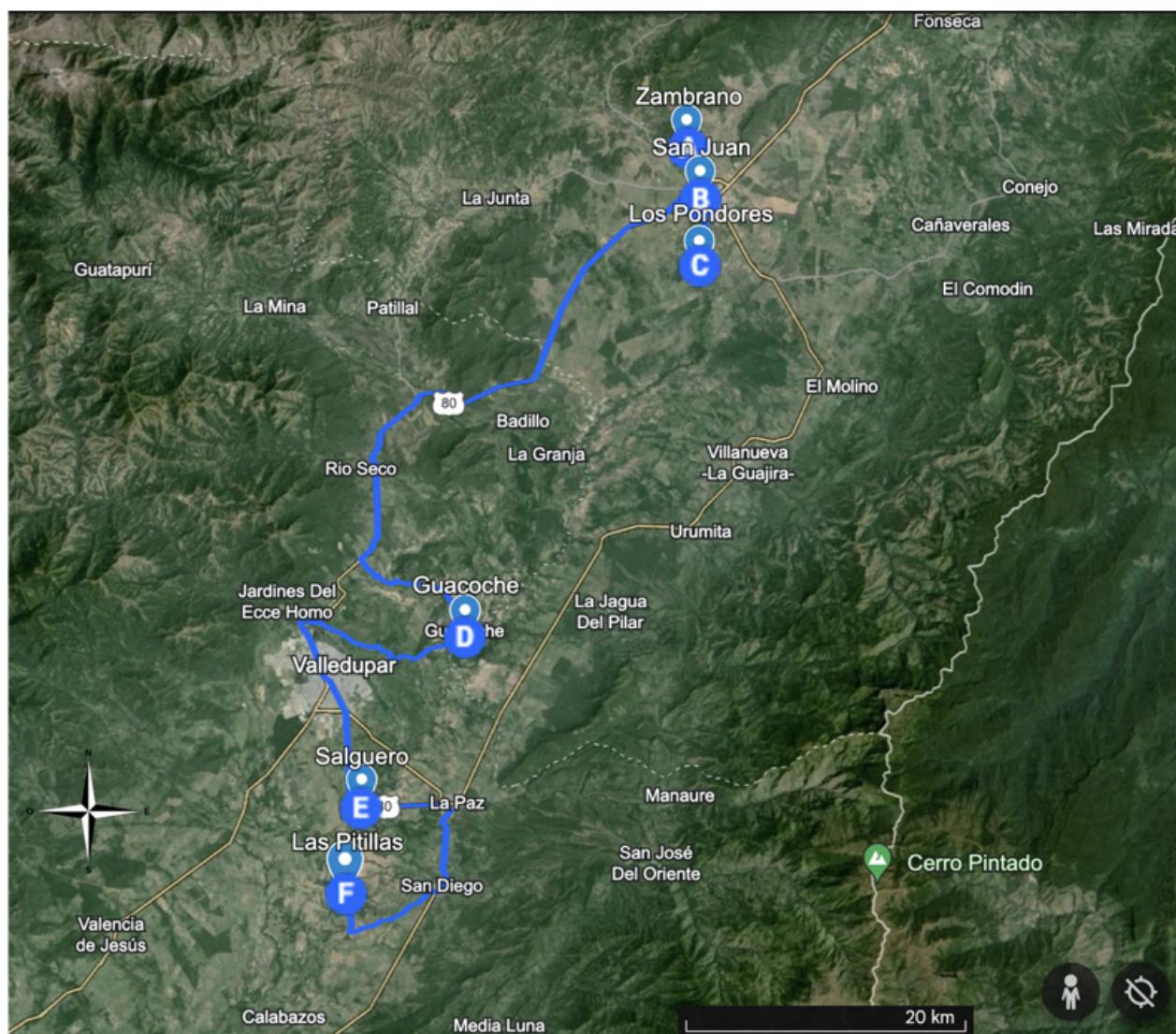


Figura 1. Mapa de los sitios de muestreo estudiados del río Cesar

Fuente: (Google, s.f.)

Tabla 1.

Detalles de sitios de muestreo del río Cesar

Sitio de muestreo	Código del sitio	Característica del sitio de muestreo	Coordenadas	Elevación (m.s.n.m)
Zambrano	A	Tierra de pastoreo habitada por pocos habitantes	10°48'15.5"N 73°01'16.2"O	250
San Juan	B	Actividades agrícolas y domésticas	10°46'18.3"N 73°00'44.7"O	250

Los Pondores	C	Actividades agrícolas y pastoreo	10°43'37.6"N 73°00'46.8"O	250
Guacoche	D	Excavación de arena y actividades agrícolas	10°29'30.3"N 73°09'54.1"O	180
Salguero	E	Excavación de arena, actividades agrícolas y pastoreo	10°23'01.1"N 73°13'55.9"O	180
Las Pitillas	F	Tierra de pastoreo habitada por pocos habitantes	10°19'44.0"N 73°14'34.8"O	180

Nota. N: norte; O: oeste; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar.

Fuente: autores.

Análisis de muestras

Nitratos

Se aplicó el método espectrofotométrico 0.2 - 20.0 mg.L⁻¹ NO₃-N 0.9 - 88.5 mg.L⁻¹ NO₃ Spectroquant® obtenidos de Merck. Para ello, se introdujeron una cantidad equivalente a una microcuchara rasa del reactivo NO₃⁻ en un tubo de ensayo seco. Posteriormente, se añadió 5.0 ml de reactivo NO₃⁻, agitándose vigorosamente durante 1 minuto hasta la disolución completa del reactivo NO₃⁻. Luego, se incorporaron gradualmente 1.5 ml de la muestra filtrada. Las muestras fueron dejadas en reposo a temperatura ambiente durante un periodo de 10 minutos. Las absorbancias de NO₃⁻ fueron analizadas por triplicado y determinadas espectrofotométricamente a una longitud de onda máxima (λ máx.) de 525 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis GENESYS 10S de la marca Thermo scientific, a λ máx. 410 nm. Este método es análogo al American Public Health Association (APHA) 4500-P C. (Franson, 1992).

Fosfatos

Se aplicó el método espectrofotométrico, VM 0.5 - 30.0 mg.L⁻¹ PO₄-P 1.5 - 92.0 mg.L⁻¹ PO₄³⁻ 1.1 - 68.7 mg.L⁻¹ P₂O₅ Spectroquant® obtenidos de Merck. A cada 5.0 ml de cada muestra de agua filtrada, se añadió 1.2 ml del reactivo PO₄³⁻. Luego, las muestras se analizaron por triplicado espectrofotométricamente utilizando un espectrofotómetro UV-vis GENESYS 10S de la marca Thermo scientific, a λ máx. 410 nm. Este método es análogo al American Public Health Association (APHA) 4500-P C. (Franson, 1992).

Análisis de datos

Se realizó análisis de varianza (ANOVA) de dos factores y prueba de Tukey para determinar diferencias significativas entre las concentraciones de NO₃⁻ y PO₄³⁻ según el sitio de muestreo y la estación con una confianza del 95% mediante el programa estadístico Minitab 18. El coeficiente de variación se calculó utilizando la Ecuación 1. Este coeficiente proporciona información

sobre la variabilidad de las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} en función de la estación (lluviosa o seca).

$$CV = (DE/M) * 100$$

(Ecuación 1)

Donde:

CV = Coeficiente de variación

DE = Desviación estándar

M = Media

La variación fue categorizada en tres niveles: baja variación ($\%CV < 20$), variación moderada ($\%CV = 20-50$) y alta variación ($\%CV > 50$) (Verla *et al.*, 2020a; 2020b; 2018; 2017 Enyoh *et al.*, 2018). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson para poder determinar la asociación entre NO_3^- y PO_4^{3-} . Se procedió a calcular el NPI mediante la Ecuación 2, con el objetivo de evaluar la

contaminación asociada al uso del agua en actividades antropogénicas.

$$NPI = \frac{CN}{MAC\ N} + \frac{CP}{MAC\ P}$$

(Ecuación 2)

Donde:

CN = concentración promedio de NO_3^-

CP = concentración promedio de PO_4^{3-}

MAC N = concentración máxima para NO_3^- (OMS, 2004)

MAC P = concentración máxima para PO_4^{3-} (OMS, 2004)

La clasificación del NPI se divide en categorías que incluyen $NPI < 1$ (sin contaminación), $NPI 1 \leq 3$ (moderadamente contaminado), $NPI > 3 \leq 6$ (considerablemente contaminado) y $NPI > 6$ (muy altamente contaminado) (Isiuku y Enyoh, 2020).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza de dos factores mostró que las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} variaron significativamente según la interacción entre el sitio de muestreo y la estación ($p < 0,05$), y con la prueba de Tukey se comprobó que grupos (sitio de muestreo*estación) son significativamente diferentes entre sí (tablas 2 y 3). En ninguno de los sitios

de muestreo se superó el valor límite (10 mg.L^{-1}) para NO_3^- , establecido en la resolución 2115 de 2007 para aguas de consumo humano (potable), en ambas estaciones. Sin embargo, la concentración de PO_4^{3-} en todos los sitios de muestreo en ambas estaciones excedió el umbral de 0.5 mg.L^{-1} (Resolución 2115 de 2007).

Tabla 2.

Concentración media de NO_3^- (mg.L^{-1}) de sitios de muestreo en estación lluviosa y seca

Sitio de muestreo	Estación lluviosa	Estación seca
Zambrano	0.496 ± 0.047 EF	0.936 ± 0.015 D
San Juan	0.460 ± 0.044 F	1.332 ± 0.029 BC
Los Pondores	0.506 ± 0.046 EF	1.353 ± 0.025 B
Guacoche	0.626 ± 0.006 E	1.389 ± 0.066 B
Salguero	1.182 ± 0.032 C	1.861 ± 0.006 A
Las Pitillas	0.919 ± 0.046 D	1.865 ± 0.150 A
Media	0.698	1.456
DE	0.037	0.048
% CV	5.27	3.33

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: autores.

Tabla 3.

Concentración media de PO_4^{3-} (mg.L^{-1}) de sitios de muestreo en estación lluviosa y seca

Sitio de muestreo	Estación lluviosa	Estación seca
Zambrano	1.537 ± 0.022 G	2.829 ± 0.226 D
San Juan	1.514 ± 0.022 G	2.405 ± 0.156 EF
Los Pondores	1.670 ± 0.022 G	2.962 ± 0.102 D
Guacoche	2.249 ± 0.022 F	3.363 ± 0.022 C
Salguero	2.739 ± 0.022 DE	5.553 ± 0.143 A
Las Pitillas	2.279 ± 0.046 F	4.410 ± 0.291 B
Media	1.998	3.587
DE	0.026	0.157
% CV	1.32	4.37

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: autores.

La resolución 631 de 2015 en Colombia establece análisis y reporte de NO_3^- y PO_4^{3-} para los vertimientos en aguas superficiales y sistemas de alcantarillado, el hecho de no contar con límites permisibles puede deber-

se a que los NO_3^- y PO_4^{3-} son contaminantes poco estudiados en el país o que dichos márgenes se encuentran en evaluación (Resolución 631 de 2015).

Según la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda (EPA, 2023), las concentraciones de NO_3^- en aguas superficiales $<4 \text{ mg.L}^{-1}$ y $<8 \text{ mg.L}^{-1}$ indican alta y buena calidad respectivamente; por lo cual se demuestra la alta calidad de la cuenca del río Cesar entre Zambrano (La Guajira) y Las Pitillas (Cesar), ya que los sitios de muestreo no superaron estos valores en ambas estaciones. Además, en Irlanda se consideran aguas superficiales de alta calidad con concentraciones de $\text{PO}_4^{3-} <0.075 \text{ mg.L}^{-1}$, buena calidad $<0.105 \text{ mg.L}^{-1}$, mientras que $>0.105 \text{ mg.L}^{-1}$ indica menor calidad. A lo largo de los sitios de muestreo del río estudiado, las concentraciones de iones PO_4^{3-} indicaron que la calidad del agua es deficiente tanto en la estación lluviosa como en la estación seca.

De forma adicional, conforme a las directrices de la OMS (2004), los límites permisibles en agua superficiales para NO_3^- son 50 mg.L^{-1} y PO_4^{3-} es 5 mg.L^{-1} . Las concentraciones de NO_3^- en los sitios de muestreo se mantuvieron por debajo de los límites mencionados anteriormente tanto en la estación lluviosa como en la seca. Sin embargo, sólo se observó un valor superior al permisible en el sitio Salguero, con una concentración de PO_4^{3-} ($5.553 \pm 0.143 \text{ mg.L}^{-1}$) durante la estación seca.

Según los registros de precipitación media total mensual para la zona de estudio del IDEAM, el mes de enero (estación seca) presenta un promedio de precipitación mensual acumulada entre 0 a 50 milímetros (mm), mientras que el mes de septiembre (estación lluviosa) presenta un promedio de precipitación acumulada entre 150 a 200

milímetros (mm) (IDEAM, s.f.). Como resultado, la disminución de las precipitaciones en la región durante la temporada seca lleva a una disminución del caudal del río Cesar y en un aumento de la concentración de los iones de NO_3^- y PO_4^{3-} en comparación con la estación lluviosa (Hegarty, *et al.*, 2021; Mosquera-Restrepo y Peña-Salamanca, 2019). Esto concuerda con el estudio de Maderas *et al.* (2016) sobre la calidad del agua en el río Cesar utilizando los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de contaminación, donde se observó que los niveles de fósforo total se incrementan durante el periodo seco.

Según Soro *et al.* (2023), al evaluar la calidad del agua en tres ríos en Costa de Marfil encontraron que durante la estación seca, en comparación con la estación lluviosa, se registra una mayor concentración de iones de NO_3^- en los ríos Comoé ($1.06 \pm 0.44 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{ N}$) y Bia ($0.82 \pm 0.40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{ N}$), así como una mayor concentración para los iones de PO_4^{3-} en el río Comoé ($0.071 \pm 0.029 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-} \text{ P}$), Bandama ($0.053 \pm 0.036 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-} \text{ P}$) y Bia ($0.101 \pm 0.009 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-} \text{ P}$). De forma adicional, Chan y Sahile (2024) reportaron que en el río Elgo en Etiopía la concentración media de NO_3^- en la época seca ($0.198 \pm 0.007 \text{ mg.L}^{-1}$) es ligeramente superior en comparación con la época lluviosa ($0.197 \pm 0.020 \text{ mg.L}^{-1}$). Este fenómeno se atribuye a actividades antropogénicas, escorrentía tierras agrícolas, uso de fertilizantes naturales o sintéticos y filtraciones de aguas residuales. Durante el trayecto Zambrano (La Guajira) y Salguero (Cesar), el río Cesar atraviesa diferentes zonas urbanas y rurales donde se desarrollan varias actividades de pastoreo (Pinilla *et al.*, 2018;

De la Parra-Guerra *et al.*, 2017), industriales y agrícolas, que contribuyen con la descarga de aguas domésticas, industriales, así como la lixiviación de fertilizantes (Chan y Sahile, 2024; Soro *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2020; Rütting y Delin, 2018; Bhateria y Jain, 2016). Como consecuencia, a medida que se avanza en los sitios de muestreo entre el tramo Zambrano (La Guajira) y Salguero (Cesar) se puede observar un incremento de las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} , respectivamente.

En el sitio Salguero (Cesar) fue encontrada la mayor concentración en mg.L^{-1} de NO_3^- y PO_4^{3-} , independientemente de las condiciones climáticas de la estación lluviosa o estación seca. De acuerdo con el NPI existe una contaminación moderada, producto de la descarga de aguas residuales provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Valledupar que recibe y trata aguas residuales industriales y domésticas. La presencia de este efluente puede deteriorar la calidad del agua en la cuenca baja

del río Cesar, afectando negativamente a la biodiversidad en este ecosistema acuático y al suministro del recurso hídrico a las poblaciones vecinas, tal como quedó demostrado en los trabajos de De la Parra y García-Alzate (2019) y Carreño y Méndez (2011).

La correlación de Pearson arrojó un coeficiente $\rho = 0.909$ y un valor $p = 0.000$, lo que indica una fuerte correlación positiva y significativa entre los niveles de NO_3^- y PO_4^{3-} . Esta relación sugiere que cuando los niveles de NO_3^- aumentan también lo hacen los de PO_4^{3-} , y viceversa, sin implicar una relación causal. Ambos parámetros parecen estar influenciados por un tercer factor externo desconocido.

El NPI en aguas superficiales permite evaluar la contribución acumulativa de NO_3^- y PO_4^{3-} a la salud ambiental, proporcionando una evaluación rápida de la calidad del agua. Los valores del NPI calculado en los distintos sitios de muestreos del río Cesar se presentan en las tablas 4 y 5.

Tabla 4.

NPI de los sitios de muestreos en estación lluviosa

Sitio de muestreo	Estación lluviosa	Observación
Zambrano	0.32	Sin contaminación
San Juan	0.31	Sin contaminación
Los Pondores	0.34	Sin contaminación
Guacoche	0.46	Sin contaminación
Salguero	0.57	Sin contaminación
Las Pitillas	0.47	Sin contaminación

Fuente: autores.

Tabla 5.

NPI de los sitios de muestreos en estación seca

Sitio de muestreo	Estación seca	Observación
Zambrano	0.58	Sin contaminación
San Juan	0.51	Sin contaminación
Los Pondores	0.62	Sin contaminación
Guacocche	0.70	Sin contaminación
Salguero	1.15	Moderadamente contaminado
Las Pitillas	0.92	Sin contaminación

Fuente: autores.

Durante la estación seca, únicamente Salguero exhibe una categoría moderada de contaminación (con un valor de 1.15), mientras que los demás sitios de muestreos en esta estación no denotan la presencia de contaminantes, lo cual se refleja en el siguiente

orden: Salguero > Las Pitillas > Guacocche > Los Pondores > Zambrano > San Juan. En la estación lluviosa, ningún sitio de muestreo presenta contaminación, manteniendo el mismo orden observado en la estación seca.

4 CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que la estación y el sitio de muestreo influyen en la concentración de NO_3^- y PO_4^{3-} ($p<0,05$) de las aguas superficiales del río Cesar. A lo largo de la cuenca del río Cesar, desde Zambrano (La Guajira) hasta Las Pitillas (Cesar), los niveles de NO_3^- se encuentran entre los límites permitidos por la OMS y la EPA de Irlanda. Por otro lado, la concentración de iones PO_4^{3-} supera los límites establecidos

por la EPA de Irlanda en todos los sitios de muestreo, sin embargo, según los límites establecidos por la OMS solo el sitio de muestreo Salguero superó el valor permitido para el parámetro de PO_4^{3-} durante la estación seca. Por último, el NPI indicó una contaminación moderada en Salguero durante la estación seca atribuida a las descargas de efluentes de la PTAR de Valledupar.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Jean Carlos Ospino-Jiménez: administrador del proyecto, metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original. **María I. Téllez-Luna:** escritura, revisión y edición. **Yessica L. Perdomo Useche:** revisión y

edición. **Néstor F. Plata:** análisis de datos y revisión. **Javier G. Gómez:** adquisición de recursos, administrador del proyecto, supervisión, conceptualización, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad Popular del Cesar (sede Valledupar), brindó respaldo financiero en el contexto de la convocatoria interna

para financiar proyectos de investigación de grupos de investigación mediante el convenio 069 del 19 de diciembre de 2022.

FINANCIAMIENTO

El estudio fue realizado con financiamiento de la Universidad Popular del Cesar a través del proyecto “Microalgas como biorremediadoras de aguas contaminadas por nitratos

y fosfatos postratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Valledupar-cesar”, en el marco del convenio 069, suscrito el 19 de diciembre de 2022.

LITERATURA CITADA

Bhateria, R., & Jain, D. (2016). Water quality assessment of lake water: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 2(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7>

Braun, J.C. A., Borba, C. E., Godinho, M., Perondi, D., Schöntag, J. M., & Wenzel, B. M. (2019). Phosphorus adsorption in

Fe-loaded activated carbon: Two-site monolayer equilibrium model and phenomenological kinetic description. *Chemical Engineering Journal*, 361, 751–763. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.073>

Carreño, U. F., y Méndez, J. A. (2011). Estimación de la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales que

operan con lagunas de estabilización en la cuenca alta y media del río Bogotá. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 10, 55-64. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231122666005.pdf>

Chan, D., & Sahile, Z. A. (2024). Water quality assessment of Elgo river in Ethiopia using CCME, WQI and IWQI for domestic and agricultural usage. *Heliyon*, 10(1), e23234. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23234>

De Girolamo, A. M., Spanò, M., D'Ambrosio, E., Ricci, G. F., & Gentile, F. (2019). Developing a nitrogen load apportionment tool: Theory and application. *Agricultural Water Management*, 226, 105806. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105806>

De la Parra, A., y García-Alzate, C. (2019). Metabolismo de un tramo en la cuenca baja del río Cesar, departamento del Cesar, en una época de sequía, Colombia. *Intropica* 14(1), 16-23. <http://dx.doi.org/10.21676/23897864.2719>

De la Parra-Guerra, A., García-Alzate, C., Rodelo-Soto, K., y Gutiérrez-Moreno, L. (2017). Composición y estructura fitoperifitica de la cuenca media y baja del río Cesar, departamento Cesar-Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 22 (2), 5938-5950. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1029>

Enyoh, C. E., Verla, A. W., & Egejuru, N. J. (2018). pH variations and chemometric assessment of borehole water in Orji, Owerri Imo State, Nigeria. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 5(2), 1-9. <https://doi.org/10.4172/2380-2391.1000238>

Environmental Protection Agency. [EPA]. (2023). *Water Quality in 2022 - An Indicators Report*. EPA (IE). <https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/freshwater--marine/Water-Quality-2022-Indicator-Report-Web.pdf>

Franson, M. (Ed.). (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (18th ed.). American Public Health Association. https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-phosphates-standard-methods-white-paper.pdf

Google. (s.f.). [Indicaciones de Zambrano (La Guajira) a Las Pitillas (Cesar)]. https://www.google.com/maps/d/edit?mid=17v-jkAqOlwdso72IKk4e5k_PbTE2x-9Y&usp=drive_link

Guzmán Finol, K. (2013). *El río Cesar*. Banco de la República. https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_188.pdf

Han, J. Y., Kim, D. H., Oh, S., & Moon, H. S. (2020). Effects of water level and vegetation on nitrate dynamics at varying sediment depths in laboratory-scale wetland mesocosms. *Science of the Total Environment*, 703, 134741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134741>

Hegarty, S., Hayes, A., Regan, F., Bishop, I., & Clinton, R. (2021). Using citizen science to understand river water quality while filling data gaps to meet United Nations Sustainable Development Goal 6 objectives. *Science of the Total Envi-*

ronment, 783, 146953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146953>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [IDEAM]. (s.f.). *Atlas climatológico de Colombia*. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2020). *Instructivo de toma y preservación de muestras sedimentos y agua superficial para la red de monitoreo de calidad del IDEAM*. IDEAM.

