



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



<https://doi.org/10.14483/2256201X.23831>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Propiedades físicas y químicas del suelo y producción en cultivo de café con manejo convencional y sintrópico

Physical and chemical soil properties and coffee production under conventional and syntropic management

Anghie Liseth Jurado ^a, María Clara Zuluaga ^a Nelson Walter Osorio ^a

^a Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 

 Autor para correspondencia

Recibido: 25 de junio de 2025

Aceptado: 23 de febrero de 2026

Citación: Jurado, A. L., Zuluaga, M. C., & Osorio, N. W. (2026). Propiedades físicas y químicas del suelo y producción en cultivo de café con manejo convencional y sintrópico. *Colombia Forestal*, 29(2), e23831.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.23831>

Highlights

- Sistemas sintrópicos consolidados mejoran significativamente la calidad física y química del suelo.
 - La calidad del suelo mejora progresivamente con la consolidación del sistema sintrópico.
 - La mayor producción agrícola se relaciona con Ca, Mg, K y P disponible en el suelo.
 - El sistema convencional registro la mayor producción de café.
 - El estudio evidencia el valor de los sistemas sintrópicos para restauración de suelos.
-

Resumen

Se evaluó el impacto de los sistemas agrícolas sintrópico y convencional sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de *Coffea arabica* L. var. Castillo, en dos zonas cafeteras de Colombia con condiciones edafoclimáticas similares, comparando sistemas sintrópicos con diferente tiempo de implementación (un año y más de diez años) y sistemas convencionales como referencia. El sistema sintrópico de largo plazo presentó mejoras significativas en la calidad del suelo, reflejadas en mayor contenido de materia orgánica total, nutrientes esenciales, pH más favorable y mejores propiedades físicas. Sin embargo, la mayor productividad se registró en el sistema convencional de largo plazo, evidenciando que las mejoras en las propiedades físicas y químicas del suelo no se traduce de manera inmediata en mayores

rendimientos. En conjunto, los resultados indican que el manejo sintrópico prolongado favorece la funcionalidad del suelo, mientras que la respuesta productiva depende del tiempo de implementación y del diseño del sistema.

Palabras clave: agroforestería, impacto ambiental, monocultivos, sostenibilidad agrícola.

Abstract

The impact of syntropic and conventional agricultural management systems on soil physical and chemical properties and the production of *Coffea arabica* L. var. Castillo was evaluated in two coffee-growing regions of Colombia with similar edaphoclimatic conditions, syntropic systems with different implementation periods (one year and more than ten years) were compared with conventional systems used as references. The long-term syntropic system showed significant improvements in soil quality, reflected in higher total organic matter content, increased levels of essential nutrients, a more favorable pH, and improved physical properties. However, the highest productivity was recorded in the long-term conventional system, indicating that improvements in soil quality do not immediately translate into higher yields. Overall, the results indicate that prolonged syntropic management enhances soil functionality, whereas productive responses depend on the implementation period and system design

Keywords: Agroforestry, environmental impact, monocultures, agricultural sustainability.

INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye un sector estratégico para la producción de alimentos y el desarrollo económico a nivel mundial (Bula A., 2020). Además de generar empleo e ingresos, impulsa el crecimiento social y económico, especialmente en las zonas rurales (Sarandón, 2020). Sin embargo, el crecimiento poblacional y la demanda intensificada han incentivado la expansión de sistemas agrícolas convencionales, caracterizados por el uso excesivo de agroquímicos y la mecanización (FAO, 2019). Aunque estas prácticas incrementan la productividad a corto plazo, también pueden generar impactos negativos como la degradación del suelo, la pérdida de fertilidad y la disminución de la biodiversidad (Rosset, 2001; Altieri, 2009; De Marco & Kunin, 2022).

Frente a estos impactos, han surgido enfoques alternativos como la agricultura sintrópica, una estrategia regenerativa basada en la sucesión natural de especies y el manejo de policultivos. Este modelo busca imitar procesos ecológicos para producir alimentos, restaurando simultáneamente la fertilidad del suelo y la biodiversidad (Machín & López, 2012; Fao & Gtis, 2015; Gotsch, 2021). Aunque sus beneficios han sido documentados en países como Brasil y Costa Rica (Fallas *et al.*, 2009; Gietzen, 2020), Colombia carece de evidencia técnica que permita evaluar los efectos reales del manejo sintrópico frente al convencional en condiciones cafeteras, esta ausencia de información limita el diseño de estrategias productivas sostenibles adaptadas al contexto local.

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo analizar comparativamente las propiedades físicas y químicas del suelo y evaluar la productividad agrícola bajo sistemas de cultivo sintrópico y convencional en dos regiones cafeteras: el resguardo indígena Nasawe'sx (Tolima) y la finca La Granjita (Huila), las cuales comparten una economía centrada en la producción de café (Ospina Enciso, 2022; Farfán-Valencia, 2021). Al evaluar el

impacto de estas prácticas de manejo a corto y mediano plazo, esta investigación busca aportar evidencia técnica para optimizar el manejo del suelo, promover decisiones agrícolas sostenibles y fortalecer el conocimiento sobre agricultura sintrópica en el contexto colombiano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en dos zonas cafeteras de la región andina de Colombia, ambas con suelos del orden Inceptisol, pendientes entre 50 y 75 % y condiciones edafoclimáticas comparables ([Figura 1](#)). La primera zona se localiza en el resguardo indígena Nasawé'sx, vereda San Pedro, corregimiento de Gaitania (Tolima), a una altitud de 1 595 m de altitud, con topografía montañosa, precipitación media anual de 2 039 mm, humedad relativa del 73 % y temperatura promedio de 23 °C. El suelo en esta zona corresponde taxonómicamente a un Inceptisol - Typic Dystrudept ([Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Planadas, 2020](#); [Corporación Autónoma Regional del Tolima \[CORTOLIMA\], 2018](#); [Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2018](#)).

La segunda zona se ubica en el corregimiento de La Laguna, municipio de Pitalito (Huila), a 1 565 m de altitud, precipitación media anual de 2 100 mm, humedad relativa del 76 % y temperatura promedio de 24 °C. En esta zona predominan suelos del orden Inceptisol - Oxic Dystrudept ([IGAC, 2018](#)).

La similitud en las condiciones climáticas y de tipos de suelos entre ambas localidades permitió establecer una comparación técnica válida entre los sistemas de cultivo sintrópico y convencional en contextos agroecológicos equivalentes.

Establecimiento de parcelas experimentales

Se seleccionaron dos zonas cafeteras descritas anteriormente, con cultivos establecidos de *Coffea arabica* L., variedad Castillo, de tres años. En la zona uno se delimitaron parcelas para los dos sistemas agrícolas evaluados: sintrópico y convencional. Las parcelas sintrópicas fueron implementadas un año antes del muestreo, mediante la incorporación de especies perennes, leguminosas, frutales, maderables, cultivos transitorios y otras especies ecológicamente funcionales. El manejo incluyó preparación del terreno, siembra, podas estratégicas y fertilización orgánica. El diseño se estructuró con base en los principios de agricultura sintrópica descritos por [Götsch \(2016\)](#), adaptados a las condiciones locales. El sistema convencional mantuvo prácticas convencionales, con fertilización química basada en análisis de suelo.

En la zona dos, las parcelas sintrópicas contaban con más de diez años de implementación, constituyendo un sistema consolidado. Las parcelas convencionales, por su parte, continuaron bajo manejo convencional. Ambos sistemas conservaron sus condiciones de manejo previas hasta el momento del muestreo.

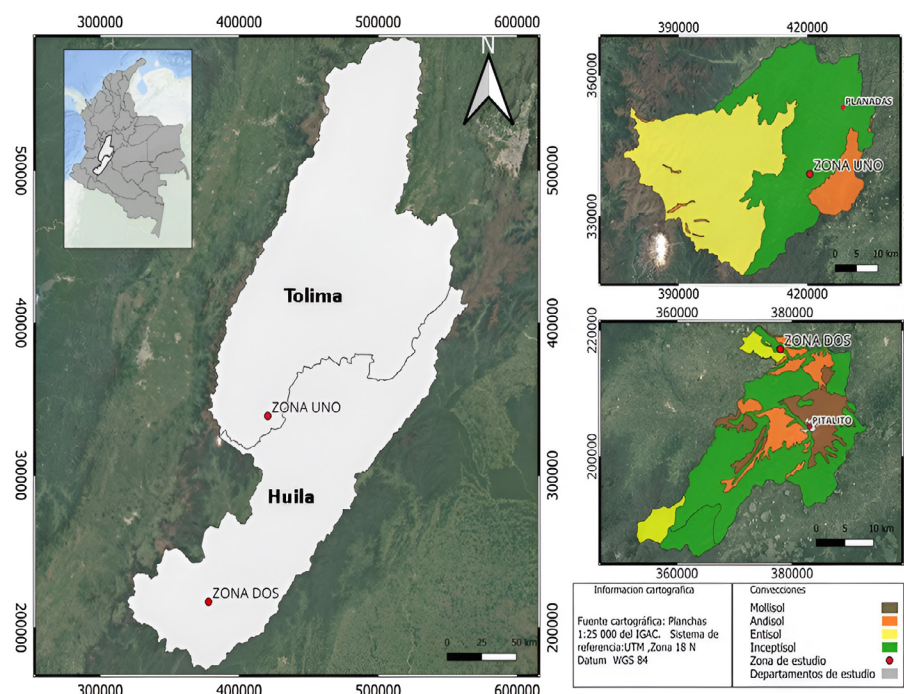


Figura 1. Mapa de localización geográfica y clasificación taxonómica de los suelos en las zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia con información del IGAC ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020](#))

Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental con parcelas fijas por tratamiento, sin aleatorización, debido a que los sistemas agrícolas ya estaban establecidos. Se evaluaron un total de 18 parcelas de 6 × 6 m cada una, establecidas con 18 m de separación entre parcelas para evitar efectos de borde y asegurar la independencia espacial de las unidades experimentales ([Condo Plaza & Pazmiño Guadalupe, 2015](#)).

La distribución comprendió dos zonas de estudio. En la zona uno se establecieron 12 parcelas (6 sintrópicas y 6 convencionales), mientras que en la zona dos se evaluaron 6 parcelas (3 sintrópicas y 3 convencionales). Con base en esta distribución, los tratamientos quedaron definidos como: S1 (sintrópico – zona uno, n = 6), C1 (convencional – zona uno, n = 6), S2 (sintrópico – zona dos, n = 3) y C2 (convencional – zona dos, n = 3). Las parcelas fueron seleccionadas por su representatividad y por presentar contrastes definidos en el historial de manejo agrícola.

La producción se registró de manera sistemática en el mismo número de árboles por parcela durante 12 meses. Finalmente se recolectaron muestras compuestas de suelo, seleccionando aleatoriamente puntos dentro de cada parcela siguiendo el protocolo del ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi \[IGAC\], 2013](#)). Estas muestras se analizaron para determinar propiedades químicas (pH, materia orgánica, N, P, K, Mg, Ca, S, B, Cu, Fe, Zn y Mn) y físicas (densidad aparente, porosidad y textura).

El manejo del sistema sintrópico se basó en principios agroecológicos, como la diversificación de especies, la aplicación de extractos fermentados de ajo y ají, cobertura vegetal permanente, nutrición mediante reciclaje

de biomasa, y aplicaciones periódicas de compost de subproductos del café y estiércol curado (Celis *et al.*, 2008; Román, *et al.*, 2013). El manejo convencional incluyó dos aplicaciones anuales de fertilizantes sintéticos (N, P, K + micronutrientes), con una dosis de 120 g por árbol por aplicación.

Para minimizar el efecto de variables externas, las parcelas fueron seleccionadas en áreas con condiciones ambientales similares dentro de cada zona. Finalmente, se realizó un análisis estadístico para evaluar las diferencias entre sistemas agrícolas y explorar las relaciones entre las variables medidas.