Isiuku, B. O., & Enyoh, C. E. (2020). Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria. *Environmental Advances*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100018>

Jiang, H., Zhang, Q., Liu, W., Zhang, J., Pan, K., Zhao, T., & Xu, Z. (2021). Isotopic compositions reveal the driving forces of high nitrate level in an urban river: Implications for pollution control. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126693>

Madera, L. C., Angulo, L. C., Díaz, L. C., y Rojano, R. (2016). Evaluación de la Calidad del Agua en Algunos Puntos Afluentes del río Cesar (Colombia) utilizando Macroinvertebrados Acuáticos como Bioindicadores de Contaminación. *Información Tecnológica*, 27(4), 103–110. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642016000400011>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles*

en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). *Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolucion%23B3n_2115_de_2007.pdf

Mosquera-Restrepo, D., y Peña-Salamanca, E. J. (2019). “Ensamblaje” de macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables fisicoquímicas en un río de montaña en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1235-1246. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i6.30842>

Oñate Barraza, H. C., y Cortez Henao, G. Y. (2020). Estado del agua del río Cesar por vertimientos residuales de la ciudad de Valledupar. Bioindicación por índice BMWP/Col. *Tecnura*, 24(65), 39-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.15766>

Pinilla, J. C., Flórez, P., Sierra, M., Morales, E., Sierra, R., Vásquez, M. C., Tobón, J. C., Sánchez, A., & Ortiz, D. (2018). Point prevalence of gastrointestinal parasites in double purpose cattle of Rio de Oro and Aguachica municipalities, Cesar state, Colombia. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 12, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2018.01.003>

Priya, E., Kumar, S., Verma, C., Sarkar, S., & Maji, P. K. (2022). A comprehensive review on technological advances of adsorption for removing nitrate and phosphate from waste water. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103159. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103159>

Rütting, T., Aronsson, H., & Delin, S. (2018). Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9900-8>

Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>

Singh, G., Patel, N., Jindal, T., Srivastava, P., & Bhowmik, A. (2020). Assessment of spatial and temporal variations in water quality by the application of multivariate statistical methods in the Kali River, Uttar Pradesh, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08307-0>

Soro, M., N'Goran, K. M., Ouattara, A. A., Yao, K. M., Kouassi, N. L. B., & Diacono, T. (2023). Nitrogen and phosphorus spatio-temporal distribution and fluxes intensifying eutrophication in three tropical rivers of Côte d'Ivoire (West Africa). *Marine Pollution Bulletin*, 186, 114391. <https://doi.org/10.1016/j.marpbul.2022.114391>

Verla, E. N., Verla, A. W., & Enyoh, C. E. (2020a). Bioavailability, Average Daily

Dose and Risk of Heavy Metals in Soils from Children Playgrounds Within Owerri, Imo State, Nigeria. *Chemistry Africa*, 3(2), 427–438. <https://doi.org/10.1007/s42250-020-00124-9>

Verla, E. N., Verla A. W., & Enyoh C. E. (2020b). Finding a relationship between physicochemical characteristics and ionic composition of River Nworie, Imo State, Nigeria. *PeerJ Analytical Chemistry* 2:e5. <https://doi.org/10.7717/peerj-achem.5>

Verla, A. W., Verla, E. N., & Amaobi, C. E. (2018). Water pollution scenario at river Uramurukwa flowing through owerri metropolis, Imo state, Nigeria. *International Journal of Environment and Pollution Research*, 6(4), 38-49. <https://ejournals.org/ijepr/vol-6-issue-4-november-2018/water-pollution-scenario-at-river-uramurukwa-flowing-through-owerri-metropolis-imo-state-nigeria/>

Verla, E. N., Verla, A. W., & Enyoh, C. E. (2017). Pollution assessment models of surface soils in Port Harcourt city, Rivers State, Nigeria. *World News of Natural Sciences*, 12, 1-20. <http://www.worldnewsnaturalsciences.com/wp-content/uploads/2012/11/WNOFNS-12-2017-1-20-3.pdf>

Vu, H. H. T., Khan, M. D., Chilakala, R., Lai, T. Q., Thenepalli, T., Ahn, J. W., Park, D. U., & Kim, J. (2019). Utilization of Lime Mud Waste from Paper Mills for Efficient Phosphorus Removal. *Sustainability*, 11(6), 1524. <https://doi.org/10.3390/su11061524>

World Health Organization. [WHO]. (2004).
Guidelines for water quality 3rd ed. <https://www.who.int/home/search-results?indexCatalogue=genericsearchindex1&searchQuery=Guidelines%20for%20water%20quality%203rd%20ed&words-Mode=AnyWord>

[searchQuery=Guidelines%20for%20water%20quality%203rd%20ed&words-Mode=AnyWord](https://www.who.int/home/search-results?indexCatalogue=genericsearchindex1&searchQuery=Guidelines%20for%20water%20quality%203rd%20ed&words-Mode=AnyWord)

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



Licencia de Creative Commons

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



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE SELENIO EN PECES DE ALTO VALOR COMERCIAL EN DIVERSOS AMBIENTES ACUÁTICOS EN EL NORTE DE COLOMBIA

EVALUATION OF SELENIUM LEVELS IN FISH OF HIGH COMMERCIAL VALUE IN DIFFERENT AQUATIC ENVIRONMENTS IN NORTHERN COLOMBIA

Camila Padilla Ramírez ¹
Leonomir Córdoba-Tovar ²
José Luis Marrugo-Negrete ³

¹ Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
kmilapr_09@hotmail.com

² Doctor en Estudios Ambientales y Rurales, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luís Córdoba”, Quibdó, Colombia.
d-leonomir.cordoba@utch.edu.co

³ Doctor en Ciencias Químicas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. jmarrugo@correo.unicordoba.edu.co

Citación: Padilla, C., Córdoba-Tovar, L., y Marrugo-Negrete, J. (2025). Evaluación de los niveles de selenio en peces de alto valor comercial en diversos ambientes acuáticos en el norte de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 299 - 318.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7659>

RESUMEN

Contextualización: el selenio (Se) es uno de los metaloides esenciales para el correcto funcionamiento de los organismos que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. En concentraciones adecuadas es importante porque ayuda a mejorar el sistema reproductivo y fortalece el sistema inmunológico; en contraste, en elevadas concentraciones puede ejercer efectos adversos. Este papel dual que desempeña el Se hace que sea de especial interés para la comunidad científica.

Vacío de conocimiento: las altas concentraciones de Se en los ecosistemas acuáticos preocupan a la comunidad científica, debido a los impactos que pueden ocasionar en la salud humana y de los ecosistemas; sin embargo, es poco lo que se conoce sobre su comportamiento en relación con sus concentraciones en peces de agua dulce.

Objetivo: evaluar concentraciones de Se en peces de alto valor comercial en diferentes ecosistemas acuáticos en el norte de Colombia, las cuales permitan sentar bases sobre los niveles de contaminación con este elemento.

Metodología: se analizaron las concentraciones de Se en tejido muscular de peces de

alto valor comercial en seis sitios, incluidos embalses y ríos ubicados en cuatro departamentos en el norte de Colombia. Las muestras de pescado fueron obtenidas por compra directa a los pescadores locales de cada sitio, las concentraciones fueron analizadas mediante espectrometría de fluorescencia atómica acoplada a generación de hidruros.

Resultados y conclusiones: un total de 309 muestras de peces fueron analizadas y estuvieron representadas por 28 especies. El 27% equivalente a 84 individuos del total de los peces analizados superaron el valor máximo sugerido ($400 \mu\text{g/kg/día}$) para el consumo humano establecido en el decreto 3863 del 2008 emitido por el Ministerio de la Protección Social. Todas las muestras de las especies *Brycon moorei*, *Roeboides dayi*, *Sorubim cuspicaudus*, *Plagioscion surinamensis* y *Pseudoplatystoma magdaleniatum* superaron este valor. Los hallazgos de este estudio sugieren que la exposición a altas concentraciones de Se con el tiempo podría convertirse en un problema de salud pública y ambiental.

Palabras clave: Colombia, concentraciones, peces, selenio

ABSTRACT

Contextualization: selenium (Se) is one of the essential metalloids for the correct functioning of organisms and is widely distributed in nature. In adequate concentrations it is important because it helps to improve the reproductive system and strengthens the immune system. In contrast, in high concentrations it can have adverse effects. This dual role played by Se makes it of particular interest to the scientific community.

Knowledge gaps: the high concentrations of Se in aquatic ecosystems are of concern to the scientific community because of the impacts they can have on human and ecosystem health. However, little is known about its behavior in relation to its concentrations in freshwater fish.

Objective: to evaluate Se concentrations in fish of high commercial value in different aquatic ecosystems in the north of Colombia, which allow us to establish the basis for the levels of contamination with this element.

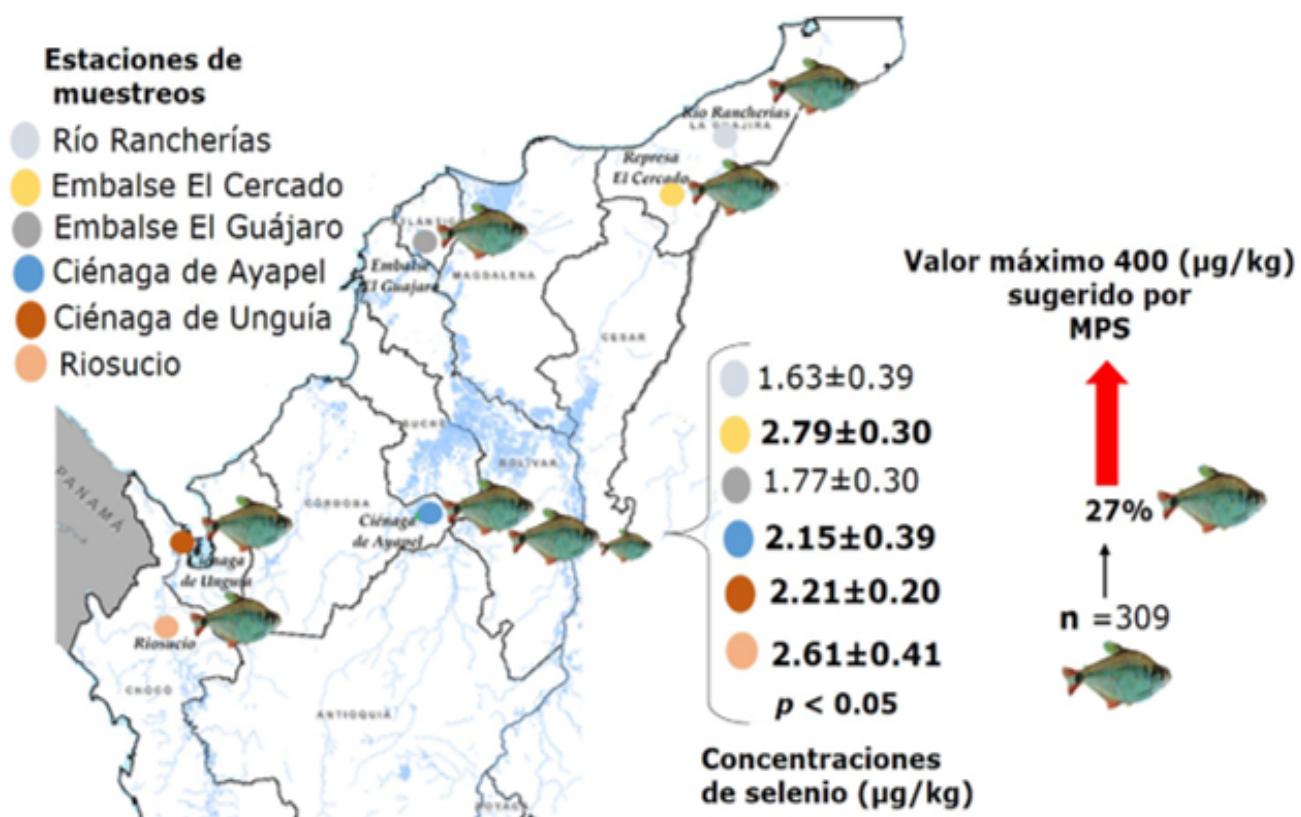
Methodology: Se concentrations in muscle tissue of commercially valuable fish were

analyzed at six sites, including reservoirs and rivers located in four departments in northern Colombia. Fish samples were obtained by direct purchase from local fishermen at each site. Concentrations were analyzed by atomic fluorescence spectrometry coupled to hydride generation.

Results and conclusions: a total of 309 fish samples were analyzed and were represented by 28 species. Of the total number of fish analyzed, 27%, equivalent to 84 individuals, exceeded the maximum suggested value ($400 \mu\text{g/kg/day}$) for human consumption established in decree 3863 of 2008 issued by the Ministry of Social Protection. All samples of the species *Brycon moorei*, *Roeboides dayi*, *Sorubim cuspicaudus*, *Plagioscion surinamensis* and *Pseudoplatystoma magdaleniatum* exceeded this value. The findings of this study suggest that exposure to high concentrations of Se over time could become a public health and environmental problem.

Keywords: Colombia, concentrations, fish, selenium

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un metaloide esencial para la vida ya que desempeña un papel fundamental en varios procesos biológicos, incluida la función antioxidante y la salud del sistema inmunológico (Hoya-Flórez *et al.*, 2022). Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de Se en los ecosistemas acuáticos y su acumulación en peces está siendo objeto de atención debido a su rol dual, es decir, en concentraciones adecuadas resulta vital pero en concentraciones elevadas puede ejercer efectos tóxicos tanto en los peces como en los humanos (Johnson *et al.*, 2020).

Las concentraciones naturales del Se y otros elementos como el mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), a menudo se ven amplificadas por actividades antrópicas, entre ellas la minería, la industria manufacturera, desforestación y la agricultura (Baragaño *et al.*, 2022; Marrugo-Negrete *et al.*, 2015; Palacios-Torres *et al.*, 2018). Una vez liberados al ambiente, ingresan al suelo, agua y sedimentos, pudiéndose acumular en los organismos y afectando a los ecosistemas como también a las personas que dependen de ellos (Ali y Khan, 2018; Marrugo-Negrete *et al.*, 2015).

Adicionalmente, las concentraciones de Se pueden variar ampliamente en función de

la ubicación geográfica, características físicas y químicas del agua, las prácticas agrícolas y la presencia de actividades industriales, además, la biodisponibilidad en el agua y los sedimentos influye en su acumulación en los peces, lo cual impacta la cadena alimentaria (Torres *et al.*, 2015). Este señalamiento sugiere que las comunidades cercanas a fuentes de contaminación, así como a los ecosistemas naturales (acuáticos y terrestres), son particularmente las más vulnerables a los efectos de la alta acumulación de metales, siendo en estas áreas donde se deberían redoblar los esfuerzos de gestión (Marrugo-Negrete *et al.*, 2023; Perdomo y Furlong, 2022).

Para el caso del Se, se ha informado que cuando se altera su equilibrio natural una cantidad importante puede ingresar en los peces, bien sea en su forma orgánica e inorgánica, la cual no logra ser metabolizada, provocando una absorción desregulada por parte del organismo (Burk y Hill, 2015). Además, cuando los niveles de Se en peces superan los 4 µg/g, se pueden producir efectos perjudiciales como el deterioro del crecimiento, daños en órganos vitales como el hígado y el riñón, reducción de la capacidad reproductiva e incluso la muerte del organismo (Torres *et al.*, 2020). Este fenómeno no solo afecta la salud de los peces, sino que también plantea preocupaciones sobre la seguridad alimentaria, dado que los peces son una importante fuente de proteína animal en todas las regiones del mundo (FAO, 2021;

Farzad y Andrade, 2022).

Autoridades internacionales en el tema, incluidos la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA) y el Programa Mundial de Alimento (PMA), han informado que el pescado contribuye significativamente a la nutrición y seguridad alimentaria de la población humana (FAO, 2023). Por lo tanto, consumir pescado ayuda a reducir los niveles de desnutrición ya que proporciona al igual que restablece el equilibrio adecuado de aminoácidos y ácidos grasos esenciales para el correcto funcionamiento de los organismos (Ngaisyah y Rohman, 2019). Sin embargo, la seguridad alimentaria, la salud de los ecosistemas, en especial los de agua dulce, y la conservación de la biota se encuentran comprometidas debido a las altas concentraciones de elementos esenciales y no esenciales, un problema de salud pública y ambiental crítico (Córdoba-Tovar *et al.*, 2022; Cruz-Esquível *et al.*, 2023; Paschoalini y Bazzoli, 2021).

Los trabajos sobre concentraciones de Se en peces se han intensificado en respuesta a la creciente preocupación por la calidad

de los ecosistemas naturales y la seguridad alimentaria, con lo cual se busca comprender la variabilidad geográfica y temporal de las concentraciones de este elemento en los ecosistemas acuáticos, así como los efectos potenciales en la salud de los peces y en quienes consumen productos pesqueros (Al-Saleh *et al.*, 2015; FAO, 2023). En respuesta a estas preocupaciones, los trabajos sobre concentraciones de Se en peces se han centrado en comprender las variaciones geográficas al igual que sus implicaciones en los ecosistemas acuáticos, además de la necesidad de evaluar y gestionar los riesgos asociados (McCormack *et al.*, 2020; Schneider *et al.*, 2015; Terrazas-López *et al.*, 2019; Torres *et al.*, 2015, 2020). En este sentido, el registro de concentraciones de Se en peces es un paso importante, en primer lugar, porque contribuye a la construcción de una base de información sólida sobre su comportamiento en ambientes acuáticos, y en segundo lugar, los resultados podrían contribuir en la elaboración de políticas que aseguren la conservación de la biota acuática y en consecuencia a la salud de las comunidades que dependen de ellos (Farzad y Andrade, 2022; Hoya-Flórez *et al.*, 2022).

Bajo este escenario y debido a que las investigaciones sobre concentraciones de Se son escasas no solo en Colombia sino a escala global (Córdoba-Tovar *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2024), en esta primera etapa de la in-

vestigación el objetivo principal fue evaluar concentraciones de Se en peces de alto valor comercial en diferentes ambientes, en cuatro departamentos en el norte de Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

Se analizaron concentraciones de Se en peces provenientes de seis sitios en diferentes zonas del norte de Colombia (Figura 1): Ciénaga de Ayapel (A) ubicada en el departamento de Córdoba, Embalse El Guájaro (B) en el departamento del Atlántico, Río Ranchería (C) y Embalse El Cercado (D) en el departamento de La Guajira, y ciénaga de Unguía (E) y Riosucio (F) en el departamento del Chocó. Estos sitios fueron escogidos debido a que tienen influencia de actividades pecuarias, agrícolas, industriales y mineras (Argumedo y Deluque, 2015; Fuentes-Gandara *et al.*, 2018; Salazar-Camacho *et al.*, 2022; Torres *et al.*, 2015).

Las muestras de pescado fueron adquiridas directamente de pescadores locales en cada área de estudio. Además, acompañamos las faenas de pesca para garantizar que los peces capturados provinieran de los sitios designados y fueran de alto valor comercial (Córdoba-Tovar *et al.*, 2023). De cada pescado se obtuvieron muestras de tejido muscular dorsal no menor a 300 mg, las cuales se empacaron en bolsas plásticas y refrigeradas hasta su traslado al laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba. La identificación de los peces se realizó mediante claves taxonómicas, conocimiento propio de los investigadores y consulta a expertos. Adicionalmente, se revisó la base de datos www.fishbase.org (FishBase, 2024) para comprobar la taxonomía y posición trófica de cada especie (Salazar-Camacho *et al.*, 2021).