Muestreo y análisis físico y químico del suelo

El muestreo de suelo se realizó al finalizar el primer año de manejo de los sistemas agrícolas, siguiendo las directrices de la (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2009) y los protocolos del (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2013). En cada parcela se recolectó una muestra compuesta, formada por submuestras aleatorias tomadas en la zona radicular (0–20 cm), de acuerdo con las recomendaciones del (United States Department of Agriculture [USDA], 2002). Las submuestras se homogeneizaron en campo para conformar una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg por parcela (Carnicer *et al.*, 2020). Posteriormente, las muestras fueron secadas al aire, depuradas manualmente para eliminar residuos visibles como raíces, fragmentos líticos y materia orgánica gruesa, para posteriormente ser almacenadas en bolsas plásticas herméticas, siguiendo los protocolos recomendados para la conservación de muestras de suelo (Schoeneberger *et al.*, 2012).

Los análisis físicos y químicos fueron realizados en un laboratorio certificado Morantes S.A.S., aplicando metodologías estandarizadas: potenciometría en relación suelo: agua: 1:1 para la determinación del pH, soluciones extractoras y métodos colorimétricos USDA/EPA para la determinación de elementos químicos y Bouyoucos para textura.

Producción de café

La cosecha de frutos maduros se realizó siguiendo los lineamientos técnicos para la evaluación productiva establecidos por la Federación Nacional de Cafeteros (Cenicafé, 2019), durante un período continuo de 12 meses). En cada parcela se evaluaron 16 árboles, identificados individualmente mediante recolecciones periódicas. Los frutos cosechados fueron pesados con una balanza calibrada, lo que permitió calcular la producción por árbol y por parcela.

Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias entre tratamientos, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seleccionada por su robustez ante datos que no cumplen normalidad ni homogeneidad de varianzas requeridos por ANOVA, condiciones frecuentes en variables físicas, químicas del suelo y productivas (Zamora Mayorga *et al.*, 2023). En los casos en que se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizaron comparaciones post hoc mediante la prueba de Mann-Whitney apropiada para contrastes pareados sin supuestos paramétricos (Goss, 2019).

Adicionalmente, se empleó un análisis de componentes principales (PCA) para explorar la variabilidad multivariada de las propiedades del suelo y la producción, así como su asociación con los sistemas agrícolas y las zonas evaluadas (Celis *et al.*, 2008; Zapotitlan Roman, 2020). Las diferencias estadísticas entre grupos se representaron gráficamente mediante letras distintas, los grupos que no presentaron diferencias significativas compartieron la misma letra. Todos los análisis se realizaron utilizando los programas estadísticos InfoStat, R/ Rstudio (R Core Team, 2024; Posit software PBC, 2024; Grupo InfoStat, 2020).

RESULTADOS

Análisis físicos y químicos del suelo

Se evaluaron 18 parámetros del suelo, incluyendo variables químicas (pH, elementos mayores y menores) y físicas (densidad aparente, densidad real, porosidad total y textura). los valores promedio $\pm$ desviación estándar, acompañados de letras que indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas agrícolas ($p < 0.05$) (Tabla 1). Los resultados reflejan el efecto del tipo de manejo (sintrópico y convencional) y del tiempo de implementación (corto y largo plazo) sobre la calidad y dinámica del suelo.

Tabla 1. Valores promedio $\pm$ desviación estándar de las variables físicas y químicas del suelo evaluadas en los tratamientos correspondientes a la zona uno (S1 = sintrópico, C1 = convencional) y zona dos (S2 = sintrópico, C2 = convencional). Las letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Comparaciones horizontales.

Variable	Unidad	S1	C1	S2	C2
pH	-	4.58 $\pm$ 0.13 ab	4.43 $\pm$ 0.18 b	5.13 $\pm$ 0.15 a	4.60 $\pm$ 0.10 ab
M.O	%	5.10 $\pm$ 0.10 b	5.02 $\pm$ 0.12 b	7.47 $\pm$ 0.12 a	5.47 $\pm$ 0.06 b
AL	cmolc.kg ⁻¹ (meq.100 g ⁻¹)	1.13 $\pm$ 0.03 b	1.29 $\pm$ 0.07 b	0.27 $\pm$ 0.06 a	1.29 $\pm$ 0.11 b
N	mg.kg ⁻¹ (ppm)	35.72 $\pm$ 0.43 b	37.95 $\pm$ 1.13 b	55.63 $\pm$ 0.70 a	36.37 $\pm$ 0.89 b
P	mg.kg ⁻¹ (ppm)	5.07 $\pm$ 0.09 b	5.20 $\pm$ 0.07 b	6.60 $\pm$ 0.10 a	7.83 $\pm$ 0.12 a
K	cmolc.kg ⁻¹ (meq.100 g ⁻¹)	0.23 $\pm$ 0.03 b	0.33 $\pm$ 0.05 b	0.53 $\pm$ 0.03 a	0.74 $\pm$ 0.02 a
Ca ⁺⁺	cmolc.kg ⁻¹ (meq.100 g ⁻¹)	1.15 $\pm$ 0.15 b	1.58 $\pm$ 0.23 b	1.02 $\pm$ 0.12 b	2.02 $\pm$ 0.23 a
Mg ⁺⁺	cmolc.kg ⁻¹ (meq.100 g ⁻¹)	0.25 $\pm$ 0.02 b	0.35 $\pm$ 0.06 b	0.72 $\pm$ 0.03 a	0.39 $\pm$ 0.08 b
S-SO ₄ ⁼	mg.kg ⁻¹ (ppm)	13.83 $\pm$ 0.57 b	15.97 $\pm$ 0.62 b	7.03 $\pm$ 0.15 a	11.90 $\pm$ 0.56 ab
B	mg.kg ⁻¹ (ppm)	0.21 $\pm$ 0.03 ab	0.18 $\pm$ 0.02 ab	0.30 $\pm$ 0.10 a	0.18 $\pm$ 0.03 ab
Cu	mg.kg ⁻¹ (ppm)	0.13 $\pm$ 0.02 b	0.16 $\pm$ 0.02 b	0.38 $\pm$ 0.03 a	0.23 $\pm$ 0.03 ab
Fe	mg.kg ⁻¹ (ppm)	0.20 $\pm$ 0.04 b	0.20 $\pm$ 0.03 b	0.50 $\pm$ 0.10 a	0.50 $\pm$ 0.20 a
Mn	mg.kg ⁻¹ (ppm)	0.49 $\pm$ 0.06 ab	0.39 $\pm$ 0.08 ab	0.47 $\pm$ 0.16 ab	0.70 $\pm$ 0.10 a
Zn	mg.kg ⁻¹ (ppm)	0.26 $\pm$ 0.05 ab	0.31 $\pm$ 0.03 ab	0.21 $\pm$ 0.01 ab	0.18 $\pm$ 0.02 b
Da	g.cm ⁻³	1.14 $\pm$ 0.02 b	1.26 $\pm$ 0.01 b	1.09 $\pm$ 0.02 a	1.34 $\pm$ 0.01 b
Dr	g.cm ⁻³	2.62 $\pm$ 0.00 a	2.62 $\pm$ 0.00 a	2.60 $\pm$ 0.00 a	2.60 $\pm$ 0.00 a
Pt	%	56.5 $\pm$ 0.6 a	51.9 $\pm$ 0.5 ab	58.48 $\pm$ 0.65 a	48.5 $\pm$ 0.4 b
Textura	USDA	Arcillo-Arenosa (ArA)		Franco Arcillo Arenosa (FArA)	

Nota: Los valores corresponden a media ($\bar{X}$) $\pm$ desviación estándar (DE). Zona uno (n = 6). Zona dos (n = 3) para cada sistema agrícola: MO=materia orgánica Textura = tipo de suelo; Da = Densidad aparente; Dr = Densidad real; Pt = Porosidad total.

Parámetros del suelo con mayor variabilidad entre tratamientos

A partir de los resultados obtenidos se identificaron los parámetros del suelo con mayor variabilidad y diferencias significativas entre tratamientos: aluminio, materia orgánica total, fósforo, potasio, pH y densidad aparente. Para su representación se utilizaron diagramas de caja (boxplots) (Figura 2), cada punto representando una réplica individual. Estas gráficas permiten visualizar la tendencia central, la dispersión de los datos y las diferencias estadísticas entre tratamientos evaluadas mediante pruebas de comparación múltiple ($p < 0.05$) (Obando-Bastidas & Castellanos sanchez, 2021). Los boxplots complementan los datos tabulados proporcionando una representación clara de las variables más sensibles al tipo de manejo agrícola.

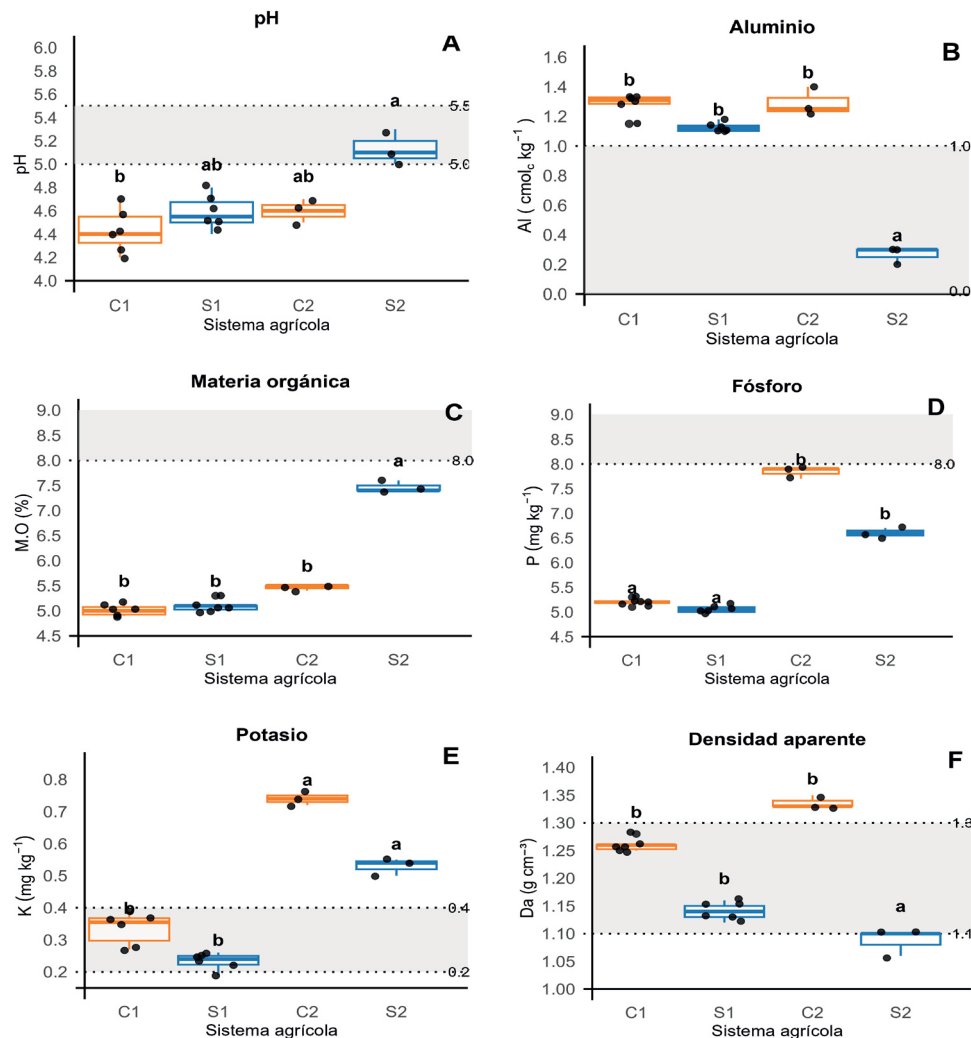


Figura 2. Diagramas de caja comparativos de los parámetros del suelo con mayor variabilidad entre tratamientos: (A). pH, (B). Al, (C). materia orgánica total, (D). fósforo (P), (E). potasio (K), y (F) densidad aparente. Se presentan los resultados para ambas zonas de estudio: zona 1 (S1 = sintrópico. C1 = convencional) y zona 2 (S2 = sintrópico. C2 = convencional). La línea punteada representa los rangos óptimos de referencia para el cultivo de café, según Cenicafé

Análisis multivariado de las propiedades físicas y químicas del suelo

Para identificar patrones generales de variación y asociaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo en los sistemas agrícolas evaluados, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). El biplot obtenido (Figura 3) representa la distribución de las réplicas individuales en el espacio definido por las dos primeras componentes principales que explican en conjunto el 82.9 % de la varianza total.