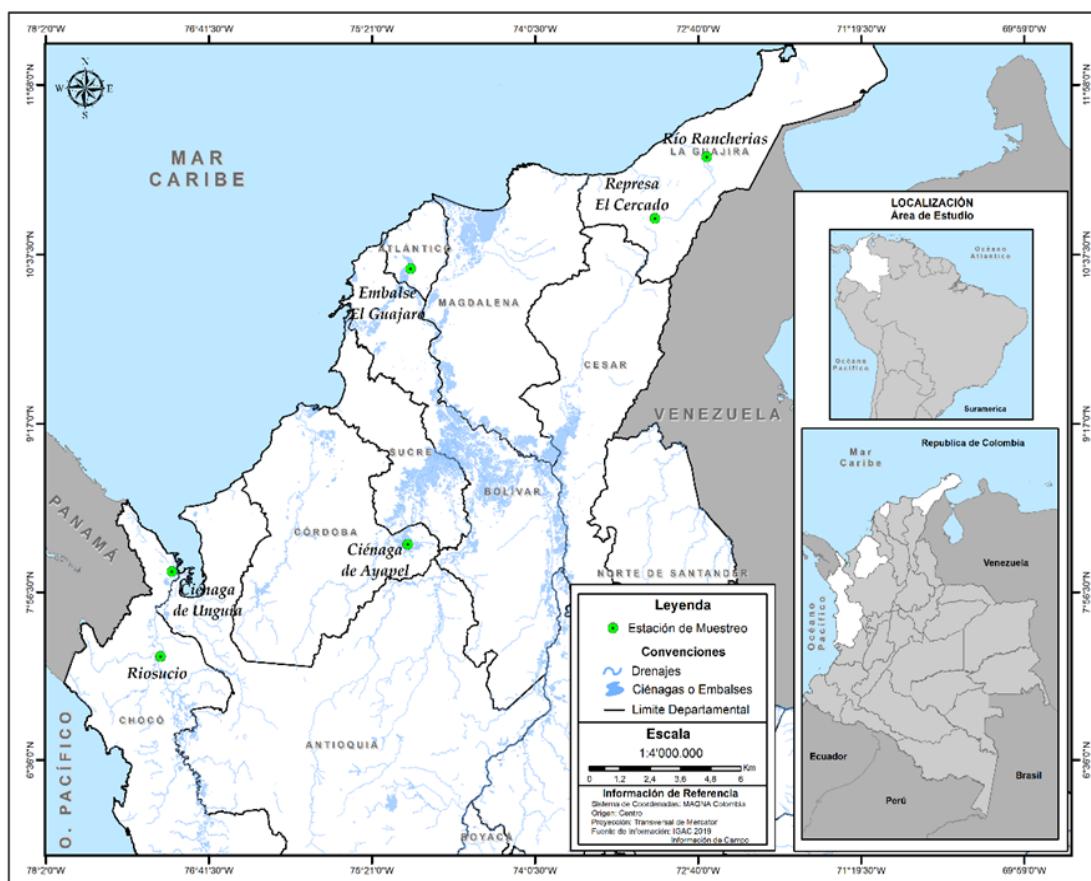


Figura 1. Localización y distribución geográfica de los seis sitios de estudio en el norte de Colombia

Fuente: autores.

Análisis de laboratorio

Para el análisis de Se en las muestras de pescado se realizó una digestión ácida asistida por microondas, siguiendo el método 3052 definido por la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2007). Se pesaron cerca de 300 mg de músculo y utilizando vasos de teflón se adicionaron 8 mL de HNO_3 y 2 mL de H_2O_2 . Las muestras se sometieron a radiación por mi-

croondas a $180 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 30 minutos. El extracto de la muestra obtenida se filtró utilizando membranas de politetrafluoroetileno (PTFE) de 0.45 μm y cada muestra se diluyó con 25 mL de agua desionizada. Finalmente, se tomaron 5 mL del extracto para convertir todo el selenio a Se^{4+} utilizando HCl y calor. Se utilizó un volumen de 25 mL para realizar el análisis mediante generación de hidruros acoplados por medio de espectrometría de fluorescencia atómica (HG-AFS).

Análisis estadístico

Se empleó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para verificar la normalidad de los datos de las concentraciones de Se. Se evaluaron diferencias de las concentraciones entre especies de peces, para lo cual, se usó una prueba de Kruskal-Wallis. Una prueba de Mann-Whitney para comparar las concentraciones de Se, según la dieta o el nivel trófico de los peces. Además, comparamos las concentraciones entre sitios de estudio, mediante un ANOVA y una prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Para este último análisis, los datos fueron trans-

formados a logaritmo natural para mejorar la visualización gráfica e interpretación de los resultados. En general, los resultados se presentan mediante estadística descriptiva como la media, mediana, desviación estándar y rangos, considerando un p valor de 0.05 como indicador de significancia. Durante el proceso analítico se utilizaron hojas de cálculo de Microsoft Excel y GraphPad Prism 8.0. Así, es importante informar que los datos biométricos como longitud y peso de los peces no fueron considerados en este estudio debido a que serán considerados para una evaluación a largo plazo.

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan las medianas de las concentraciones de Se en músculos de peces recolectados en sistemas de agua dulce distribuidos en cuatro provincias en el norte de Colombia. El total de peces recolectado fue de 309 individuos distribuidos en 28 especies. El 27% (84 individuos) del total de los peces analizados superaron el valor límite sugerido ($400 \mu\text{g/kg/día}$) para el consumo humano establecido por el Ministerio de la Protección Social (Vinchira y Muñoz-Ramírez, 2010). Además, todos los individuos de las especies *B. moorei*, *R. dayi*, *S. cuspicaudus*, *P. surinamensis*, *P. magdalenia-*

tum superaron este valor y exhibieron concentraciones elevadas de Se independiente-mente de la dieta alimentaria (Figura 2). Sin embargo, la prueba de Mann Whitney indi-có que las medianas de las concentraciones eran estadísticamente diferentes en las espe-cies carnívoras ($210.6 \pm 389.1 \mu\text{g/kg}$, $p < 0.05$, $n=146$) en comparación con las especies no carnívoras ($124.0 \pm 388.2 \mu\text{g/kg}$, $n=163$). Re-sultados similares fueron reportados por Lino *et al.* (2018), quienes observaron que las medianas de las concentraciones de Se fueron superiores en peces carnívoros del río Tapajós en la Amazonía brasiliense.

Tabla 1.

Medianas de las concentraciones de selenio + desviación estándar ($\mu\text{g/kg}$) en músculos de peces, factor de condición de Fulton (K) y nivel trófico (C= carnívoros, NC= no carnívoros)

Species	n	K	Nivel trófico	Se ($\mu\text{g/kg}$)	Rango Mínimo	Máximo
<i>Brycon moorei</i>	8	1.0 ± 0.3	NC	1024±606	200.5	2003
<i>Roeboides dayi</i>	5	1.1 ± 0.1	NC	799.9±328.3	290.5	1156
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	9	1.1 ± 0.2	C	764.4±110.5	652.9	983.2
<i>Plecostomus hondae</i>	6	1.0 ± 0.2	NC	734.5±483	323.8	1387
<i>Plagioscion surinamensis</i>	10	1.0 ± 0.1	C	650.2±222.3	230.3	910.8
<i>Sorubim cuspicaudus</i>	10	0.9 ± 0.1	C	559.3±148	375.4	855.7
<i>Caquetaia kraussii</i>	28	1.7 ± 0.2	C	434.6±561	8.36	1984
<i>Hoplias malabaricus</i>	26	1.0 ± 0.1	C	376.7±427.5	92.99	1634
<i>Ageneiosus pardalis</i>	8	1.7 ± 0.2	C	336.7±212.6	165.4	686.5
<i>Geophagus pellegrini</i>	4	2.5 ± 0.9	NC	267.4±16.3	250.1	289.1
<i>Prochilodus magdalenae</i>	13	2.3 ± 0.3	NC	194.3±48.2	124	331.9
<i>Oreochromis spp.</i>	14	1.3 ± 0.2	NC	180.1±244.9	67.99	746.5
<i>Prochilodus spp.</i>	24	1.5 ± 0.5	NC	178.8±565.9	46.55	1797
<i>Triportheus magdalenae</i>	12	1.0 ± 0.2	C	137.8±42.4	87.84	219.9
<i>Sternopygus macrurus</i>	3	1.0 ± 0.1	C	135.4±36.4	107.7	179.9
<i>Haemulon plumieri</i>	7	1.4 ± 0.1	C	127±56.3	53.13	210.1
<i>Centropomus undecimalis</i>	3	0.9 ± 0.1	C	123.7±33.5	119.7	179.6
<i>Ctenolucius hujeta</i>	4	1.0 ± 0.1	C	122.3±56.7	109.8	229.2
<i>Trachelyopterus spp.</i>	6	2.1 ± 0.2	NC	117.3±50.9	50.13	204.1
<i>Astyanax magdalenae</i>	5	1.3 ± 0.2	NC	98.4±15.7	70.4	113.6

<i>Leporinus muyscorum</i>	14	1.1 ± 0.2	NC	89.93±66.8	23.84	290.4
<i>Sciaudes proops</i>	8	0.9 ± 0.2	C	87.1±26.4	59.82	143.3
<i>Cyphocharax magdalena</i> ae	19	1.8 ± 0.4	NC	85.93±36.8	37.99	172
<i>Lutjanus campechanus</i>	8	1.0 ± 0.2	C	84.21±27.8	45.76	132.4
<i>Pimelodus blochii</i>	10	1.0 ± 0.1	NC	69.28±16.9	52.1	101.3
<i>Oreochromis niloticus</i>	28	1.6 ± 0.6	NC	65.59±111	7.55	303.9
<i>Caranx cryos</i>	10	1.1 ± 0.1	C	52.15±18.3	38.03	89.83
<i>Eugerres plumieri</i>	7	1.4 ± 0.1	NC	51.7±35.5	32.67	132.9
Total	309					

Fuente: autores.

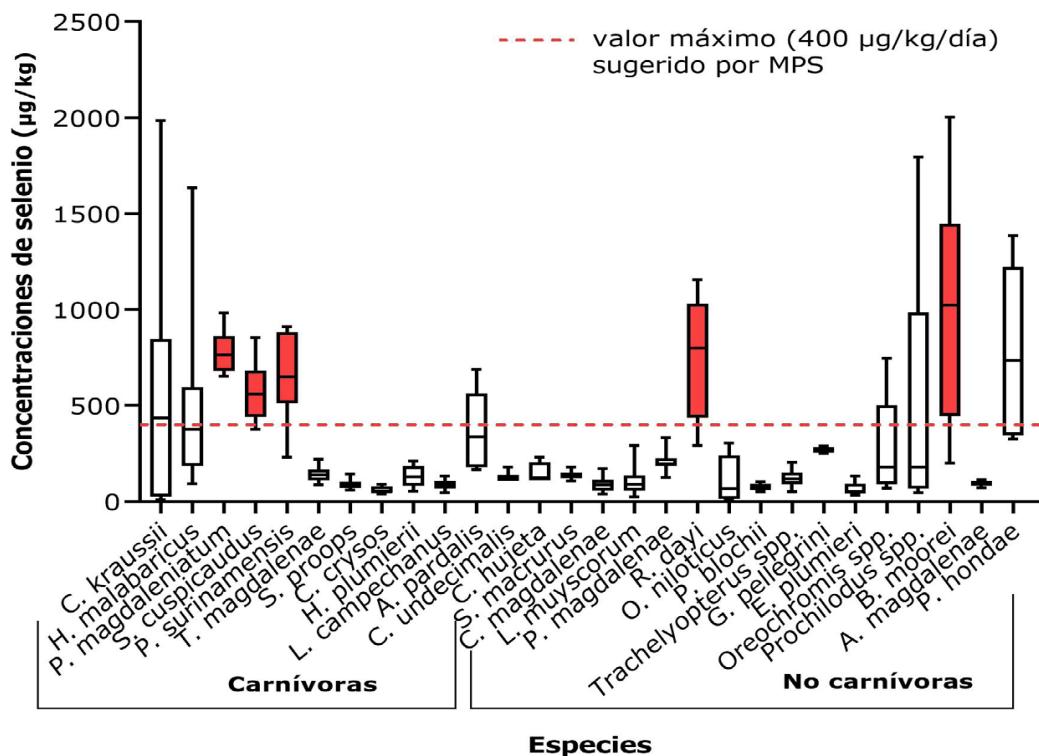


Figura 2. Distribución de las concentraciones totales de Se en los peces analizados
Nota. La línea roja discontinua indica el valor máximo sugerido para el consumo humano sugerido por MPS (Vinchira y Muñoz-Ramírez, 2010). Las barras rojas representan las especies cuyo número total de individuos superaron este valor

Fuente: autores.

El intervalo de las concentraciones de Se en esta investigación osciló entre 7.5 y 1.024 µg/kg, el cual fue superior a los valores (0.01 y 0.53 µg/kg) reportados por Alcalá-Orozco *et al.* (2020) en peces del río Amazonas (Colombia), pero también fue superior a los reportados (0.02 – 0.44 µg/kg) por Lino *et al.* (2018) en peces del río Tapajós en la Amazonía brasileña. Las altas concentraciones de Se documentadas en el presente estudio indican que a largo plazo podrían suponer un riesgo para la población por la ingesta de peces contaminados con este elemento, pero también podría resultar tóxico para los peces (Espejo *et al.*, 2020; Johnson *et al.*, 2020). Sin embargo, para determinar con precisión los efectos de las altas concentraciones de Se en la salud humana y la biota acuática, se necesitan evaluaciones integrales que ayuden a descifrar los efectos beneficiosos y adversos de las interacciones del Se con otros elementos, incluido el Hg (Alcalá-Orozco *et al.*, 2020; Farzad y Andrade, 2022; Terrazas-López *et al.*, 2019).

Al respecto, diversos investigadores han informado sobre los efectos positivos resultantes de la relación de las porciones molares entre Se:Hg (Amlund *et al.*, 2015; Arcagni *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2020; Terrazas-López

et al., 2019) y Se:Cd (Al-Saleh *et al.*, 2015). Estas investigaciones indican que cuando la relación es igual o superior a uno, existe un efecto protector del Se contra las concentraciones de un determinado elemento, pero se desconocen las concentraciones de Se adecuadas para ejercer un efecto protector (Córdoba-Tovar *et al.*, 2022).

Las concentraciones de Se también mostraron diferencias ($p < 0.05$) entre sitios de muestreo, siendo en su orden de magnitud D>F>E>A los sitios con las mayores medias de concentraciones (Tabla 2, Figura 3). Estos resultados en gran medida pueden explicarse por la intensidad de las actividades antrópicas incluyendo el enriquecimiento de dietas a base de Se (Hoya-Flórez *et al.*, 2022), pero también por procesos biogeoquímicos como la meteorización de rocas (Terrazas-López *et al.*, 2019; Torres *et al.*, 2020).

Al respecto, es importante destacar el aporte de Baragaño *et al.* (2022) quienes explican que las concentraciones anormales de Se están influenciadas por la alteración de los ciclos naturales de la tierra, siendo inducido principalmente por la minería. Por ejemplo, durante la perforación del suelo, algunos materiales geológicos incluido el skarn magnésico, skarn cárlico y la caliza

masiva, pueden provocar lixiviados enriquecidos con Se, y la interacción agua-roca que se produce durante el proceso de drenaje puede favorecer el aumento de las concen-

traciones y su movilidad en los cuerpos de agua. En la Tabla 3 se presentan algunos estudios que informan concentraciones de Se en peces de diferentes regiones del mundo.

Tabla 2.

Resultados del ANOVA para las concentraciones de selenio comparadas entre los sitios de muestreo

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	p - valor
Tratamientos	24.66	5	4.932	0.001
Residuos	19.43	157	0.1238	
Total	44.09	162		

Fuente: autores.

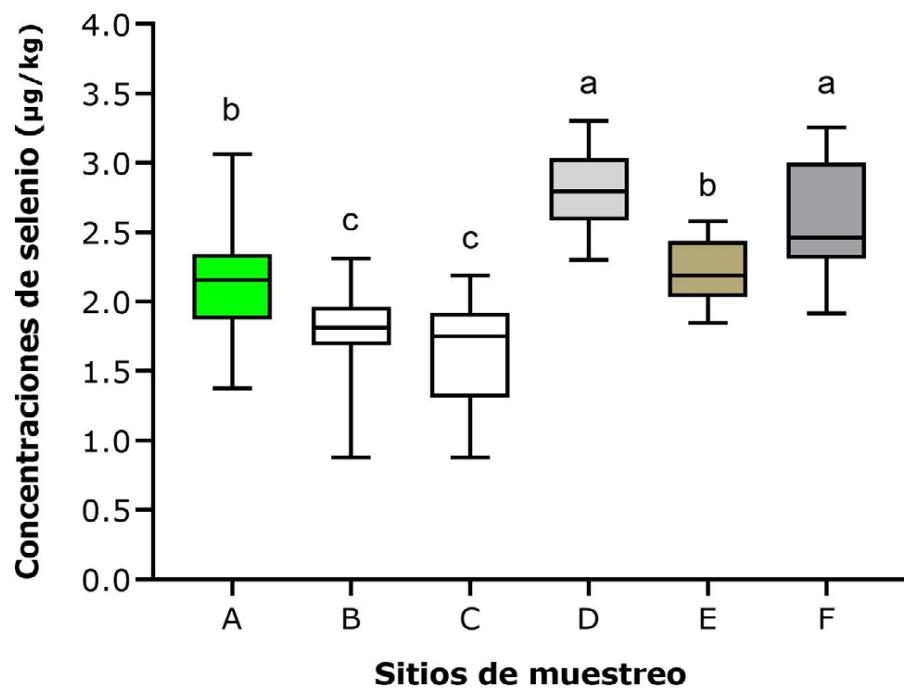


Figura 3. Comparación de las concentraciones medias (logaritmo natural) de selenio usando el test de ANOVA para los seis sitios de muestreo

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. A (Ciénaga de Ayapel), B (Embalse El Guájaro), C (Río Ranchería), D (Embalse El Cercado), E (Ciénaga de Unguía), F (Riosucio).

Fuente: autores.

Tabla 3.

Comparación de concentraciones de selenio en peces en diferentes partes del mundo

Especies	n	Se ($\mu\text{g/kg}$)	País	Referencia
<i>Prochilodus magdalenae</i>	17	223	Colombia	Alcalá-Orozco <i>et al.</i> (2020)
<i>Caquetaia kraussii</i>	2	334	Colombia	
<i>Hoplias malabaricus</i>	5	305	Colombia	
<i>Hemiodus unimaculatus</i>	6	145	Brasil	da Silva <i>et al.</i> (2013)
<i>Semaprochilodus insignis</i>	15	27.0	Brasil	Lino <i>et al.</i> (2018)
<i>Leporinus friderici</i>	3	28.0	Brasil	
<i>Leiarius marmoratus</i>	6	22.0	Brasil	
<i>Hoplias malabaricus</i>	ND	0.7	Argentina	Villalba, (2021)
<i>Bryconamericus iheringii</i>	ND	1.2	Argentina	
<i>Rhamdia quelen</i>	ND	1.4	Argentina	
<i>Grass carp</i>	ND	0.14	China	Yang <i>et al.</i> (2021)
<i>Crucian carp</i>	ND	0.22	China	
<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	ND	0.15	China	
<i>Prochilodus magdalenae</i>	13	194	Colombia	Este estudio
<i>Caquetaia kraussii</i>	28	434	Colombia	
<i>Hoplias malabaricus</i>	26	376	Colombia	

ND=no disponible

Fuente: autores.

4

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirmaron la presencia Se en el músculo de especies ícticas en elevadas concentraciones. El 27% de las muestras, equivalentes a 84 individuos, superaron el valor máximo sugerido (400 µg/kg/día) para el consumo humano establecido por el Ministerio de la Protección Social. Las mayores concentraciones se observaron en peces carnívoros, en comparación con los no carnívoros. En general, los hallazgos de este estudio sugieren que la exposición a altas concentraciones de

Se, con el tiempo, podría convertirse en un problema de salud pública y ambiental. En consecuencia, futuros estudios deberían determinar si el exceso de Se en los peces está relacionado con procesos biogeoquímicos o con actividades humanas, con el fin de implementar medidas preventivas adecuadas. Hasta donde sabemos, este es el primer estudio que compila información sobre las concentraciones de Se en un amplio número de especies y localidades de Colombia.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Camila Padilla Ramírez: investigación, conceptualización, análisis de información, escritura. **Leonomir Córdoba-Tovar:** análisis y diseño estadístico, escritura, revi-

sión y edición. **José Luís Marrugo-Negrete:** investigación, supervisión y adquisición de recursos, análisis de información y revisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba, Montería, por su valioso apoyo financiero y logístico. También queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las

personas de las comunidades en las que se llevaron a cabo los muestreos, por su colaboración y disposición, que han sido esenciales para el éxito de nuestra investigación.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Córdoba a través del proyecto con código FBC-01-19.