Las flechas indican la dirección e intensidad de la contribución de cada variable, cuya longitud refleja su aporte relativo a la varianza explicada por los primeros dos componentes (Dim1 = 53.5 % y Dim2 = 29.4 %), mientras que la posición relativa de los tratamientos refleja su agrupamiento multivariado. El tratamiento sintrópico de la zona 2 (S2) se asoció positivamente con variables como materia orgánica total, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y porosidad, ubicándose en el extremo positivo de Dim1, lo que sugiere un efecto positivo de largo plazo del manejo sintrópico. En contraste, el tratamiento C2 se relacionó principalmente con concentraciones más altas de manganeso (Mn) y calcio (Ca), situándose en la parte superior del biplot, dentro del eje positivo de Dim2. Por su parte, los tratamientos de la zona 1 (S1 y C1) se ubicaron en el extremo negativo de Dim1, caracterizados por niveles más altos de aluminio, zinc y densidad aparente.

Este análisis multivariado evidencia una clara diferenciación entre sistemas de manejo y zonas, en concordancia con los resultados univariados y resalta el impacto positivo del manejo sintrópico particularmente en sistemas con mayor tiempo de implementación.

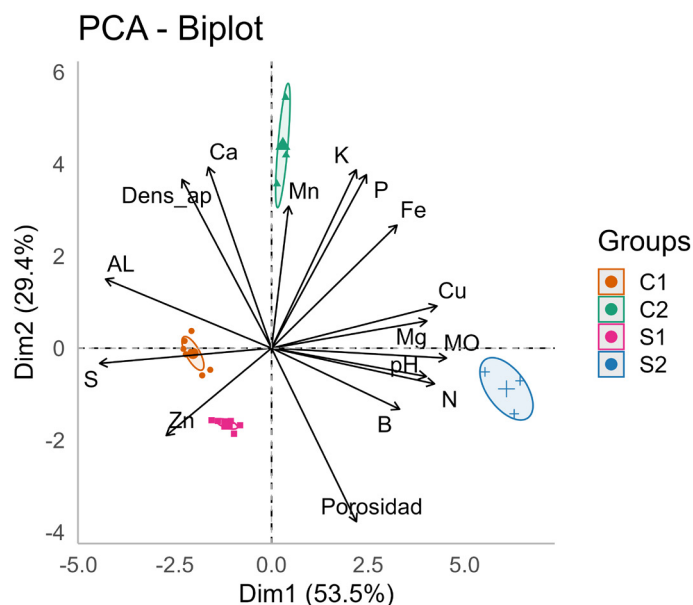


Figura 3. Biplot del análisis de componentes principales (PCA) basado en las propiedades físico-químicas del suelo evaluadas en los cuatro sistemas agrícolas. Las dos primeras componentes principales explican el 82.9 % de la varianza total (Dim1: 53.5 %. Dim2: 29.4 %). Las flechas indican la dirección y magnitud de la contribución de cada variable. Cada punto representa una réplica individual y las elipses de confianza al 95 % delimitan la dispersión de los tratamientos en el espacio multivariado.

Producción de café

Se observaron diferencias significativas en la producción promedio anual de café cereza entre los tratamientos evaluados ([Figura 4](#)). El tratamiento C2 presentó la mayor producción (1 757 g. árbol⁻¹.año⁻¹; letra a), superando de forma significativa a S2 (bc) y a S1 (c). El tratamiento C1 (ab) mostró un rendimiento intermedio: no difirió estadísticamente de C2 ni de S2, pero sí fue significativamente superior a S1, que registró la menor producción entre los tratamientos.

Asimismo, los tratamientos de la zona 2 (C2 y S2) tendieron a presentar rendimientos mayores que los de la zona 1 (C1 y S1), aunque con diferencias internas asociadas al tipo de manejo. Los intervalos de error indican una variabilidad moderada entre tratamientos, sin desviaciones respecto a los patrones significativos observados.

DISCUSION

Los resultados obtenidos indican que los sistemas sintrópicos, particularmente aquellos con mayor tiempo de implementación, promueven mejoras en diversos atributos físicos y químicos del suelo. En coherencia con estos cambios, la producción de café mostró un comportamiento asociado al tiempo de establecimiento del sistema, reflejando diferencias en rendimiento entre las etapas tempranas y los sistemas consolidados. ([Celis et al., 2008](#); [Román, Martínez & Pantoja, 2013](#); [Astier et al., 2002](#)).

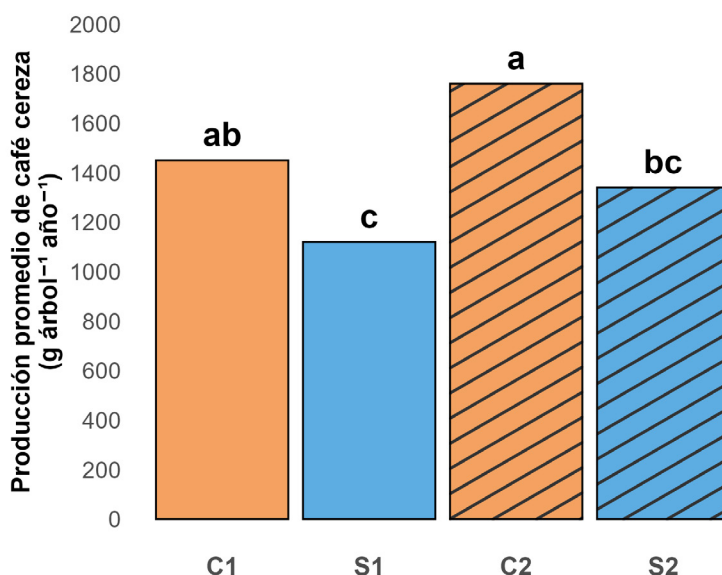


Figura 4. Producción acumulada anual de café cereza, expresada en gramos por árbol, correspondiente al ciclo productivo de doce meses. Se indican los valores promedio para cada tratamiento. Letras distintas sobre las barras representan diferencias significativas entre tratamientos.

Cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo

El sistema sintrópico de largo plazo (S2; >10 años) presentó incrementos significativos en materia orgánica total, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), pH y porosidad en comparación con los demás sistemas evaluados. No obstante, parte del aumento observado en materia orgánica podría corresponder a fracciones lábiles o material en descomposición, más que a materia orgánica estable (MOS), un comportamiento reportado en sistemas agroecológicos bajo manejo orgánico continuo (Carnicer *et al.*, 2020; Lefèvre *et al.*, 2017; Aguirre Forero *et al.*, 2022).

El incremento del pH hacia niveles óptimos para café y la disminución del aluminio en S2 reflejan el efecto positivo de las enmiendas orgánicas sobre la acidez del suelo, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes. Este efecto ha sido ampliamente documentado en suelos cafeteros ácidos, donde la reducción del Al mejora la absorción de Ca, Mg y P (Sadeghian, 2021; Campillo & Sadzawka, 2006; Ortiz *et al.*, 2004). Además, la mayor porosidad y menor densidad aparente observadas en S2 sugieren que la acumulación continua de residuos orgánicos y la actividad biológica promueven la formación de agregados estables, un proceso característico de Inceptisoles bajo manejo agroecológico prolongado (Bastidas & Castellanos, 2021; Akila *et al.*, 2019).

El análisis de componentes principales (PCA) posicionó a S2 en el extremo positivo de Dim1, evidenciando que los efectos regenerativos del manejo sintrópico se consolidan con el tiempo. Este patrón concuerda con estudios que reportan efectos acumulativos del manejo agroecológico prolongado sobre la calidad integral del suelo (Restrepo *et al.*, 2012; Schreefel *et al.*, 2020; Martínez & Nicholls, 2022). En contraste, el sistema sintrópico de corto plazo (S1) mostró resultados similares al manejo convencional (C1) en la mayoría de los parámetros físicos y químicos del suelo, incluidos Zn y S, lo que indica que la respuesta del suelo a prácticas regenerativas se manifiesta con mayor intensidad en escalas temporales prolongadas, alcanzando incrementos del orden de 30–56% en variables asociadas a la materia orgánica y el nitrógeno, superiores al 100% en algunos cationes básicos, y reducciones cercanas al 70% en aluminio intercambiable después de más de una década de implementación. (Rivera *et al.*, 2010).

Respuesta productiva

La producción de café reflejó esta dinámica del suelo. En S1, la producción fue la menor del estudio (≈ 1100 g.árbol⁻¹.año⁻¹), 21.9 % inferior al manejo convencional de la misma zona, lo cual puede atribuirse a que los recursos del sistema se destinan prioritariamente al establecimiento de coberturas, estratos y especies acompañantes, generando competencia inicial por luz y nutrientes, una condición típica de sistemas agroforestales en etapas tempranas (García, 2019; Xiong, 2015).

En S2, la producción de café (≈ 1400 g.árbol⁻¹.año⁻¹) se aproximó a la del sistema convencional de la misma zona (≈ 1600 g.árbol⁻¹.año⁻¹), con una reducción relativa de solo 11.2 %. Este comportamiento sugiere que la mejora progresiva de la MOS, la estructura del suelo y el pH contribuye a estabilizar el rendimiento a medida que el sistema se consolida, como ha sido reportado en sistemas agroforestales de largo plazo (Gustin *et al.*, 2014; FAO, 2017).

La diferencia en productividad entre los sistemas también puede explicarse por la forma de suministro de nutrientes. Mientras la fertilización química directa en C2 proporciona nutrientes de disponibilidad inmediata, las

enmiendas orgánicas liberan nutrientes de forma gradual, lo que puede limitar la productividad inicial en sistemas sintrópicos en transición. Asimismo, la sombra y la competencia por recursos entre especies acompañantes podrían contribuir a la menor producción relativa observada en S2 (Cenicafé, 2019; Zamora Mayorga *et al.*, 2023).

Relación entre calidad del suelo y producción

Aunque S2 presentó la mejor calidad del suelo, no alcanzó la máxima productividad, evidenciando que, en sistemas sintrópicos maduros, la producción depende no solo de la fertilidad del suelo, sino también de la estructura del sistema, su densidad y diversidad, así como del manejo de las especies acompañantes. Este resultado coincide con la literatura de agroforestería, que indica que la diversificación maximiza funciones ecosistémicas como la regulación del suelo, el microclima y la biodiversidad sin garantizar necesariamente rendimientos máximos en ausencia de un diseño y manejo cuidadosos (Celis *et al.*, 2008; Schreefel *et al.*, 2020; Martínez & Nicholls, 2022; Andrade *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

Los sistemas sintrópicos mejoran progresivamente la calidad física y química del suelo en caficultura, especialmente cuando se implementan a largo plazo, evidenciando incrementos en materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, pH y propiedades físicas del suelo. Sin embargo, la respuesta productiva del cultivo de café es gradual y depende tanto del tiempo de implementación como del diseño y manejo del sistema, ya que en etapas tempranas la competencia por recursos y la liberación lenta de nutrientes pueden limitar el rendimiento. En sistemas sintrópicos consolidados, la mejora de la funcionalidad de las propiedades físicas y químicas del suelo contribuye a estabilizar la producción, aunque no garantiza aumento en los rendimientos.

En este contexto, la productividad en sistemas sintrópicos también dependen de la estructura del sistema, la densidad y diversidad de especies acompañantes. En conjunto, los resultados confirman que los sistemas sintrópicos constituyen una estrategia viable para fortalecer la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas cafeteros, siempre que se adopten diseños y manejos adaptados a las condiciones locales y a los objetivos productivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para estudios de maestría en el marco de la Convocatoria 7. Asimismo, extienden su reconocimiento al Programa de Maestría en Geomorfología y Suelos de la Universidad Nacional de Colombia y a su cuerpo docente por el acompañamiento académico y formativo recibido a lo largo de este proceso.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Todos los autores contribuyeron en el desarrollo de la metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, redacción, revisión y edición.

DECLARACIÓN DE USO DE IA

Herramienta utilizada: ChatGPT (OpenAI).

Propósito del uso: La herramienta fue utilizada de manera ocasional y limitada para apoyar la revisión de la redacción, la claridad expositiva y la corrección gramatical de algunos fragmentos del manuscrito.

Prompts o instrucciones proporcionadas: Se realizaron consultas puntuales orientadas a mejorar la redacción académica y la claridad de determinados textos, mediante instrucciones como: “mejorar la redacción de este párrafo”, “corregir la gramática” o “hacer más claro el siguiente texto”.