LITERATURA CITADA

Al-Saleh, I., Al-Rouqi, R., Obsum, C. A., Shinwari, N., Mashhour, A., Billedo, G., Al-Sarraj, Y., & Rabbah, A. (2015). Interaction between cadmium (Cd), selenium (Se) and oxidative stress biomarkers in healthy mothers and its impact on birth anthropometric measures. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218(1), 66–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.08.001>

Alcalá-Orozco, M., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2020). Biomonitoring of Mercury, Cadmium and Selenium in Fish and the Population of Puerto Nariño, at the Southern Corner of the Colombian Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 79(3), 354–370. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00761-8>

Ali, H., & Khan, E. (2018). Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. *Environmental Chemistry Letters*, 16(3), 903–917. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0734-7>

Amlund, H., Lundebye, A. K., Boyle, D., & Ellingsen, S. (2015). Dietary selenomethionine influences the accumulation and depuration of dietary methylmercury in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquatic Toxicology*, 158, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.11.010>

Arcagni, M., Campbell, L., Arribére, M., Marvin-DiPasquale, M., Rizzo, A., & Ribeiro, S. (2013). Differential mercury transfer in the aquatic food web of a double basined lake associated with selenium and habitat. *Science of the Total Environment*, 470–471, 170–180. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.008>

Argumedo, C., & Deluque, H. (2015). Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha , La Guajira , Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 123–131. <https://www.semanticscholar.org/reader/ab57aaf3ef30993ddeb6adca13cd8ceb-18c0a957>

Baragaño, D., Berrezueta, E., Fernández, E., y Gallego, J. L. R. (2022). Aplicación de

la geoquímica ambiental a la gestión de aguas enriquecidas en selenio en explotaciones auríferas subterráneas. *Geogaceta*, 71, 83–86. <https://doi.org/10.55407/geogaceta99926>

Burk, R., & Hill, K. (2015). Regulation of Selenium Metabolism and Transport. *Annual Review of Nutrition*, 35(1), 109–134. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071714-034250>

Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Negrete, J., Barón, P. R., & Díez, S. (2022). Drivers of biomagnification of Hg, As and Se in aquatic food webs: A review. *Environmental Research*, 204(October 2021), 112226. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112226>

Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Negrete, J., Ramos Barón, P. A., Calao-Ramos, C. R., & Díez, S. (2023). Toxic metal(loids) levels in the aquatic environment and nuclear alterations in fish in a tropical river impacted by gold mining. *Environmental Research*, 224(February), 115517. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115517>

Cruz-Esquivel, Á., Díez, S., & Marrugo-Negrete, J. L. (2023). Genotoxicity effects in freshwater fish species associated with gold mining activities in tropical aquatic ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253(February), 114670. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114670>

da Silva, D., Lucotte, M., Paquet, S., Brux, G., & Lemire, M. (2013). Inverse mercury and selenium concentration patterns between herbivorous and piscivorous fish

in the Tapajos River, Brazilian Amazon. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 97, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.06.025>

Espejo, W., Padilha, J. de A., Kidd, K. A., Dorneles, P., Malm, O., Chiang, G., & Celis, J. E. (2020). Concentration and Trophic Transfer of Copper, Selenium, and Zinc in Marine Species of the Chilean Patagonia and the Antarctic Peninsula Area. *Biological Trace Element Research*, 197(1), 285–293. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01992-0>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Fish and seafood consumption per capita, 2021*. <https://ourworldindata.org/grapher/fish-and-seafood-consumption-per-capita>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano*. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>

Farzad, R., & Andrade, J. (2022). Selenium and Mercury toxicity: the tale of fish. *Edis*, 2–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.32473/edis-FS437-2022>

FishBase. (2024). *FisBase*. FishBase-SeaLifeBase Symposium: 30 Years of FishBase -15 Years of SeaLifeBase. <https://www.fishbase.se/search.php>

Fuentes-Gandara, F., Pinedo, J., y Marrugo, J. (2018). Metales pesados en especies ícticas de la ciénaga de Mallorquín, Colombia. *Espacios*, 39(3).

Hoya-Flórez, J., Estrada-Posada, A., y Yepes, J. A. (2022). Uso del selenio en organismo acuáticos. Una revisión. *Intertropical*, 17(1), 97–113. <https://doi.org/10.21676/23897864.4546>

Johnson, R. C., Stewart, A. R., Limburg, K. E., Huang, R., Cocherell, D., & Feyrer, F. (2020). Lifetime Chronicles of Selenium Exposure Linked to Deformities in an Imperiled Migratory Fish. *Environmental Science & Technology* Vol 54(5). 2892-2901. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06419>

Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R., & Malm, O. (2018). Mercury and selenium in fishes from the Tapajós River in the Brazilian Amazon: An evaluation of human exposure. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 48(2010), 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.04.012>

Luo, H., Yang, Y., Wang, Q., Wu, Y., He, Z., & Yu, W. (2020). Protection of *Siganus oramin*, rabbitfish, from heavy metal toxicity by the selenium-enriched seaweed *Gracilaria lemaneiformis*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206(March), 111–183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111183>

Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2015). Geochemistry of mercury in tropical swamps impacted by gold mining. *Chemosphere*, 134,

44–51. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.012>

Marrugo-Negrete, J., Rodríguez-Espinosa, P. F., Godwyn-Paulson, P., Paternina-Uribe, R. J., Ibarguen Amud, M. Y., Rosso-Pinto, M., Enamorado-Montes, G., Urango-Cárdenas, I., Gutiérrez-Mosquera, H., Salas-Moreno, M. H., Salazar-Camacho, C., Córdoba-Tovar, L., Ospino, J. C., Bolívar, W. M., Arbeláez, J. D., Valdés, S. M., Varela, R. D., & Jonathan, M. P. (2023). Detecting mass sediment transport and movement tainted by decades of mining activities in river Quito, Western Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 394(February), 136293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136293>

McCormack, M. A., Jackson, B. P., & Dutton, J. (2020). Relationship between mercury and selenium concentrations in tissues from stranded odontocetes in the northern Gulf of Mexico. *Science of the Total Environment*, 749, 141350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141350>

Ngaisyah, D., & Rohman, A. (2019). Effect of Fish Consumption as a Local Food Alternative for the Reduction of Stunting in Toddlers. *Pakistan Journal of Nutrition*, 18(5), 496–500. <https://doi.org/10.3923/pjn.2019.496.500>

Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2018). Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Chocó biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160>

Paschoalini, A. L., & Bazzoli, N. (2021). Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquatic Toxicology*, 237(July), 105906. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105906>

Perdomo, J., & Furlong, K. (2022). Producing mining territories: The centrality of artisanal and small-scale gold mining in Colombia from colonization to the present. *Geoforum*, 137(December), 22–31. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.10.001>

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2022). A human health risk assessment of methyl-mercury , arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research Journal*, 212(November 2021), 113120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113120>

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021). Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*, 264, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128478>

Schneider, L., Maher, W. A., Potts, J., Taylor, A. M., Batley, G. E., Krikowa, F., Chariot, A. A., & Gruber, B. (2015). Modeling food web structure and selenium biomagnification in lake macquarie, New South Wales, Australia, using stable carbon and nitrogen isotopes. *Environmental Tox-*

icology and Chemistry, 34(3), 608–617. <https://doi.org/10.1002/etc.2847>

Terrazas-López, R., Arreola-Mendoza, L., Galván-Magaña, F., Sujitha, S. B., & Jonathan, M. P. (2019). Understanding the antagonism of Hg and Se in two shark species from Baja California South, México. *Science of the Total Environment*, 650, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.261>

Torres, J., Colina, M., Cano, Y., Rivas, Z., y Andrade, C. (2015). Concentración de selenio en agua y en fracciones de sedimentos del río Catatumbo. *Multiciencias*, 15(2), 163–171. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90443048006>

Torres, J., Sanquiz, M., y Ávila, H. (2020). Evaluación de las concentraciones totales de selenio en agua , sedimento y tejidos de peces del río Catatumbo , Venezuela durante los años 2001-2002. *Acta Oceanográfica Del Pacífico*, 2(June 2019), 17–37. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/648/6482950003/%0AAbstract>:

United State Environmental Protection Agency (USEPA). (2007). Environmental Protection Agency Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. In *Tetrahedron*.

Villalba, M. (2021). *Las concentraciones de mercurio y arsénico en peces del embalse Río Tercero podrían afectar la salud de quienes los consumen*. UNCiencia. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/19906>

Vinchira, J., y Muñoz-Ramírez, A. (2010). Selenio: Nutriente objetivo para mejorar la composición nutricional del pescado cultivado. *Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 48–64.

Yang, L., Guo, M., Xin, C., Ren, X., Wang, L., & Liu, Y. (2021). Comparison of trace element concentrations in freshwater fish and marine fish consumed in Shandong Province, China, and their potential

risks to human health. *Marine Pollution Bulletin*, 165(18877), 112114. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112114>

Zhu, C., Liu, Q., Wang, Y., Wang, X., Ma, Y., Yang, F., Dong, W., & Ji, H. (2024). A screening for optimal selenium enrichment additives for selenium-enriched fish production: Application of a HPLC-ICP-MS method. *Food Chemistry: X*, 21(July 2023), 101088. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101088>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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



EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN (CARTAGENA, COLOMBIA) APLICANDO TÉCNICAS ESTADÍSTICAS MULTIVARIADAS

WATER QUALITY ASSESSMENT OF CIÉNAGA DE LA VIRGEN (CARTAGENA, COLOMBIA) APPLYING MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES

Ilddefonso Baldiris-Navarro¹

Juan C. García-Ojeda²

José Herrera Franco³

Martha Torres Virviescas⁴

Renzo Herrera-Hoyos⁵

¹ Magister en Ingeniería, Estudiante de Doctorado en Ingeniería, Universidad de Cartagena.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-3710>

ibaldirisn@unicartagena.edu.co

² PhD. Information Science and Technology, Universidad de Cartagena.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3148-0436>

jcgarciao@unicartagena.edu.co

³ Magíster en Ciencias Ambientales, secretaria Educación de Cartagena.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6065-5943>

ambientaltecno@gmail.com

⁴ Magíster en Ciencias del Mar, Universidad del Sinú.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1914-0583>

biologiamarina@unisinucartagena.edu.co

⁵ Médico general, Universidad de Cartagena.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9239-6632>

rerrerah1@unicartagena.edu.co

RESUMEN

Contextualización: el agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida y es el que más está siendo afectado diariamente por las comunidades alejadas a los cuerpos de agua.

Vacío de conocimiento: las autoridades ambientales utilizan muy poco el análisis estadístico multivariado para el estudio de la calidad de agua de las regiones, lo cual es una herramienta importante para la toma de decisiones ambientales.

Propósito: determinar la variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen mediante el empleo de métodos estadísticos multivariados (PCA, Clúster y matriz de correlaciones) a datos colectados desde el año 2009 hasta 2017. Con esto se dará una línea base para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales de la ciudad para el mejor mantenimiento de este ecosistema.

Metodología: las muestras fueron tomadas en la Ciénaga de la Virgen en Cartagena de manera mensual, llevadas al laboratorio y analizadas para amonio (NH_4^+), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuel-

to (OD), pH, fósforo total (TP), salinidad, coliformes totales (TC), coliformes fecales (FC), sólidos suspendidos totales (SST). A los datos colectados se le aplicaron análisis multivariados como matriz de correlación, análisis de componentes principales, comparación con diagramas de cajas y bigotes y análisis clúster.

Resultados y conclusiones: el análisis multivariado de los datos obtenidos evidencia diferentes comportamientos de la calidad del agua en la ciénaga y los factores de contaminación más fuertes se da por altos niveles de DBO_5 y coliformes totales y fecales, ambos factores relacionados con aguas residuales y residuos sólidos. La mayor contaminación en la ciénaga es causada por la comunidad y sus residuos sólidos que son arrojados a la ciénaga, por ello es necesario iniciar jornadas de sensibilización de la comunidad cartagenera en temas de cuidado del agua para poder preservar este recurso hídrico tan importante para la ciudad.

Palabras claves: análisis clúster, análisis de componentes principales, calidad de agua, Ciénaga de la Virgen, estadística multivariada

ABSTRACT

Contextualization: Water is one of the most important natural resources for life and is most impacted daily by the communities surrounding the bodies of water.

Knowledge gap: Environmental authorities rarely use multivariate statistical analyzes to examine regional water quality, which is an important tool for environmental decision-making.

Purpose: To determine the variation of the water quality of the Ciénaga de la Virgen using multivariate statistical methods to data collected from the year 2009 to 2017.

Methodology: the samples were taken in the Ciénaga monthly, then in the laboratory the concentrations of Ammonium (NH_4^+), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Oxygen (DO), pH, Total Phosphorus (TP), Salinity, Total Coliforms (TC), fecal coliforms (FC), total suspended solids (TSS)

were analyzed. Multivariate analyzes such as correlation matrix, principal component analysis, boxplots, and cluster were applied to the collected data.

Results and conclusions: Multivariate data analysis showed different behaviors of water quality around the coastal lagoon and the strongest contamination factors are high levels of BOD_5 and total and fecal coliforms. Both factors related to wastewater and solid waste. Conclusions: the greatest contamination in the swamp is caused by the community and its poorly treated waste, it is necessary to start awareness days in the Cartagena community on issues of water care to preserve this important water resource for the city.

Keywords: Ciénaga de la Virgen, cluster análisis, multivariate statistics, principal component analysis, water quality

RESUMEN GRÁFICO

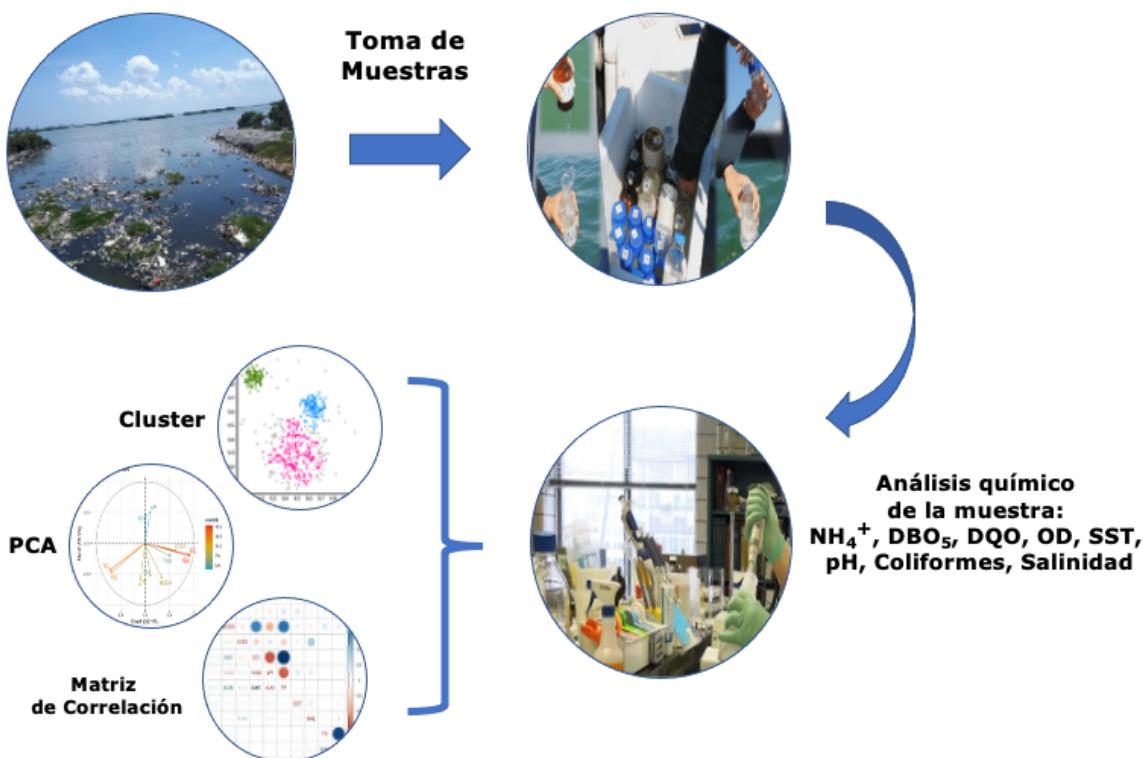


Diagrama de los procesos del desarrollo del estudio

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento transcendental para el avance de la sociedad a nivel mundial. La calidad de los cuerpos de agua, hoy día, se ha visto deteriorada debido a la sobre población y la industrialización que han traído consigo una producción elevada de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales afectan las propiedades del agua

de las reservas hídricas (Loi *et al.*, 2022). Uno de los problemas más frecuentes en los cuerpos de agua es el alto contenido de nutrientes como el nitrógeno (nitratos, nitrito y amonio) y el fósforo en forma de fosfatos, los cuales llevan a un problema llamado eutrofización (Xiong *et al.*, 2022; Zamora-López *et al.*, 2023). La Ciénaga de

La Virgen (CV), que es una laguna costera de Cartagena, presenta altos niveles de polución antrópica debido a la pésima disposición final de las aguas servidas de la ciudad, ya que dichos vertimientos llegan a la ciénaga sin tratamiento previo. Aproximadamente el 35% de las aguas servidas eran vertidas en la Bahía de Cartagena y el 65% dispuestas en la ciénaga (Martin y Urrea, 2016).

Para el año 2001, debido a los altos niveles de contaminación, el gobierno nacional y la empresa Holandesa Royal Haskoning lanzaron el proyecto de la bocana estabilizada de la ciénaga (Moor *et al.*, 2002) que pretendía mejorar las propiedades del agua y el entorno. Este programa comprendió la fabricación de una conexión artificial entre la ciénaga y el mar para aumentar el intercambio de agua de una forma más eficiente, con el objetivo de que el agua marina descontaminara la ciénaga al mismo tiempo que optimizara la concentración de oxígeno disuelto y la salinidad, logrando con ello recuperar su capacidad de auto regeneración y mejorando las propiedades del agua (Maldonado *et al.*, 2011).

Posteriormente, se planteó el plan maestro del alcantarillado de Cartagena, cuya finalidad fue la eliminación de los vertimientos a la bahía y a la ciénaga por medio de una descarga al mar llamada Emisario Submarino (Palomino y Serge, 2015). El Proyecto del emisario submarino permitiría en teoría recuperar aproximadamente 15.000 hectáreas de áreas estuarinas en los cuerpos de agua, lo que posibilitaría un ecosistema marino biológicamente más sano.

La alcaldía de Cartagena es la encargada del control y seguimiento de las condiciones

de la ciénaga una vez terminaron los trabajos de construcción del proyecto Bocana. Las variables monitoreadas para evaluar la efectividad del sistema son pH, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), amonio, fósforo total (TP), coliformes totales (CT) y fecales (CF).

Varios autores han aplicado diferentes técnicas estadísticas multivariadas con éxito en la valoración del agua de diferentes escenarios, y subrayaron la necesidad y utilidad de estas técnicas estadísticas para la interpretación de complejos conjuntos de datos, identificación de las fuentes de contaminación y la identificación de las variaciones temporales-espaciales en las propiedades del agua para la buena gestión de los recursos naturales (Karangoda y Nanayakkara, 2023; Varol, 2020; Kherifi *et al.*, 2019; Bodrud-Doza *et al.*, 2019; Howladar *et al.*, 2021). Las autoridades ambientales en la ciudad de Cartagena solo aplican técnicas de estadística descriptiva para el estudio de las condiciones de los recursos hídricos, aunque visualmente es poderosa, esta se queda corta para decidir adecuadamente en el manejo administrativo de los cuerpos de agua ya que no explica qué variables o qué fuentes tienen mayor efecto en las propiedades del recurso hídrico. El objetivo de este artículo es el análisis estadístico multivariado de las propiedades de agua de la Ciénaga de La Virgen desde el año 2009 hasta el 2017, con lo cual se dará una línea base para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales de la ciudad para el mejor mantenimiento de este ecosistema.

② MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Ciénaga de La Virgen es considerada un humedal prioritario, está ubicada en Cartagena de Indias en el departamento de Bolívar. La ciénaga se encuentra ubicada en la zona norte de la ciudad, en las coordenadas 10° 26' 45" Norte y 75° 29' 40" Oeste (Figura 1). El estuario abarca 2989 ha, tiene una forma triangular, estrecha al norte y ancha en el sur, con ancho máximo de 4.5 km y una

extensión de unos 7 km. Cuenta con profundidades de hasta 1,2 m y está cercada por la red de drenajes de la ciudad (Grisales *et al.*, 2014). Esta cuenta con un clima tropical semiárido, con una época seca de diciembre a abril y lluviosa de mayo a noviembre (Betancur y Rivero, 2020). El monitoreo en la ciénaga consta de diez estaciones previamente georeferenciadas (Figura 1).

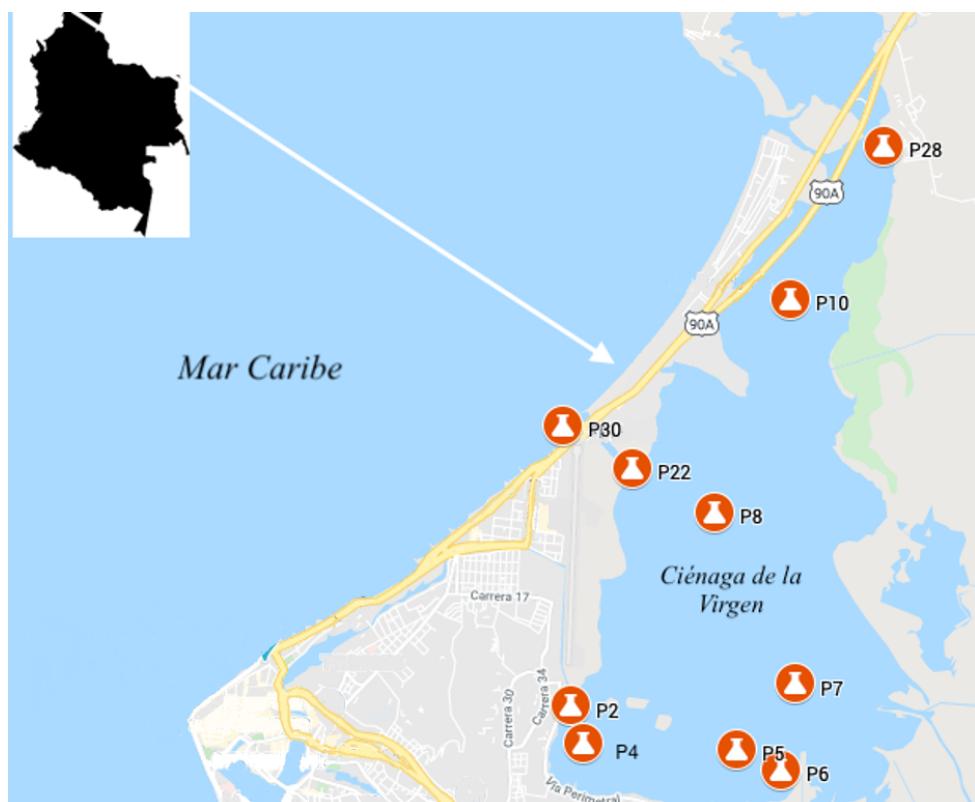


Figura 1. Puntos de toma de muestra en Ciénaga de la Virgen

Fuente: autores.

Las muestras fueron tomadas mensualmente y llevadas al laboratorio donde se evaluaron los parámetros de acuerdo con lo establecido por los métodos estándar de APHA. Se tomaron muestras *in situ* con la ayuda del equipo multiparámetro, para los ensayos de laboratorio las muestras se preservaron, luego se depositaron en recipientes de color ámbar y refrigeradas para su posterior análisis.

Métodos analíticos

Los parámetros seleccionados fueron: oxígeno (DO), coliformes totales (TC), pH, agua temperatura (T), demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), nitrato (NO₃⁻), fósforo total (P), sólidos suspendidos totales (TSS), salinidad (Sal) y amonio (NH₄⁺). La temperatura, pH, salinidad y concentraciones de OD se midieron *in situ* mediante el uso del multiparámetro portátil HACH sesión 5465011, respectivamente. La DBO5 fue determinada por el método Winkler y SST se determinaron gravimétricamente a 105-110 °C. NO₃⁻ y P, fueron analizados por el método espectrofotométrico de reducción de cadmio y ácido ascórbico usando un espectrofotómetro Varian Cary 100 UV-vis, respectivamente. Para determinar el número de unidades formadoras de colonias, por 100 ml (ufc / 100 mL) de coliformes totales en el agua de muestreo se utilizó el método de filtración por membranas (Baldiris-Navarro *et al.*, 2019; Rice *et al.*, 2017; APHA, 2014).

Análisis estadísticos

Matriz de correlación

Una matriz de correlación es una herramienta que evalúa la relación existente entre dos o más variables. Esta herramienta define la correlación de Pearson entre cada pareja de variables. El coeficiente de correlación varía entre -1 y +1, y mide la relación lineal entre las variables. Cuando el coeficiente de correlación es positivo cercano a +/-1 hay una alta relación entre las variables, si el factor tiende a cero la relación es nula, si el factor es positivo la relación es directamente proporcional, de otra manera es inversamente proporcional (Sun *et al.*, 2019; Kothari *et al.*, 2021).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica de aprendizaje no supervisado para la reducción de variables, no depende de la no-homogeneidad en la muestra de datos, de los valores perdidos y de las tendencias en la información. También, identifica variaciones temporales en las propiedades del agua y el efecto de los diferentes factores sobre ella. La técnica PCA permite extraer los parámetros más relevantes en una estación contaminada (Krishnaraj y Deka, 2020; Ibrahim *et al.*, 2023; Alam *et al.*, 2021).

PCA es un método de reducción que logra disminuir la cantidad de variables originales

consideradas para el estudio, perdiendo la menor información posible. Las nuevas variables se formulan como una combinación lineal de las variables iniciales. El PCA tiene validez una vez se verifica que existe una correlación entre las variables, si no fuera así el análisis carecería de valor. Para escoger el número de componentes se puede usar el criterio del valor propio donde se escogen los componentes con valores mayores a la unidad. Para escoger los parámetros que más influyen en un componente se toman aquellos que tengan cargas mayores a 0.4 (Barakat *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018; Roy *et al.*, 2024).

Análisis clúster

El análisis clúster es una técnica no supervisada cuya intención es agrupar objetos basados en sus características. Este catalo-

ga los objetos para que cada uno sea similar a los demás en el grupo con respecto a un criterio de selección predeterminado. Los grupos resultantes de los objetos deben exhibir una alta homogeneidad dentro del grupo y alta disparidad con los demás grupos. La agrupación jerárquica aglomerativa (HAC) es el método más común, el cual suministra relaciones de similitud sospechada entre cualquier elemento de una muestra y el conjunto total de datos, y se esquematiza con un dendrograma. Este último es una herramienta visual que permite diferenciar fácilmente los grupos dentro del conjunto de datos. En este artículo se utilizó el método de Ward para calcular la distancia entre los grupos y la distancia euclíadiana cuadrada para medir la similitud entre los grupos (Liu y You, 2023; Ganguli *et al.*, 2022; Mazari-Hiriart *et al.*, 2024).

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Matriz de correlación

Con esta herramienta se evaluó la relación existente entre las variables monitoreadas en la ciénaga. El p-valor es el del test de significancia estadística de la correlación estimada entre dos variables. Los p-valores por debajo de 0.05 indica una correlación significativa diferente de cero con un nivel de confianza

del 95%. Los siguientes pares de variables tuvieron p-valores por debajo de 0.05: NH_4^+ -DBO; DBO-DO; DBO-pH; DBO-TP; DQO-SAL; DO-pH; DO-TP; pH-TP y CT-CF. La Tabla 1 evidencia que los puntos en negrillas y de mayor valor son correlaciones fuertes entre las variables, como por ejemplo pH con fósforo total (TP).

Tabla 1.

Matriz de Correlación de variables estudiadas

	NH₄⁺	DBO₅	DQO	OD	pH	PT	SST	SAL	CT	CF
NH₄⁺	1.000									
DBO₅	0.27	1.000								
DQO	0.00	-0.14	1.000							
OD	0.00	0.67	-0.2	1.000						
pH	-0.13	-0.36	0.15	-0.63	1.000					
PT	0.17	0.74	-0.22	0.97	-0.61	1.000				
SST	0.15	0.11	0.09	0.04	0.14	0.05	1.000			
SAL	0.07	-0.1	0.33	0.03	0.11	0.02	0.12	1.000		
CT	0.08	0.17	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	1.000	
CF	0.05	0.12	0.05	0.02	0.05	0.02	0.07	-0.12	0.91	1.000

Fuente: autores.

Las relaciones entre algunas variables pueden evidenciarse mejor en la Figura 2. El fósforo y la DBO₅ presentan relación directa fuerte debido al hecho de que la mayor fuente de fósforo son las aguas residuales que conllevan al aumento de la DBO₅. La demanda química de oxígeno se ve relacionada directamente de manera moderada por el aumento o disminución de la salinidad, esto va en relación con la época del año (lluvioso o seco). La relación positiva fuerte entre el fósforo y el oxígeno disuelto es causada por el aumento de los nutrientes en aguas residuales, las cuales durante el día incremen-

tan el contenido de microalgas y estas por el proceso de la fotosíntesis aumentan los niveles de oxígeno disuelto. La DBO₅ y el OD, aunque su relación debe ser inversa puede mostrar este valor por la presencia de algas y microalgas que aumentan el valor del oxígeno disuelto por efecto de la fotosíntesis. De manera similar, la relación fuerte e inversa del oxígeno disuelto con el pH puede ser causada por el ingreso de aguas residuales que bajan el pH del agua y a su vez aumentan el contenido de microalgas lo que ocasiona un aumento de la concentración del oxígeno durante el día.

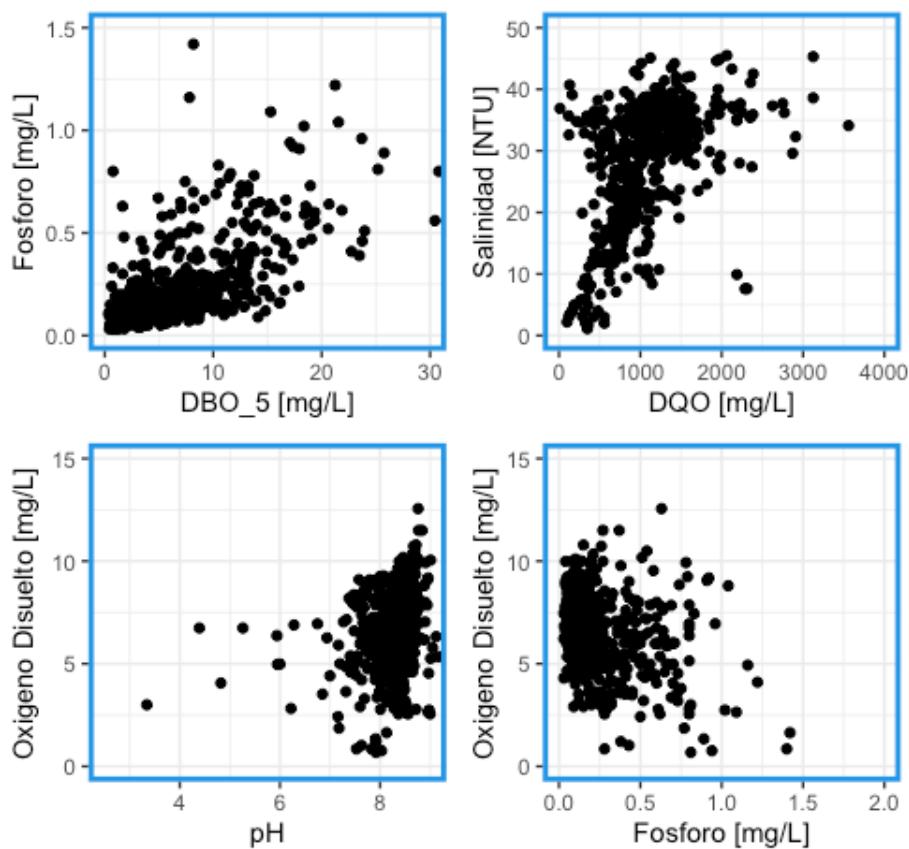


Figura 2. Correlaciones de variables

Fuente: autores.

Las variables coliformes totales y fecales varían directamente ya que ambas son generadas por las mismas bacterias presentes en aguas residuales. Con estos resultados de correlaciones entre las diferentes variables se evidencia la pertinencia del uso del análisis de componentes principales al dataset del cuerpo de agua.

Análisis de componentes principales

El estadístico de Kaiser–Meyer–Olkin

(KMO) tuvo un valor de 0.65 (>0.5), lo que indica que es viable aplicar el método de componentes principales al set de datos. Además, el test de esfericidad de Bartlett con un nivel de significancia menor a 0.05 indica que el análisis PCA puede ser utilizado en este caso, como lo expresa Tripathi y Singal (2019) en el trabajo realizado para analizar los índices de calidad de agua en el río Ganga, India. La Figura 3 muestra la gráfica de sedimentación que indica el número de componentes principales de la matriz de

datos estudiada. La línea punteada indica un valor de eigenvalor igual a 1. Los componentes con eigenvalor mayor a 1 se escogen, los que tengan eigenvalores menores a 1 se

desechan. La Figura 3 indica que del set de datos se pueden obtener tres componentes principales con eigenvalores mayores a 1.

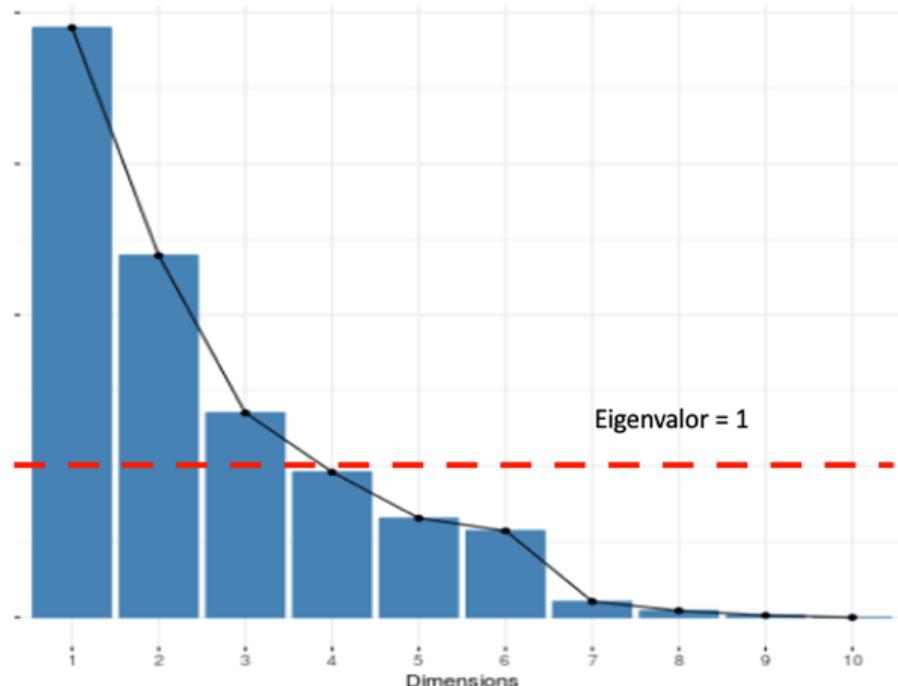


Figura 3. Gráfica de sedimentación análisis PCA

Fuente: autores.

Analíticamente, se escogen los componentes principales que tengan eigenvalores mayores a la unidad. Es así como solo se

escogieron los tres primeros componentes para el análisis de la información (Tabla 2).

Tabla 2.

Eigenvalores de los datos experimentales

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Eigenvalores	1.975	1.547	1.163	0.980	0.809	0.756	0.323
Aporte a varianza	0.390	0.239	0.135	0.096	0.065	0.057	0.010
Acumulativo (%)	39	62.9	76.4	86	92.6	98.3	99.4

Fuente: autores.

En la Tabla 2 puede observarse que el PC1 explica el 39% de la variación en la información, el PC2 explica el 23.9% y el PC3 explica el 13.5% del total de la varianza, estos tres componentes explican el 76.4% de la variación total de los datos.

En la Tabla 3 se aprecian los pesos de cada variable en cada uno de los componentes principales. Se tomaron las variables con pe-

sos mayores a 0.4 los cuales fueron resaltados en la Tabla 3. Para el componente uno (PC1) que explica el 39% de la varianza puede evidenciarse que tiene una carga positiva moderada por el contenido de amonio, los coliformes totales y los coliformes fecales, este factor representa la contaminación por aguas residuales con alto contenido de heces fecales que son vertidas por las comunidades cercanas a la ciénaga.

Tabla 3.

Pesos de las variables medidas en los componentes

	PC1	PC2	PC3
Amonio	0.476	-0.039	0.117
DBO ₅	0.319	-0.018	-0.439
DQO	-0.273	-0.258	-0.263
Oxígeno disuelto	-0.098	-0.320	-0.558
pH	0.116	0.535	-0.241
Fósforo total	0.387	-0.006	-0.538
SST	0.048	-0.425	-0.036
Salinidad	-0.273	-0.435	0.018
Coliformes totales	0.436	-0.231	0.208
Coliformes fecales	0.439	-0.342	0.241

Fuente: autores.

En la Tabla 3 se puede observar en negrillas que el componente principal dos (PC2) tiene una contribución positiva alta por el pH y una contribución moderada negativa por los sólidos suspendidos totales y por la salinidad, este factor puede ser atribuido a la entrada de minerales a la ciénaga por efecto de las mareas. El componente principal tres (PC3) tiene alta carga negativa por oxígeno disuelto y fósforo total, además tiene una carga moderada negativa por DBO₅, estos factores orgánicos indican principalmente las fuentes puntuales de contaminación de las aguas residuales do-

mésticas y residuos sólidos de alto contenido orgánico que son arrojados al cuerpo de agua (Ali Abed *et al.*, 2019).

Análisis clúster

El objetivo del análisis de conglomerados (CA) es ensamblar objetos (en este caso, puntos de toma de muestra) en agregaciones basadas en sus similitudes y variables o características interdependientes. El análisis arrojó los clústeres de puntos graficados en la Figura 4.

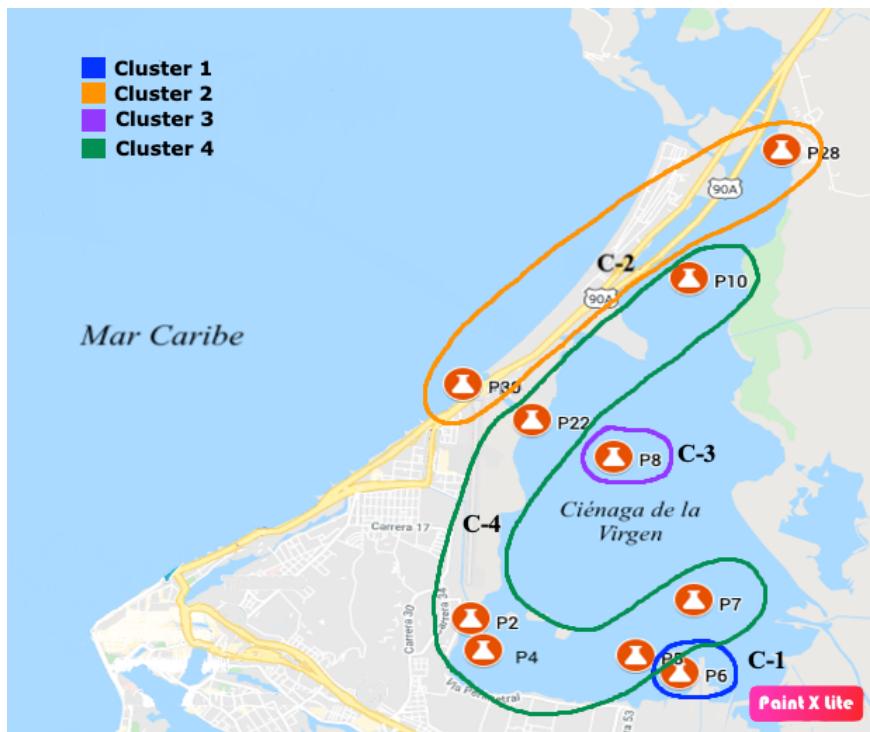


Figura 4. Resultado del análisis clúster

Fuente: autores.

El análisis clúster diferenció cuatro agrupaciones para el cuerpo de agua de acuerdo con la base de datos. El clúster 1 de muy alta contaminación está conformado solo por el punto 6; el clúster 2 que es de contaminación baja está conformado por el punto 28 y 30; el clúster 3 de alta polución está conformado por el punto 8; y el clúster 4 de contaminación moderada a alta está formado por los puntos 2, 4, 5, 22, 7 y 10. Se procedió a comparar por medio de boxplots las variables DBO_5 , coliformes totales (CT) y fósforo total (PT) en los clústeres, tomando para el clúster 1 el punto

6, para el clúster 2 el punto 30, para el clúster 3 el punto 8 y para el clúster 4 el punto 2.

El clúster 1 fue el que mostró valores más altos de DBO_5 , lo que indica mayores valores de contaminación por materia orgánica, lo mismo que para coliformes totales y fecales (Figura 5). Ambas variables están relacionadas con altas descargas de aguas residuales domésticas e industriales no tratadas como es lo expuesto por Fraga *et al.* (2020). El punto 6 (clúster 1) es el más afectado por las aguas residuales y residuos sólidos transportados por caños que descargan en la Ciénaga de La Virgen.

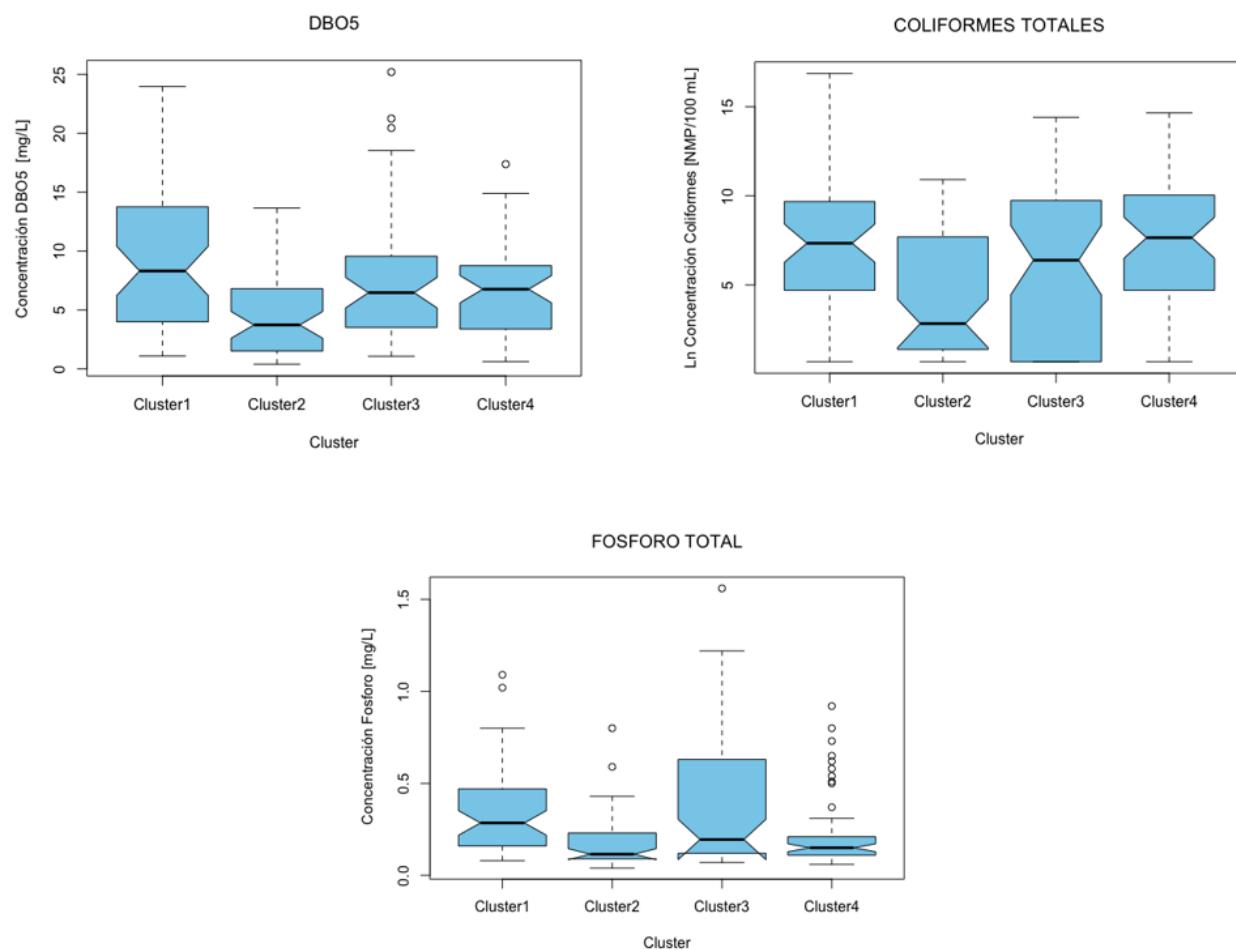


Figura 5. Comportamiento de DBO5, coliformes totales y fósforo por cluster

Fuente: autores.