Uso del contenido generado: Las respuestas proporcionadas por la herramienta se utilizaron únicamente como apoyo editorial. Las sugerencias fueron revisadas y adaptadas en algunos fragmentos del manuscrito.

Revisión y edición: Todo el contenido sugerido por la herramienta fue revisado, verificado y editado por los autores antes de su incorporación. Los autores son plenamente responsables de la exactitud, originalidad e integridad científica del manuscrito.

Limitaciones y consideraciones éticas: La herramienta no fue utilizada para la generación de datos, el diseño metodológico, el análisis estadístico, la interpretación de resultados ni la elaboración de conclusiones. Su uso se limitó exclusivamente al apoyo lingüístico y editorial. Los autores verificaron la información incorporada y tuvieron en cuenta las posibles limitaciones inherentes a las herramientas de la inteligencia artificial.

REFERENCIAS

Aguirre Forero, S. E., Piraneque Gambasica, N. V., & Cruz O’Byrne, R. K. (2022). Relación entre nutrientes, carbono, nitrógeno y materia orgánica en suelos de la zona bananera de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 93–112.
<https://doi.org/10.22490/21456453.5186>

- Akila, G., Mahendran, P. P., Subramanian, E., & Pandian, P. S.** (2019). Effect of soil and foliar fertilization of copper on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) in Typic haplustalfs of Tamil Nadu. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), 2639–2643.
<https://www.chemijournal.com/archives/?ArticleId=5898&issue=3&vol=7&year=2019>
- Altieri, M. A.** (2009). *Modern agriculture: Ecological impacts and the possibilities for truly sustainable farming*. University of California, Berkeley.
https://agroeco.org/wpcontent/uploads/2011/02/ecol_impact_modern_ag.pdf
- Andrade, A. L., Cerón Chacón, V., Gómez Duque, J. R., Hormiga García, D. N., Mejía Giraldo, L. M., & Torres Valenzuela, L. S.** (2015). Características del suelo en los cultivos de cafés especiales del municipio de Calarcá – Colombia. *UG-Ciencia*, 21, 29–38.
<https://doi.org/10.18634/ugcj.21v.1i.421>
- Astier, C. M., Maass, M. M., & Etchevers, B. J.** (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36, 605–620.
<http://www.redalyc.org/pdf/302/30236511.pdf>
- Bula, A.** (2020). *Importancia de la agricultura en el desarrollo socioeconómico* (Puente Académico N.º 16). Observatorio Económico Social, Universidad Nacional de Rosario.
<https://observatorio.unr.edu.ar/wp-content/uploads/2020/08/Importancia-de-la-agricultura-en-el-desarrollo-socio-econ%C3%B3mico.pdf>
- Calle, Z., Falla, P., Gutiérrez, J., Martínez, C., & Nicholls, C.** (2022). *Lineamientos para la transición hacia la regeneración de los sistemas alimentarios de Antioquia*. Gobernación de Antioquia; FOLU Colombia; Comfama.
<https://folucolombia.org/wp-content/uploads/2022/10/Lineamientos-para-la-regeneracion.pdf>
- Campillo, R. R., & Sadzawka, R. A.** (2006). La acidificación de los suelos. Origen y mecanismo involucrados. En R. Campillo R. (Ed.), *Manejo de los recursos naturales en el sistema de incentivos para la recuperación de suelos degradados de la Araucanía* (Serie de actas N.º 38, pp. 44–60). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).
<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/la-acidificacion-de-los-suelos-origen-y-mecanismos-involucrados.pdf>
- Carnicer, S., Porta, M., & Pérez, G.** (2020). *Guía para muestreo de suelos agrícolas* (Boletín Técnico N.º 43). Instituto Agrotécnico “Pedro M. Fuentes Godo”, Universidad Nacional del Nordeste.
<http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/51132>
- Celis, Á., Mendoza, C., Pachón, M., Cardona, J., Delgado, W., & Cuca, L. E.** (2008). Extractos vegetales utilizados como biocontroladores con énfasis en la familia Piperaceae. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 97–106.
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/19755>

-
- Centro Nacional de Investigaciones de Café.** (2019). *Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila: 2015–2019* (Vol. 1). Cenicafé.
<https://doi.org/10.38141/cenbook-0005>
- Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Planadas.** (2020). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres: Municipio de Planadas, Departamento del Tolima*. Alcaldía Municipal de Planadas.
https://cortolima.gov.co/images/Gestion_riesgo_PMGRD/2020/PMGRD_PLANADAS_2020.pdf
- Condo Plaza, L. A., & Pazmiño Guadalupe, J. M.** (2015). *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias* (Tomo 2). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Instituto de Investigaciones.
<https://es.scribd.com/document/919629145/Condo-A-Pazmino-J-2015-Diseno-Experimental-en-el-desarrollo-del-conocimiento-cientifico-de-las-ciencias-agropecuarias-tomo-2>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima.** (2018). *Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Tolima: “Ruta Dulima. El Tolima enfrenta el cambio en el clima”* (Documento técnico de soporte). Cortolima.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/PNACC/PIGCCT%20Tolima.pdf>
- De Marco, C., & Kunin, J.** (2022). Agricultura convencional, educación y poblaciones infantojuveniles: Las miradas de AACREA y Aapresid. *Anuario del Instituto de Historia Argentina*, 22(1), e161.
<https://doi.org/10.24215/2314257Xe161>
- Fallas, G., Chacón, M., & Castro, J.** (2009). Sostenibilidad de sistemas agrícolas de fincas ecológicas y tradicionales en Costa Rica. *UNED Research Journal*, 1(2), 151–161.
<https://doi.org/10.22458/urj.v1i2.228>
- Farfán-Valencia, F.** (2021). La caficultura bajo sombra para el departamento de Huila. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila*: Vol. 2. 2015-2021. (pp. 96–123). Cenicafé.
https://doi.org/10.38141/10791/0008_4
- Food and Agriculture Organization of the United Nations.** (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4.ª ed.). FAO.
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/a0541s>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations.** (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. FAO.
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i6874es>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations.** (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. FAO.
<https://www.fao.org/3/ca6030es/CA6030ES.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations & Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos.** (2015). *Estado mundial del recurso suelo: Resumen técnico*. FAO.
<http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>

Grupo Carlos García, CEBAS-CSIC. (2019). *Reciclado en suelos de enmiendas orgánicas de calidad: Manejo para un suelo sostenible y estrategias contra la degradación y erosión de los suelos*. ECODES.

https://ecodes.org/images/quehacemos/pdf_MITECO_2019/Reciclado_en_suelos_de_enmiendas_organicas.pdf

Gietzen, R. (2020). Roger Gietzen on the topic of syntropic farming. *ECHO Development Notes*, (146).