El clúster 2 se caracteriza por estar alejado de la fuente antropogénica, ambos puntos tienen poco contacto con las poblaciones y sus vertimientos. Este clúster es el que presenta valores más bajos para DBO₅, CT y nutrientes. Los comportamientos son similares a los reportados por el trabajo de Angello *et al.* (2020) en el río Little Akaki, Etiopía.

El clúster 1 y 4 con mayores valores de coliformes (Figura 5), son aquellos puntos de toma de muestra que se encuentran en desembocaduras de grandes canales de re-

colección de aguas residuales domésticas e industriales. El clúster 3 representa geográficamente el centro de la ciénaga donde se dan valores moderados de DBO₅ y coliformes, también evidencia altos valores de nutrientes, lo cual puede ser causado por acumulación de estos contaminantes que están próximos a salir de la ciénaga debido a los cambios de marea. Todos los puntos de muestreo tienen valores altos de coliformes que pueden representar una amenaza para la salud humana (Figura 5). La media de los coliformes estuvo alrededor de los 1800 NMP/100 mL,

datos similares a estos fueron obtenidos por Fulke et al (2024), sugiriendo que es urgente tomar medidas de contención sobre la contaminación para proteger la salud pública y al ecosistema.

El clúster 4, es el que mayor cantidad de puntos agrupa, teniendo como características moderados niveles de DBO_5 , además de altos niveles de sólidos y coliformes. Este clúster también se ve afectado en menor proporción por caños pequeños que vierten aguas residuales a la ciénaga.

En cuanto al comportamiento del fósforo, este presenta valores de un estado eutrófico y hasta hipertrófico en el cuerpo de agua, lo

que según lo expuesto por los autores en Lencha *et al.* (2021) y Yilma *et al.* (2019), puede llevar a altos niveles de DBO_5 , sobre población de algas y niveles muy bajos de oxígeno en el agua; el clúster 3 es el que presenta los resultados más elevados de este parámetro. Con base en los datos, se puede evidenciar que el clúster 4 y 1 son los que presentan mayor carga de contaminantes orgánicos y aguas residuales, esto debido a los altos valores de DBO_5 y coliformes, causados probablemente por su cercanía a la orilla de la ciénaga y a la comunidad aledaña. El clúster 2 es el que presenta valores más moderados en estas variables debido a su lejanía de la zona poblada de la ciénaga.

4 CONCLUSIONES

En este estudio con el análisis de correlación de variables, se pudo evidenciar una fuerte relación entre los valores de las variables oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), el fósforo total (PT), y relaciones moderadas entre las demás variables, razón por la que se procedió a realizar el análisis de PCA. Luego, el análisis de componentes principales mostró que la fuente de polución más significativa en la ciénaga es la entrada de aguas residuales cargadas de materia orgánica y nutrientes. Por su parte, el análisis clúster dividió el cenegal en cuatro grupos diferentes, siendo el clúster 1 y 4 los que presentaron mayores valores negativos respecto a la calidad del agua, estos se encuentran ubicados en las zonas más cercanas a la población.

Lo anterior indica que se deben hacer jornadas de sensibilización y cuidado del medio ambiente a estas poblaciones para alcanzar unos niveles aceptables en las variables DBO_5 , coliformes y fósforo en la ciénaga. De igual manera, es importante llevar a cabo un estricto programa de control y vigilancia en sitios puntuales donde se detecten fugas o vertimientos no permitidos sobre la ciénaga. Así, estos resultados basados en ciencia de datos pueden ayudar a las autoridades distritales a tomar decisiones que mejoren de las condiciones ambientales de la Ciénaga de La Virgen, el cuerpo de agua más importante de la ciudad de Cartagena.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena por su colaboración para el desarrollo de este trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Ilddefonso Baldiris-Navarro: metodología, investigación, análisis de datos, escritura, borrador original. **Juan Carlos García Ojeda:** metodología, conceptualización, revisión. José Herrera Franco: análisis de

datos, revisión y edición. **Martha Torres Virviescas:** metodología, investigación y edición. **Renzo Herrera-Hoyos:** análisis y visualización de los datos.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

LITERATURA CITADA

Ali Abed, S., Hussein, S., & Al-Ansari, N. (2019). Evaluation of Water quality in the Tigris River within Baghdad, Iraq using Multivariate Statistical Techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, 1294(7), 072025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/7/072025>

Alam, R., Ahmed, Z., Seefat, S. M., & Nahin, K. T. K. (2021). Assessment of surface water quality around a landfill using multivariate statistical method, Sylhet, Ban-

gladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100422.

Angello, Z., Tränckner, J., & Behailu, B. (2020). Spatio-Temporal Evaluation and Quantificationof Pollutant Source Contribution in Little AkakiRiver, Ethiopia: Conjunctive Application of Factor Analysis and Multivariate Receptor Model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1), 23-34. <https://doi.org/10.15244/pjoes/119098>

APHA. (2014). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Works; Public Health Association/American Water Federation; Association/Water Environment.

Baldiris-Navarro, I., Acosta-Jimenez, J. C., González-Delgado, A. D., Realpe-Jiménez, A., & Fajardo-Cuadro, J. G. (2019). Multivariate Statistical Analysis Applied to Water Quality of a Tropical Coastal Lagoon, Cartagena, Colombian Caribbean. *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(1), 141. <https://doi.org/10.22146/ijc.43035>

Barakat, A., El Baghdadi, M., Rais, J., Aghezzaf, B., & Slassi, M. (2016). Assessment of spatial and seasonal water quality variation of Oum Er Rbia River (Morocco) using multivariate statistical techniques. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(4), 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.11.002>

Betancur, S. P., y Rivero, J. P. (2020). Variabilidad de la pendiente espectral de la materia orgánica disuelta cromofórica (cdom) en la estación de monitoreo multianual antares, Cartagena. *Boletín Científico CIOH*, 39(2). <https://doi.org/10.26640/22159045.2020.506>

Bodrud-Doza, Md., Bhuiyan, M. A. H., Islam, S. M. D.-U., Rahman, M. S., Haque, Md. M., Fatema, K. J., Ahmed, N., Rakib, M. A., & Rahman, Md. A. (2019). Hydrogeochemical investigation of groundwater in Dhaka City of Bangladesh using GIS and multivariate statistical techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 226-244. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.008>

Fraga, M. D. S., Reis, G. B., Da Silva, D. D., Guedes, H. A. S., & Elesbon, A. A. A. (2020). Use of multivariate statistical methods to analyze the monitoring of surface water quality in the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35303-35318. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09783-0>

Fulke, A. B., Panigrahi, J., Eranezhath, S., Karthi, J., & Dora, G. U. (2024). Environmental variables and its association with faecal coliform at Madh Island beaches of megacity Mumbai, India. *Environmental Pollution*, 341, 122885.

Ganguli, S., Hosen Rifat, Md. A., Howlader, S., Hasan, Md. A., Islam, S., Alam, Md. N. E., & Islam, Md. N. (2022). Assessment of Bhatiari Lake water quality: Pollution indices, hydrochemical signatures and hydro-statistical analysis. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(8), 100585. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100585>

Grisales, C., Salgado, J., y Molares, R. (2014). Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos. *Boletín Científico CIOH*, 32, 47-70.

Howladar, M. F., Chakma, E., Jahan Koley, N., Islam, S., Numanbakhth, M. A. A., Ahmed, Z., Chowdhury, T. R., & Akter, S. (2021). The water quality and pollution sources assessment of Surma river, Ban-

gladesh using hydrochemical, multivariate statistical and water quality index methods. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100523. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100523>

Ibrahim, A., Ismail, A., Juahir, H., Iliyasu, A. B., Wailare, B. T., Mukhtar, M., & Aminu, H. (2023). Water quality modelling using principal component analysis and artificial neural network. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114493.

Karangoda, R. C., & Nanayakkara, K. G. N. (2023). Use of the water quality index and multivariate analysis to assess groundwater quality for drinking purpose in Ratnapura district, Sri Lanka. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100910>

Kherifi, W., Hecini, L., Bekiri, F., & Kherici-Bousnoubra, H. (2019). Faecal contamination of water in the Lake Mellah and its catchment area, north-eastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 42(1), 110-116. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0051>

Kothari, V., Vij, S., Sharma, S., & Gupta, N. (2021). Correlation of various water quality parameters and water quality index of districts of Uttarakhand. *Environmental and Sustainability Indicators*, 9, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100093>

Krishnaraj, A., & Deka, P. C. (2020). Spatial and temporal variations in river water quality of the Middle Ganga Basin using unsupervised machine learning tech-

niques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12), 744. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08624-4>

Lencha, S. M., Tränckner, J., & Dananto, M. (2021). Assessing the Water Quality of Lake Hawassa Ethiopia—Trophic State and Suitability for Anthropogenic Uses—Applying Common Water Quality Indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 8904. <https://doi.org/10.3390/ijerph18178904>

Li, T., Li, S., Liang, C., Bush, R. T., Xiong, L., & Jiang, Y. (2018). A comparative assessment of Australia's Lower Lakes water quality under extreme drought and post-drought conditions using multivariate statistical techniques. *Journal of Cleaner Production*, 190, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.121>

Liu, L., & You, X. (2023). Water quality assessment and contribution rates of main pollution sources in Baiyangdian Lake, northern China. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106965. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106965>

Loi, J. X., Chua, A. S. M., Rabuni, M. F., Tan, C. K., Lai, S. H., Takemura, Y., & Syutsubo, K. (2022). Water quality assessment and pollution threat to safe water supply for three river basins in Malaysia. *Science of The Total Environment*, 832, 155067. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155067>

Maldonado, W., Baldiris, I., y Díaz, J. (2011). Evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (Cartagena, Colom-

bia) durante el período 2006-2010. *Revisa Científica Guillermo de Ockham*, 9(2), 79-87.

Martin, I., y Urrea, M. (2016). *Estudio para la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de Cartagena para su descarga mediante emisario submarino en el mar caribe*. La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/54

Mazari-Hiriart, M., Fernández-Reyes A., Alvarado-Velázquez J., Gradilla-Hernández, M., Díaz-Vázquez D. (2024). Water quality management in a tropical karstic system influenced by land use in Chiapas, Mexico. *Environmental Challenges*, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100981>

Moor, R., van Maren, M., & van Laarhoven, C. (2002). A Controlled Stable Tidal Inlet at Cartagena de Indias, Colombia. *Terra et Aqua*, 88, 3-14.

Palomino, D., y Serge, N. (2015). *Variación de la calidad del agua de la ciénaga de la virgen producto de la implementación del emisario submarino* [Tesis de grado]. Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/1381?show=full&locale-attribute=en>

Rice, E., Baird, R., & American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23.^a ed.). American public health association.

Roy, B. N., Roy, H., Rahman, K. S., Mahmud, F., Bhuiyan, M. M. K., Hasan, M., ... & Islam, M. S. (2024). Principal component analysis incorporated water quality index modeling for Dhaka-based rivers. *City and Environment Interactions*, 23, 100150.

Sun, X., Zhang, H., Zhong, M., Wang, Z., Liang, X., Huang, T., & Huang, H. (2019). Analyses on the Temporal and Spatial Characteristics of Water Quality in a Seagoing River Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study in the Duliujiang River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1020. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061020>

Tripathi, M., & Singal, S. K. (2019). Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India. *Ecological Indicators*, 96, 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.025>

Varol, M. (2020). Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey. *Environmental Pollution*, 259, 113860. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113860>

Xiong, J., Lin, C., Cao, Z., Hu, M., Xue, K., Chen, X., & Ma, R. (2022). Development of remote sensing algorithm for total phosphorus concentration in eutrophic lakes: Conventional or machine learning? *Water Research*, 215, 118213. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118213>

Yilma, M., Kiflie, Z., Windsperger, A., & Gessese, N. (2019). Assessment and interpretation of river water quality in Little Akaki River using multivariate statistical techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 3707-3720. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2000-8>

Zamora-López, A., Guerrero-Gómez, A., Torralva, M., Zamora-Marín, J. M., Guillén-Beltrán, A., & Oliva-Paterna, F. J. (2023). Shallow waters as critical habitats for fish assemblages under eutrophication-mediated events in a coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108447. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108447>

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

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



CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SIETE VARIEDADES DE MANZANA (*Malus domestica* Borkh) ESTABLECIDAS EN TRÓPICO ALTO

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF SEVEN APPLE VARIETIES (*Malus domestica* Borkh) ESTABLISHED IN HIGH TROPICS

Carmenza Pérez Fagua¹

Yuli Alexandra Deaquiz Oyola²

Amanda Silva Parra³

German Eduardo Cely Reyes⁴

Pedro José Almanza Merchán⁵

¹ Ingeniero Agrónomo, Magíster en Ciencias Agrarias. PhD.
Ciencias Agrarias, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.
cperezf@unillanos.edu.co

² Ingeniero Agrónomo, Magíster en Fisiología Vegetal, Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
yuli.deaquiz@uptc.edu.co

³ Ingeniero Agrónomo, PhD. Agronomía, Universidad de los Llanos Villavicencio, Colombia.
asilvap@unillanos.edu.co

⁴ Ingeniero Agrónomo, PhD. Agrociencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia, Tunja, Colombia. Grupo de investigación en
desarrollo y producción agraria sostenible
german.cely@uptc.edu.co

⁵ Ingeniero agrónomo, PhD. Fisiología vegetal, Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia, Tunja, Colombia. Grupo de investigación en
desarrollo y producción agraria sostenible.
pedro.almanza@uptc.edu.co

Citación: Pérez, C., Deaquiz, Y., Silva, A., Cely, G. y Almanza, P. (2025). Caracterización fisicoquímica de siete variedades de manzana (*Malus domestica* Borkh) establecidas en trópico alto. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 357 - 376.
<https://doi.org/10.22490/21456453.8141>

RESUMEN

Contextualización: la recuperación de variedades tradicionales de manzana es una acción muy importante en el ámbito de la conservación de los recursos filogenéticos a nivel local.

Vacío de conocimiento: las variedades tradicionales tienen propiedades específicas y poco comunes que las pueden hacer interesantes en comparación con las variedades comerciales. Sin embargo, han sido pocas las investigaciones que describen sus características de calidad.

Propósito: el objetivo de esta investigación fue determinar las características fisicoquímicas de los frutos en siete variedades de manzana establecidas en Tibaná, Boyacá, trópico alto de Colombia.

Metodología: se determinó el peso (g), color de la epidermis, firmeza del fruto (N),

sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Bx}$), pH, acidez total titulable (ATT), relación de madurez y potencial agroindustrial.

Resultados y conclusiones: los resultados indican que 'Winter Banana' mostró el mayor contenido de sólidos solubles y la menor dureza de fruto; 'Dorset Golden' tuvo el más alto valor de pH y relación de madurez; 'Anna' presentó la mayor acidez y 'Pennsylvania' fue la de mayor tamaño. Por su parte, se determinó que 'Dorset Golden' y 'Winter Banana' se perfilan como las variedades con las mejores características fisicoquímicas para los procesos de industrialización.

Palabras clave: agroindustria, calidad orgánoléptica, madurez, postcosecha

ABSTRACT

Contextualization: The recovery of traditional apple varieties is a very important action in the field of plant genetic resources conservation, at the local level.

Knowledge gap: However, traditional varieties have specific and uncommon properties that can make them interesting compared to commercial varieties, but there has

been little research describing their quality characteristics.

Purpose: The objective of this research was to determine the physicochemical characteristics of seven apple varieties cultivated in Tibaná, Boyacá, High Tropics of Colombia.

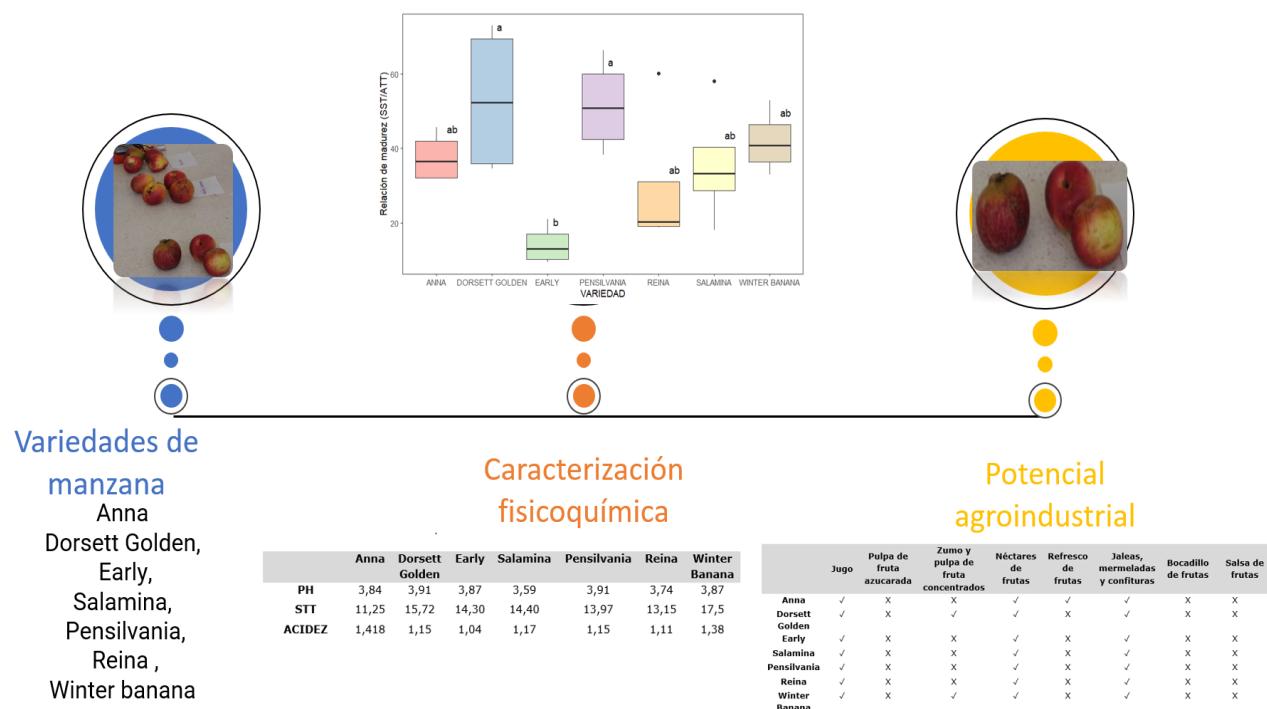
Methodology: The methodology employed involved the determination of several key characteristics of the fruit, including weight (in grams), skin color, fruit firmness (as measured in Newtons), total soluble solids (in degrees Brix), pH, total titratable acidity (in milliequivalents per liter), maturity ratio, and agroindustrial potential.

Results and conclusions: The results indicate that 'Winter Banana' had the highest

soluble solids content and the lowest fruit hardness. 'Dorset Golden' had the highest pH value and maturity ratio. 'Anna' had the highest acidity and 'Pennsylvania' had the largest size. 'Dorset Golden' and 'Winter Banana' were found to be the varieties with the best physicochemical characteristics for industrialization processes.

Keywords: agroindustry, fruit acidity, organoleptic quality, sugar content

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1

INTRODUCCIÓN

Malus es un género de árboles y arbus-
tos de la familia Rosaceae, que agrupa
de 25 a 33 especies (Ma *et al.*, 2017) en las
que incluye uno de los frutales más importan-
tes, como el manzano. Un gran número de
estudios realizados en especies cultivadas
y silvestres han resaltado la enorme impor-
tancia de las variedades tradicionalmente
plantadas y adaptadas a zonas tropicales,
destacando la gran diversidad bioquímica y
morfológica de esta especie (Dan *et al.*, 2015;
Cepeda *et al.*, 2021; Gutiérrez-Villamil *et al.*,
2022). Según Cornille *et al.* (2012) y Kalki-
sim *et al.* (2016), la gran diversidad de este
frutal se debe en gran parte a la domestica-
ción y evolución ocurrida a través del tiem-
po, no obstante, desde hace unos años esta
gran diversidad se ha visto disminuida por
causa de la aparición de cultivos comerciales
homogéneos, lo cual ha ocasionado la des-
aparición de un gran número de cultivares
locales (Bhat *et al.*, 2011).

El manzano es una de las especies cadu-
cifolias de mayor difusión a escala mundial,
en gran medida, por su alto valor nutricional
(los frutos, sin incluir los microelementos,
contienen 65% de potasio, 23% de nitrógeno,
5% de fósforo y sólo 7% de magnesio y cal-
cio) (Casierra-Posada *et al.*, 2003) y econó-
mico, con futuro agroindustrial para el tró-
pico alto de Colombia (Becerra y Gallardo,

2015). Dada la importancia de este caduci-
folio, ha sido ampliamente analizado y estu-
diado a nivel nacional e internacional desde
hace muchos años. No obstante, a pesar del
gran número de investigaciones, se calcula
que existen más de 7500 tipos de manzanas
(Dobrzański *et al.*, 2006), lo que ha obsta-
culizado en gran medida determinar las ca-
racterísticas de cada fruto. En la actualidad,
la variedad de manzana más importante en
Colombia es 'Anna' (Cepeda *et al.*, 2021),
gracias a su fácil adaptación a zonas altas del
trópico y sus bajos requerimientos de horas
frío (Gutiérrez-Villamil *et al.*, 2022).

En Boyacá, esta variedad se ha logrado
posicionar como la más representativa con
cerca del 65% de la producción de manzana,
convirtiéndola en una gran apuesta para el
mercado nacional e internacional (Puentes
et al., 2008). Sin embargo, la gran demanda
de 'Anna' ha favorecido la pérdida de
una enorme diversidad genética, variedades
como 'Dorsett Golden', 'Early', 'Salamina',
'Pennsylvania', 'Reina' o 'rayada' y 'Winter ba-
nana' han sido abandonadas, en preferencia
de los manzanos 'Anna' de alto rendimiento,
sin alcanzar el potencial de aprovechamien-
to tecnológico y comercial. La Tabla 1 des-
cribe las características climáticas y del fruto
de algunas de las variedades estudiadas.

Tabla 1.

Características de variables de clima y fruto de algunas variedades de manzana

Variables	Variedades				
	Anna	Early	Salamina	Pensilvania	Winter banana
Adaptación (m.s.n.m)	1800 - 2700	2200 -2700	1800-2700	2000 -2400	2200 -2600
Patrón	Eureka - MM-106 MM-7	Eureka y MM-106	Eureka y MM-106	Eureka y MM-106	Eureka y MM-106
Color, piel y pulpa	Piel roja con puntos verdes amarillentos, pulpa blanca	Piel púrpura, pulpa blanca	Piel roja, pulpa blanca	Piel verde amarillenta, pulpa blanca	Piel verde rojiza, pulpa blanca
Tamaño	Grande	Mediano	Mediano	Grande	Mediano
Polinizantes	Dorsetgolden	Winter banana, Pensilvania	Winter banana, Pensilvania Golden delicious	Winter Banana, Salamina	Golden Delicious
Clasificación horas frio	Muy bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: adaptado de Sarmiento y Naranjo (1997).

La recuperación de un gran número de variedades tradicionales detendría la pérdida de valiosos recursos genéticos adaptados a nivel del trópico alto de Colombia. Con ese fin, es prioritario caracterizar adecuadamente cada una de las variedades existentes en la región, lo cual sería de gran importancia para el aseguramiento de la calidad del fruto ya que ayuda a determinar el valor nutricional como también a controlar el cumplimiento de ciertos parámetros, bien sea

para su comercialización o para el mejoramiento genético de las variedades mencionadas u otras.

Con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las características fisiocoquímicas de las variedades 'Anna', 'Dorsett Golden', 'Early', 'Salamina', 'Pensilvania', 'Reina' o 'rayada' y 'Winter banana', cultivadas en el municipio de Tibaná, Boyacá, trópico alto del Colombia.

2

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los frutos de las siete variedades de manzana fueron recolectados en múltiples unidades productivas, las cuales se distribuyeron a lo largo del municipio de Tibaná, Boyacá, trópico alto de Colombia, localizado a 5° 19' 14" de latitud norte y 73° 24' 02" de longitud oeste, la temperatura media del sitio es de 16°C que corresponde al Bosque seco, casi húmedo, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (IGAC, 2003), presenta una precipitación promedio anual de 924mm y con régimen pluvial bimodal (marzo-mayo y septiembre-noviembre), que cubre clima frío húmedo y clima frío seco, con altitudes entre 2000 y 3000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), con temperaturas promedio entre 12 y 18 °C junto a una humedad entre 60% y 100% y entre 20% y 60%, respectivamente (IDEAM, 2007).

Los frutos fueron recolectados y llevados al Laboratorio de Suelos y Poscosecha de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos, ubicado en el municipio de Soracá, Boyacá. Allí se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de cada variedad.

Tipo de estudio

Se usó un diseño completamente al azar (DCA) con siete tratamientos: variedad 'Anna', variedad 'Dorsett Golden', variedad 'Early', variedad 'Salamina', variedad 'Pensilvania', variedad 'Reina' o 'rayada' y variedad

'Winter banana', cada uno con cuatro repeticiones.

Para esta investigación se tuvieron en cuenta 28 unidades experimentales, cada unidad experimental correspondió a un fruto. Estos fueron recolectados en estado de madurez tres con un tamaño homogéneo, libres de daños fitosanitarios, físicos y mecánicos, como lo indica la norma técnica colombiana ICONTEC 3523-1 (ICONTEC, 1996), la cual especifica los requisitos que deben cumplir las manzanas destinadas al consumo humano. Su selección fue de forma aleatoria. Para la realización de este estudio se consideraron las siguientes variables:

Peso (g): la masa fresca de los frutos fue estimada mediante una balanza electrónica de precisión 0.001 marca AXIS.

Color de la epidermis: se utilizó el espectrocolorímetro digital AWR-18 marca VDUNSKY, modelo WR-18, iluminante D65 y observador de 10° como referencia, mediante los parámetros del sistema CIELab "L", "a" y "b".

Para medir el índice de color, se utilizó el modelo de color LAB, el cual es un modelo ampliamente utilizado en el sector alimenticio a nivel mundial. Sus parámetros en muestras de alimento designan: L* la luminosidad (0 = negro y 100 = blanco), donde a y b son las coordenadas cromáticas rectangulares (+a = rojo y -a = verde / +b = amarillo y -b = azul), los valores de color se obtuvieron de L* a * b * y el ángulo de tono y croma (C*)

usados mediante las fórmulas (b^*/a^*) y $(a^*2 + b^*2)^{1/2}$ (Zuculoto *et al.*, 2015).

Firmeza del fruto (N): la medición de este parámetro se realizó mediante un penetrómetro digital GY-4 marca Barry Century, número de modelo GY4, con aproximación 0.05 N, comprometiendo cerca de 10mm de la corteza.

Sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Bx}$): determinado con un refractómetro digital de rango 0 a 85% con una precisión de 0.1 $^{\circ}\text{Bx}$.

pH: para la estimación del pH se tomaron 5 cm³ de zumo de manzana y se diluyeron en 50 cm³ de agua destilada. Posteriormente, se midió dicha mezcla con un potenciómetro calibrado con soluciones buffer de un pH de 7.0 y 4.0, los resultados se reportaron en escala numérica (Zuculoto *et al.*, 2015).

Acidez total titulable: determinada por medio de la metodología de la AOAC (2023). Mediante cálculos con datos de volumen de NaOH, incorporado en 5 g de jugo de frutos, agregando 3 gotas de fenolftaleína en una titulación potenciométrica hasta pH de 8,2.

Relación de madurez: determinada mediante la relación entre la cantidad de azúcares totales y la cantidad de ácidos orgánicos presentes en los frutos (SST/ATT).

Características del potencial agroindustrial: se compararon los resultados obtenidos en la investigación con los parámetros establecidos en la resolución 3929 de 2013 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013) (Tabla 2), esto con el fin de determinar el potencial agroindustrial de cada variedad.

Tabla 2.

Características químicas para el procesamiento de la manzana según la resolución 3929 de 2013

Producto	pH	Acidez (%m/m)	Sólidos solubles ($^{\circ}\text{Bx}$)
Jugo	Máximo 4,0	Mínimo 0,4	Mínimo 10,0
Pulpa de fruta azucarada	Máximo 4,0	Mínimo 0,4	Mínimo 40,0
Zumos y pulpa de fruta concentrados	Máximo 4,0	Mínimo 0,4	Mínimo 15,0
Néctares de frutas	De 2,5 a 4,6	Mínimo 0,2	Mínimo 10,0
Refrescos de frutas	Máximo 4,0	Mínimo 0,2	Máximo 13,0

Jaleas, mermeladas y confituras	Mínimo 3,04	Mínimo 0,5	Máximo 60,0
Bocadillo de frutas	Mínimo 3,4	No se específica	Mínimo 75,0
Salsas de frutas	De 2,8 a 3,0	No se especifica	De 60,0 a 62,0

Fuente: adaptado de Ministerio de Salud y Protección Social (2013).

Análisis de datos

Se realizó al modelo estadístico el cumplimiento de supuestos de normalidad, homocedasticidad, e independencia; luego se llevó a cabo el análisis de varianza ANOVA con el fin de determinar las diferencias estadís-

ticas entre tratamientos; posteriormente, se hizo la prueba de comparación de medias de Tukey con un 5% de significancia. Para esto se utilizó el software R Studio y la librería Agricolae, ggplot2, versión 4.3.1 (R Core, 2020).

③ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sólidos solubles totales SST ($^{\circ}\text{Bx}$)

Esta variable presentó diferencias estadísticas significativas entre las variedades 'Winter Banana' y 'Anna', donde se obtuvieron valores de 17,50 y 11,25 $^{\circ}\text{Bx}$. No obstante, las variedades 'Dorsett Golden', 'Salamina', 'Early', 'Pensilvania' y 'Reina' no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellas, con valores de 15,72, 14,4, 14,3, 13,97 y 13,15 $^{\circ}\text{Bx}$, respectivamente (Figura 1). 'Winter Banana' tuvo la mayor cantidad de sólidos solubles, mientras que 'Anna' la menor cantidad. Los $^{\circ}\text{Bx}$ obtenidos en 'Anna' están

cercanos con los de Gutiérrez-Villamil *et al.* (2017), quienes afirman que el desarrollo del fruto y la cosecha en la variedad 'Anna' es entre 100 a 120 días después de la antesis, con contenido de sólidos solubles de 8,58 $^{\circ}\text{Bx}$ del fruto.

En el caso de 'Winter Banana', el valor obtenido se diferencia con los resultados obtenidos por Battaglia (2011), quien afirma que esta variedad alcanza tan solo 13 $^{\circ}\text{Bx}$ cuando madura, lo que pone de manifiesto la alta variabilidad en esta característica de la fruta de manzana, debido posiblemente a las condiciones edafoclimáticas que difieren de un sitio a otro.

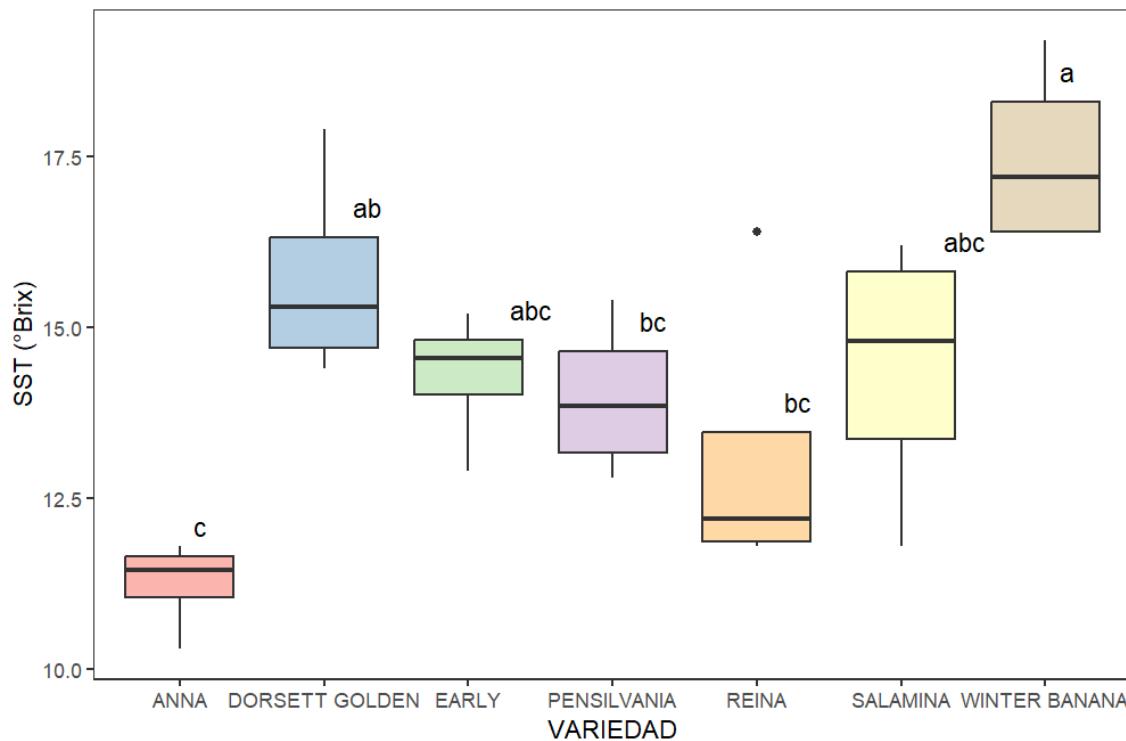


Figura 1. Sólidos solubles totales de las variedades ‘Winter Banana’, ‘Dorsett Golden’, ‘Salamina’, ‘Early’, ‘Pensylvania’, ‘Reina’ y ‘Anna’ procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá. Según la prueba de Tukey ($p<0,05$) letras distintas indican diferencias estadísticas significativas

Fuente: autores.

pH

Esta variable no presentó diferencias estadísticas significativas entre las variedades evaluadas. ‘Dorsett Golden’, ‘Pensylvania’, ‘Early’, ‘Winter Banana’, ‘Anna’, ‘Reina’ y ‘Salamina’ mostraron un pH de 3,93, 3,91, 3,87, 3,87, 3,84, 3,74 y 3,5, respectivamente. ‘Dorsett Golden’ tuvo el mayor valor de pH, mientras que ‘Salamina’ el menor (Figura 2), poniendo de manifiesto cómo la amplia gama de variedades en el trópico alto Boyacense

constituyen un patrimonio genético importante que puede expresar características similares de pH influenciando en la acidez de la fruta. Según Rodríguez *et al.* (2006), el pH es una de las variables de mayor importancia en la agroindustria, pues está relacionado con los costos de transformación de la materia prima. El valor de pH puede fluctuar en función de la variedad, las condiciones de postcosecha y las condiciones agroecológicas de la zona (Cepeda *et al.*, 2021).

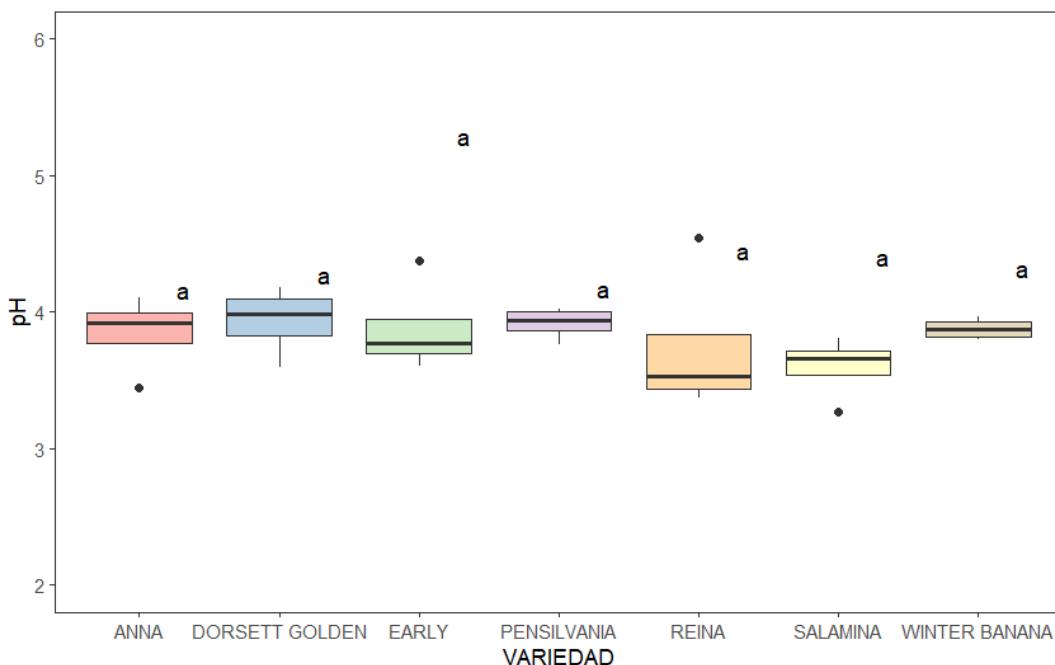


Figura 2. pH de las variedades ‘Dorsett Golden’ ‘Pensilvania’ ‘Early’ ‘Winter Banana’ ‘Anna’ ‘Reina’ y ‘Salamina’ procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá. Según la prueba de Tukey ($p<0.05$), letras distintas indican diferencias estadísticas significativas

Fuente: autores.

Acidez total titulable ATT (%)

No se presentaron diferencias estadísticas significativas entre las variedades evaluadas para ATT. ‘Anna’, ‘Winter Banana’, ‘Salamina’, ‘Pensilvania’, ‘Dorsett Golden’, ‘Reina y Early’ mostraron una acidez titulable de 1,41, 1,38, 1,17, 1,15, 1,15, 1,11, 1,04 %, respectivamente (Figura 3). ‘Anna’ demostró tener la mayor acidez, mientras que Early la menor. Corona-Leo *et al.* (2020), afirman que el contenido de azúcares y el porcentaje de acidez en

manzana son componentes esenciales para determinar la calidad de la fruta. El contenido de ácidos (málico, succínico, láctico y cítrico) disminuye tanto durante la maduración como durante la etapa de postcosecha, caso contrario a la cantidad de azúcares, que aumentan durante la maduración y se mantienen en condiciones normales durante la postcosecha. Por otra parte, el pH y la acidez titulable están correlacionados, la reducción de la acidez titulable ocasionaría un incremento en el pH de la fruta (Wu *et al.*, 2007).

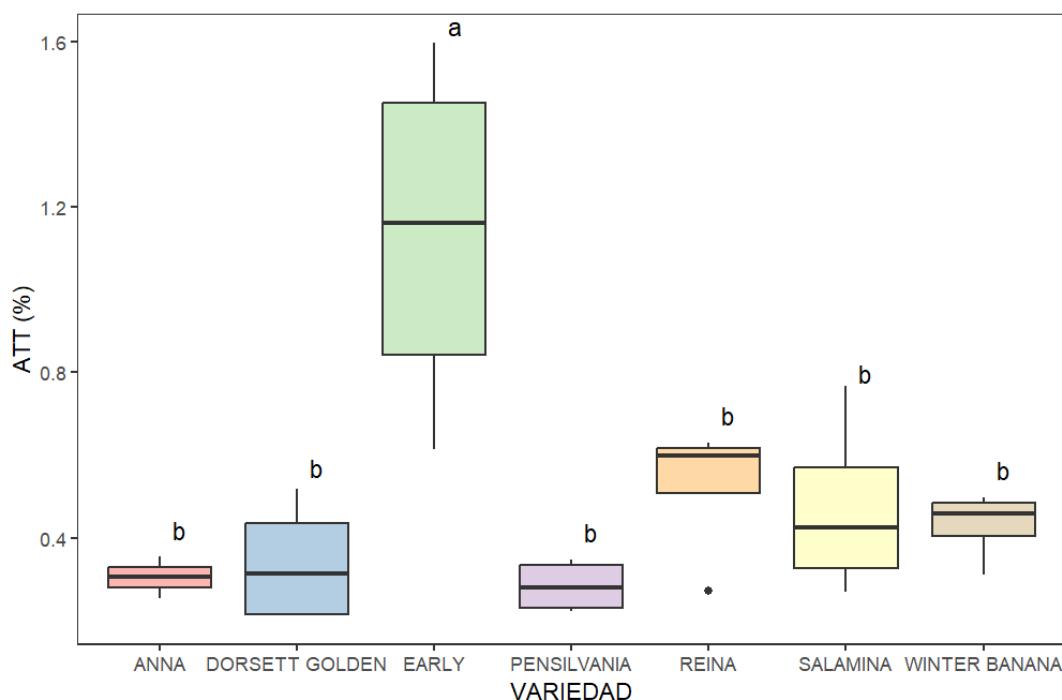


Figura 3. Acidez total titulable (%) de las variedades ‘Anna’, ‘Winter Banana’, ‘Salamina’, ‘Pensilvania’, ‘Dorsett Golden’, ‘Reina’ y ‘Early’, procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá. Según la prueba de Tukey ($p<0.05$) letras distintas indican diferencias estadísticas significativas

Fuente: autores.

Peso fresco (g)

Esta variable presentó diferencias estadísticas significativas entre ‘Pensilvania’, y las variedades ‘Reina’ y ‘Salamina’ donde se obtuvieron pesos de 99,97, 49,37 y 47,10 gramos, respectivamente. No obstante, las variedades ‘Winter Banana’, ‘Dorsett Golden’, ‘Early’ y ‘Anna’ no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellas, con pesos de 86,80, 77,05, 63,80 y 63,47 gramos, correspondientemente. ‘Pensilvania’ fue la variedad de mayor peso, mientras que ‘Salamina’ fue la de menor (Tabla 3).