<http://edn.link/r4fcfd>

Goss, M. A. (2019). *Análisis estadístico con JASP: Una guía para estudiantes* (J. Meneses, trad.). Universitat Oberta de Catalunya.

<https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/6a94ec31-0e0b-4c3b-a1ef-160b6e386f79/content>

Götsch, E. (s.f). *El renacer de la agricultura* (C. Gallardo Nieto, comp.). Scribd.

<https://es.scribd.com/document/452067675/El-renacer-de-la-agricultura-Ernest-Gostsch>

Funzalida, F., & Placencia, E. (2021). *El Tao de Ernst Gotsch*. AguaTierra Ediciones.

<https://revistaecociencias.cl/wp-content/uploads/2021/09/tao-gotsch-final.pdf>

Grupo InfoStat. (2020). *InfoStat* (Version 2020) [Computer software]. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.

<https://www.infostat.com.ar/>

Gustin Gómez, Y. C., Morales Jamioy, N. C., & Ortiz Estrella, C. D. (2014). *Evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores en sistemas de manejo frijol (Phaseolus vulgaris L.), granadilla (Passiflora ligularis), bosque y chagras tradicionales en el municipio de Sibundoy, Putumayo* [Trabajo de grado]. Instituto Tecnológico del Putumayo.

<https://itp.edu.co/ITP2022/wp-content/uploads/2018/08/INDICADORES-DE-CALIDAD-DE-SUELO-SAM-2014.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). *Guía de muestreo de suelos y de aguas para análisis físicoquímico y biológico* (p. 8). IGAC.

<https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiademuestreo.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Mapa digital de suelos del departamento del Huila a escala 1:100 000* [Datos geoespaciales]. IGAC.

<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo: El Potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>

Machín Barroso, N., & López-Manzanares Fernández, F. (2012). *Agricultura y medio ambiente: Equilibrio territorial*. Excom. Cabildo Insular de Tenerife.

https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/pta_458_Criterios%20ambientales.pdf

- Obando Bastidas, J. A., & Castellanos Sánchez, M. T.** (2021). *Gráficos Estadísticos: Guía Práctica Para Estadística Descriptiva* (Guías Prácticas. Generación de contenidos impresos N.º 8). Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia.
<https://doi.org/10.16925/gcgp.32>
- Ortiz Escobar, M. E., Zapata Hernández, R. D., Sadeghian Khalajabadi, S., & Franco Alvarez, H. F.** (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé*, 55(2), 101–110.
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/165/1/arc055%2802%29101-110.pdf>
- Ospina, A. F.** (2022). El espíritu verdadero y el enemigo falaz. Creencias religiosas evangélicas e indígenas y recomposición étnica en Nasa Wex, sur del Tolima. *Revista Colombiana de Sociología*, 45(1), 197–217.
<https://doi.org/10.15446/rcs.v45n1.90229>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia y Resguardo Nasawé'sx de Gaitania.** (2018). *Régimen especial de manejo: Resguardo Nasawé'sx de Gaitania – Parque Nacional Natural Nevado del Huila*. Parques Nacionales Naturales de Colombia.
<http://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2022/08/rem-actualizado-resguardo-nasawesx-pnn-nh-1-1.pdf>
- Posit Software.** (2024). *RStudio* (Version 2024.04.1) [Software de computación].
<https://posit.co/>
- R Core Team.** (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.0) [Software de computación]. R Foundation for Statistical Computing.
<https://www.R-project.org/>
- Restrepo, L. F., Posada, S. L., & Noguera, R. R.** (2012). Aplicación del análisis por componentes principales en la evaluación de tres variedades de pasto. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(2), 258–266.
<https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324753>
- Rivera P., J. H., Sinisterra R., J. A., & Calle D., Z.** (s.f.). *Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia*. Fundación CIPAV.
<https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2019/06/RESTAURACION-CARCAVA-Dagua.pdf>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A.** (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Rosset, P. M.** (1998). *La crisis de la agricultura convencional, la sustitución de insumos, y el enfoque agroecológico* (Policy Brief No. 3). Institute for Food and Development Policy.
<https://archive.foodfirst.org/wp-content/uploads/2013/12/PB3-La-Crisis-de-la-Agricultura-Convencional.pdf>
- Sadeghian, S.** (2021). Acidez del suelo para el cultivo de café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3.ª ed., pp. 95–99).
https://doi.org/10.38141/10791/0014_6

Sarandón, S. J. (2020). *El papel de la agricultura en la transformación social-ecológica de América Latina* (Cuadernos de la transformación No. 11). Friedrich-Ebert-Stiftung.

<https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/16550.pdf>

Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & Van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404.

<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>

Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Soil Survey Staff. (2012). *Field book for describing and sampling soils* (Version 3.0). National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.

<https://nrcspad.sc.egov.usda.gov/DistributionCenter/pdf.aspx?productID=991>

United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2002). *Sampling soils for nutrient management*. USDA-NRCS.

https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_053239.pdf

Xiong, J. (2015). *Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (Paulownia fortunei)* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla].

<https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/b82ed0c8-c4ad-4baf-a90e-8710fa406081/content>

Zamora Mayorga, D. J., Monge García, G. V., Ubillus Chicaiza, S. C., & Moreno Paredes, M. A. (2023). Análisis no paramétrico a través de Kruskal-Wallis para evaluar la distribución sectorial y el desarrollo de las empresas dentro de la Provincia de Orellana. *Tesla Revista Científica*, 3(2), e228.

<https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e228>

Zapotitla Román, J. (2020). *Precursores de protones relativistas solares por análisis digital de señales utilizando transformada Wavelet y análisis de componentes principales* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de México].

<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000672154>