El peso del fruto depende directamente de la acumulación de agua y materia seca propia de la variedad, además está determinado por la disponibilidad de metabolitos en la planta, donde el crecimiento y desarrollo de los frutos de cada variedad de manzana depende de los procesos hormonales endógenos, los cuales influyen en la producción de fotoasimilados en la planta (Cepeda *et al.*, 2021), jugando el potasio un papel importante (Battaglia, 2011).

En el trópico, la variedad ‘Anna’ ha sido manejada con diferentes técnicas para obtener dos cosechas al año (cultivo continuo),

donde el manejo de las podas puede estar controlando el tamaño de la fruta, como también lo hacen el efecto que tiene la temperatura y la nutrición del cultivo (Fischer y Orduz-Rodríguez, 2012).

Relación de madurez

Esta variable presentó diferencias estadísticas significativas entre ‘Dorsett Golden’ y ‘Early’ y las variedades ‘Winter Banana’ y ‘Anna’, donde se obtuvo una relación de madurez de 13,93, 13,69, 13,11 y 8,11, respectivamente. No obstante, las variedades ‘Sa-

lmina’ ‘Pensilvania’ y ‘Reina’ no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellas, con valores de 12,31, 12,21 y 11,80 (Figura 4). ‘Dorsett Golden’ tuvo la mayor relación de madurez, mientras que ‘Anna’ la menor. La concentración de ácidos orgánicos depende directamente de la maduración y de las características metabólicas del fruto, ocasionada por una máxima tasa respiratoria (Corona-Leo *et al.*, 2020). No obstante, esta no es la única razón, ya que Del Pilar *et al.* (2007) afirman que existe una gran correlación entre la relación de madurez, con la cantidad de sólidos solubles y el pH.

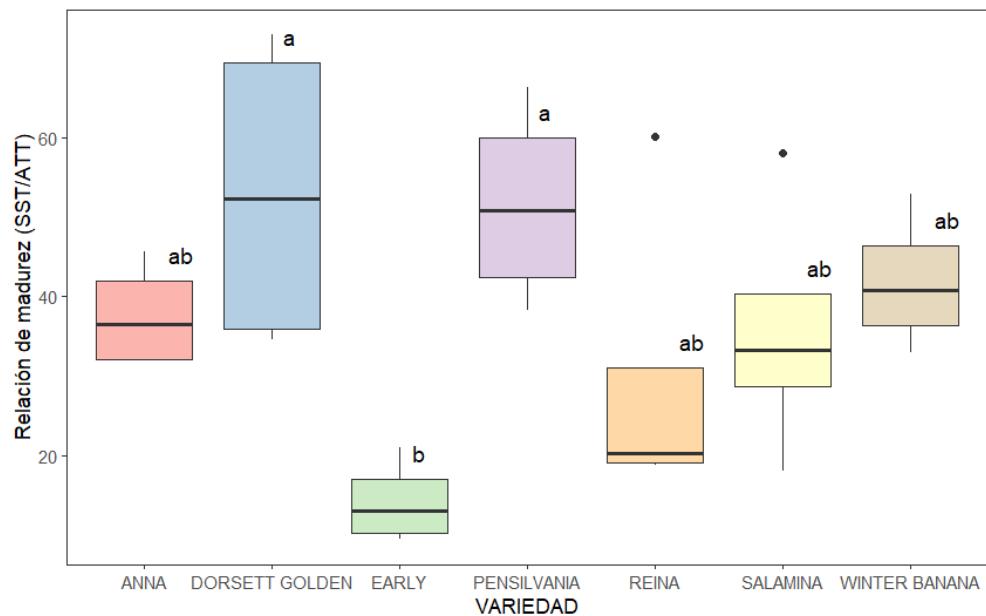


Figura 4. Relación de madurez (SST/ATT) de las variedades ‘Dorsett Golden’, ‘Early’, ‘Winter Banana’, ‘Salamina’, ‘Pensilvania’, ‘Reina’ y ‘Anna’ procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá. Según la prueba de Tukey ($p<0.05$) letras distintas indican diferencias estadísticas significativas

Fuente: autores.

Firmeza (N)

Esta variable presentó diferencias estadísticas significativas entre ‘Winter Banana’, ‘Anna’ y ‘Reina’ donde se obtuvieron valores de 16,14, 16,07 y 11,58 N. No obstante, las variedades ‘Dorsett Golden’, ‘Early’, ‘Pensilvania’ y ‘Salamina’ no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellas, con valores de 14,48, 14,34, 14,01 y 13,51 N, respectivamente. ‘Winter Banana’ tuvo la menor dureza de fruto, mientras que la variedad ‘Reina’ fue la de mayor dureza (Tabla 3).

Brummell (2006), afirma que el ablandamiento de los frutos depende directamente del efecto de una serie de modificaciones que ocurren en las redes de polímeros que componen la pared celular, debido a la despolimerización de la hemicelulosa y poliurónidos, lo cual se ve reflejado en la pérdida de firmeza y cambios en la calidad de la textura de los frutos.

La manzana tiene altos contenidos de agua, es rica en carbohidratos, proteínas y minerales, lo que contribuye a un rápido deterioro, siendo considerada altamente perecedera, además presenta pardeamiento enzimático

debido a su alto contenido en compuestos fenólicos que reaccionan con el oxígeno para formar melanoidinas, dándole este color al alimento, lo cual produce disminución de color, sabor y aromas, generando pérdidas durante la postcosecha. En Colombia se pierde del 30 al 40% del producto final por malos manejos en el cultivo, cosecha y postcosecha (Pinto-Medina *et al.*, 2016).

En este sentido, ‘Winter banana’ tendría un mejor desempeño en el manejo postcosecha, durante el almacenamiento, garantizando una mejor vida anaquel frente a las otras variedades estudiadas.

Índice de color

La luminosidad de la epidermis (L) no mostró diferencias estadísticas significativas entre las variedades evaluadas. ‘Dorsett Golden’, ‘Winter Banana’, ‘Reina’, ‘Anna’, ‘Early’, ‘Salamina’ y ‘Pensilvania’, revelaron una luminosidad promedio de 42,04, 41,50, 39,15, 37,67, 36,67, 35,46 y 35,12, respectivamente (Tabla 3). La variedad ‘Dorsett Golden’ tuvo la mayor luminosidad en su epidermis, mientras que ‘Pensilvania’ fue la que manifestó el menor valor.

Tabla 3

Características físicas de las variedades ‘Dorsett Golden’, ‘Early’, ‘Winter Banana’, ‘Salamina’, ‘Pensilvania’, ‘Reina’ y ‘Anna’ procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá. Según la prueba de Tukey ($p<0.05$) letras distintas indican diferencias estadísticas significativas

Variedades	Firmeza (N)	Peso (g)	Coordenadas Cielab			IC
			L	a*	b*	
Anna	16,07(±0,71) b	63,47(±2,06) b	37,70(±3,92) a	25,50(±4,95) a	25,80(±1,19) a	24,80(±5,48) b
Dorsett golden	14,48(±0,53) c	77,05(±3,68) b	42,00(±2,18) a	20,28(±1,83) a	26,30(±2,77) a	18,08(±1,67) c

Early	14,34($\pm 1,13$) c	63,80($\pm 5,43$) b	36,70($\pm 5,51$) a	21,40($\pm 3,78$) a	20,50($\pm 2,10$) a	38,21($\pm 6,90$) a
Salamina	13,52($\pm 2,84$) c	47,10($\pm 4,12$) c	35,50($\pm 6,82$) a	18,80($\pm 2,45$) a	25,50($\pm 5,60$) a	9,70($\pm 2,16$) d
Pensilvania	14,01($\pm 1,04$) c	99,97($\pm 4,48$) a	35,10($\pm 4,98$) a	24,50($\pm 3,72$) a	18,95($\pm 0,68$) a	27,11($\pm 4,18$) b
Reina	11,58($\pm 1,10$) d	49,37($\pm 4,13$) c	39,20($\pm 2,91$) a	23,00($\pm 5,30$) a	26,56($\pm 3,73$) a	21,24($\pm 6,00$) c
Winter banana	16,14($\pm 0,73$) a	86,80($\pm 0,73$) b	41,50($\pm 2,40$) a	20,70($\pm 1,74$) a	24,52($\pm 4,35$) a	26,43($\pm 5,05$) b

Fuente: autores.

El componente a (a^*) no presentó diferencias estadísticas significativas entre las variedades evaluadas. ‘Anna’, ‘Pensilvania’, ‘Reina’, ‘Early’, ‘Winter Banana’, ‘Salamina’ y ‘Dorsett Golden’ mostraron valores promedio del componente a (a^*) de 25,53, 24,53, 23,04, 21,40, 20,73, 18,82 y 18,73, respectivamente. La variedad ‘Anna’ tuvo el valor de componente a^* más alto en su epidermis, mientras que ‘Dorsett Golden’ el menor.

El componente b (b^*) no presentó diferencias estadísticas significativas entre las variedades evaluadas. ‘Reina’, ‘Dorsett Golden’, ‘Anna’, ‘Salamina’, ‘Winter Banana’, ‘Early’, y ‘Pensilvania’ mostraron valores promedio del componente b (b^*) de 26,46, 26,30, 25,79, 25,49, 24,51, 20,46 y 17,80, respectivamente. La variedad ‘Reina’ tuvo el valor de componente b (b^*) más alto en su epidermis, mientras que ‘Pensilvania’ el menor.

Según Kalinowska *et al.*, (2014), los cambios de color son excelentes indicadores prácticos de la maduración de las distintas variedades de manzana, y pueden deberse a diversos procesos ya sea de degradación o de síntesis.

Durante la maduración, y dependiendo de la variedad, ocurren cambios en el color que van desde tonalidades verdes a amarillas, en gran medida gracias al anabolismo de los pigmentos en los organelos celulares como las flavonas, las antocianinas y los carotenoides (Corona-Leo *et al.*, 2020), los cuales le proporcionan al fruto colores secundarios sobre una base de color primario, que por lo general es verde o amarilla, y es determinado por la presencia de clorofila o de xantofila en su defecto (Viera *et al.*, 2009).

Esta variable es importante a la hora de pretratamientos postcosecha por ejemplo el escaldado y antipardeantes, deshidratadas hasta valores de a^* entre 0.5 y 0.7 han revelado una disminución en L^* durante el almacenamiento a 30°C. La a^* , en este sentido tiene una influencia significativa de la actividad enzimática, todavía presente después del escaldado (Cortes y Chiralt, 2008).

Potencial agroindustrial

De acuerdo a las características químicas obtenidas de las siete variedades de man-

zana procedentes del municipio de Tibaná, Boyacá, trópico alto de Colombia (Tabla 3), todas tradicionalmente cultivadas y adaptadas a esta zona, se posicionan como excelentes materias primas para la industrialización, en especial para la elaboración de jugos, néctares de frutas como también para la producción de jaleas, mermeladas y confituras (Tabla 4), pues cumplen con todos los parámetros establecidos para el procesamiento de la manzana instaurados en la re-

solución 3929 de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social. No obstante, existen variedades que, por su alto contenido de sólidos totales, son ideales para la producción de zumos y pulpa de fruta concentrada, estas son: 'Dorsett Golden' y 'Winter Banana', con 15,7 y 17,5 °Bx, respectivamente. 'Anna', por su parte, es la única variedad ideal para la elaboración de refresco de frutas, debido a su volumen de sólidos totales correspondiente a 11,25 ° Bx.

Tabla 3.

Características químicas de las siete variedades de manzana evaluadas

	Anna	Dorsett Golden	Early	Salamina	Pensilvania	Reina	Winter Banana
pH	3,84	3,91	3,87	3,59	3,91	3,74	3,87
STT	11,25	15,72	14,30	14,40	13,97	13,15	17,5
Acidez	1,418	1,15	1,04	1,17	1,15	1,11	1,38

Fuente: autores.

Tabla 4.

Potencial agroindustrial de las siete variedades de manzana de acuerdo con las características químicas para el procesamiento de la manzana según la resolución 3929 de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social

	Jugo	Pulpa de fruta azucarada	Zumo y pulpa de fruta concentrados	Néctares de frutas	Refresco de frutas	Jaleas, mermeladas y confituras	Bocadillo de frutas	Salsa de frutas
Anna	✓	X	X	✓	✓	✓	X	X
Dorsett Golden	✓	X	✓	✓	X	✓	X	X
Early	✓	X	X	✓	X	✓	X	X
Salamina	✓	X	X	✓	X	✓	X	X
Pensilvania	✓	X	X	✓	X	✓	X	X
Reina	✓	X	X	✓	X	✓	X	X
Winter Banana	✓	X	✓	✓	X	✓	X	X

X=No apta, ✓=apta

Fuente: autores.

4

CONCLUSIONES

Las variedades tradicionales muestran parámetros físicos muy favorables. La variedad ‘Pensilvania’ presentó el mayor peso y diámetro ecuatorial con respecto a las otras; por su parte, el índice de color cambió significativamente con la variedad siendo ‘Dorsett Golden’ la que expuso la mayor luminosidad de la epidermis; el valor del componente “a” más alto lo obtuvo ‘Anna’, siendo la manzana con mayor diámetro polar; mientras que la variedad ‘Reina’ tuvo una mayor firmeza del fruto.

Los resultados obtenidos en el análisis químico mostraron que la variedad ‘Winter Banana’ evidenció el mayor contenido de sólidos solubles; ‘Dorsett Golden’ obtuvo el pH y la relación de madurez más alta; y ‘Anna’ consiguió el mayor grado de acidez.

Las variedades ‘Anna’, ‘Dorsett Golden’, ‘Early’, ‘Salamina’, ‘Pensilvania’, ‘Reina’ o raya-dada y ‘Winter Banana’ son aptas para la industrialización, en especial para la elaboración de jugos, néctares de frutas al igual que para la producción de jaleas, mermeladas y confituras, debido a su excelente contenido de sólidos solubles, pH y acidez ideal.

Las variedades ‘Dorsett Golden’ y ‘Winter Banana’ se destacan como las aquellas con las mejores características fisicoquímicas para los procesos de industrialización, posicionándolas en un futuro cercano como alternativas agroindustriales importantes frente al uso de variedades comerciales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Carmenza Pérez Fagua: investigación, conceptualización, escritura, borrador original.

Yuli Alexandra Deaquiz Oyola: investigación, análisis de datos y escritura. **Aman-**

da Silva Parra: logística, revisión y edición. **Germán Eduardo Cely Reyes:** administrador del proyecto, revisión y edición. **Pedro José Almanza Merchán:** supervisión, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al grupo de investigaciones AOF de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos por el préstamo

de laboratorio de postcosecha para la realización de las pruebas en laboratorio.

FINANCIAMIENTO

No aplica

LITERATURA CITADA

AOAC. (2023). Official Method 942.15 Acidity (titratable) of fruit products. In *Official methods of analysis of AOAC International*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>

Battaglia, M. (2011). Análisis de las potencialidades de desarrollo frutícola de tipo templado in Guatemala, Departamento del Quiché, Chichicastenango. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 105(2), 143-171. <https://doi.org/10.12895/jaeid.20112.49>

Becerra, C., y Gallardo, C. (2015). Competitividad de las empresas agroindustriales de Boyacá. *Revista Criterio Libre*, 228 - 252. <https://doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.2015v13n22.138>

Bhat, Z., Pandit, A., Wani, W., & Rather, J. (2011). Effect of interstock on juvenility and tree size of 'ambri'apple. In *IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems* 903 (pp. 435-437). <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2011.903.58>

Brummell, D.A. (2006). Cell wall disassembly in ripening fruit. *Functional Plant Biology.*, 33, 103-119.

Casierra-Posada, F., Cortés, L. F., Ramírez, J. and Castro, H. (2003). Estado nutricional de árboles de manzano 'Anna' durante la estación de crecimiento en los altiplanos colombianos. i. contenido de elementos minerales. *Agronomía Colombiana*, 21(1 y 2), 75-82. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/17780>

Cepeda M., A.; Vélez-Sánchez, J. E., Bala-guera-López, H. E. (2021). Analysis of growth and physicochemical changes in apple cv. Anna in a high-altitude trop-ical climate. *Revista de Ciencias Horti-colas*, 15(2), <https://doi.org/10.17584/rch.2021v15i2.12508>

Cornille, A., Gladieux, P., Smulders, M., Roldan, I., Laurens, F., Le Cam, B. & Gi-raud, T. (2012). New insight into the history of domesticated apple: secondary con-tribution of the European wild apple to the genome of cultivated varieties. *PLoS genetics*, 8(5), <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002703>

Corona-Leo, L. S., Hernández-Martínez, D. M., y Meza-Márquez, O. G. (2020). Aná-lisis de parámetros fisicoquímicos, com-puestos fenólicos y capacidad antioxidan-te en piel, pulpa y fruto entero de cinco cultivares de manzana (*Malus domestica*)

cosechadas en México. *Biotecnia*, 22(1), 166-174. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1193>

Cortés, M., y Chiralt B, A. (2008). Cinética de los cambios de color en manzana deshidratada por aire fortificada con vitamina. *Vitae, revista de la facultad de química farmacéutica*, 15(1), 8-16. https://www.redalyc.org/pdf/1698/Resumenes/Resumen_169815394002_1.pdf

Dan, C., Sestras, A., Bozdog, C., & Sestras, R. (2015). Investigation of wild species potential to increase genetic diversity useful for apple breeding. *Genetika*, 47(3), 993-1011. <https://doi.org/10.2298/GENSR1503993D>

Del pilar, Pinzón, I., Fischer, G., y Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). *Agronomía Colombiana*, 25(1), 83-95. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/14408>

Dobrzański, B., Rabcewicz, J., & Rybczyński, R. (2006). *Handling of apple: transport techniques and efficiency vibration, damage and bruising texture, firmness and quality*. B. Dobrzański Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences. https://www.ipan.lublin.pl/wp-content/uploads/2017/03/mat_coe27.pdf

Fischer, G. y Orduz-Rodríguez, J.O. (2012). Ecofisiología en frutales. In: Fischer, G. (ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (pp. 54-72). Produmedios.

Gutiérrez-Villamil, D. A., Álvarez-Herrera, J. G., & Fischer, G. (2022). Performance of

the 'Anna' apple (*Malus domestica* Borkh.) in Tropical Highlands: A review. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 39(1), 123–141. <https://doi.org/10.22267/rcia.223901.175>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (ICONTEC). (1996). NTC 3523-1: *Industrias agrícolas. Frutas, legumbres hortalizas y tubérculos frescos. Manzana*. 2da. Edición. ICONTEC. <https://tienda.icontec.org/gp-industrias-agricolas-frutas-legumbres-hortalizas-y-tuberculos-frescos-manzana-ntc3523-1-1996.html>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2007). *Sistema de información registros estacionales Corpochivor* (Tibaná, Boyacá, Colombia).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2003). *Mapa suelos de Colombia, archivo de computador escala 1:500000: Memoria explicativa*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Kalinowska, M., Bielawska, A., Lewandowska-Siwkiewicz, H., Priebe, W., y Lewandowski, W. (2014). Apples: content of phenolic compounds vs. variety, part of apple and cultivation model, extraction of phenolic compounds, biological properties. *Plant Physiology and Biochemistry*, 84, 169-188. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.09.006>

Kalkisim O., Ozdes, D., Okcu, Z., Karabulut, B. & Senturk, H.B. (2016). Determination of pomological and morphological characteristics and chemical compositions of local apple varieties grown in Gu-

- mushane, Turkey. *Erwerbs-Obstbau*, 58, 41-48, <http://dx.doi.org/10.1007/s10341-015-0256-4>
- Ma, B., Liao, L., Peng, Q., Fang, T., Zhou, H., Korban, S., & Han, Y. (2017). Reduced representation genome sequencing reveals patterns of genetic diversity and selection in apple. *Journal of integrative plant biology*, 59(3), 190-204. <https://doi.org/10.1111/jipb.12522>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). *Resolución 003929 de 2013.* <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-3929-de-2013.pdf>
- Pinto, D. A., Fernández, Y., y Martínez, E. (2016). Costos y rendimientos de producción de tres néctares de manzana (*Pyrus malus*) variedades Anna, Pensilvania y Winter. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 7(2), 157-169. <https://doi.org/10.22490/21456453.1565>
- Puentes, G. A., Rodríguez, L. F. y Bermúdez, L. T. (2008). Análisis de grupo de las empresas productoras de frutales caducifolios del departamento de Boyacá. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 146-154. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13929/14648>
- R Core, T. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. URL <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, M., Arjona, H. E., y Galvis, J. A. (2006). Maduración del fruto de feijoa (*Acca sellowiana* Berg) en los clones 41 (Quimba) y 8-4 a temperatura ambiente en condiciones de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 24(1), 68-76. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/20008>
- Sarmiento, A. y C. Naranjo (eds.). (1997). *Frutales caducifolios: manzano, peral, durazno y ciruelo*. SIAC; Fenalce; Editorial Presencia. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/34341>
- Vieira, F.G.K., Borges, G.S.C., Copetti, C., Amboni, R.D.M.C., Denardi, F. y Fett, R. (2009). Physico-chemical and antioxidant properties of six apple cultivars (*Malus domestica* Borkh) grown in southern Brazil. *Scientia Horticulturae*, 122, 421-425. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423809002969>
- Wu, J., Gao, H., Zhao, L., Liao, X., Chen, F., Wang, Z. y Hu, X. (2007). Chemical compositional characterization of some apple cultivars. *Food Chemistry*, 103, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.030>
- Zucoloto, M., Mosbah, K., Kushad, M. y Sawwan, J. (2015). Bioactive compounds and quality characteristics of five apples cultivars. *Ciência Rural*, 45(11), 1972-1979. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141160>



Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

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