

Evaluación de la calidad del suelo y sus servicios ecosistémicos en agroecosistemas del Meta, Colombia

Ana Sofia Buitrago Álvarez¹  

Edna Lisbeth Cote Mendoza²  

Sandra Cecilia Bautista Rodríguez³  

Saúl Martínez Molina⁴  

Victoria Eugenia Vallejo Quintero⁵  

Recibido: 3 de Julio de 2024 – Aceptado: 23 de Mayo de 2025 – Actualizado: 18 de Junio de 2025.

DOI: 10.17151/luaz.2024.59.3

Resumen

Introducción: Los suelos proporcionan diversos servicios ecosistémicos (SE). Sin embargo, las prácticas agropecuarias convencionales los degradan, alterando su calidad y reduciendo la prestación de SE esenciales para la vida humana. **Objetivo:** Evaluar la calidad del suelo y sus SE en cinco agroecosistemas de dos fincas (Tres Romiles-3R y Los Yopos-Y) en Barranca de Upía (Meta), Colombia. **Metodología:** Se analizaron 16 variables edáficas, seleccionando un conjunto mínimo de datos (CMD) de 9 indicadores: Índice de estabilidad (IE), estabilidad de agregados (EA), densidad aparente (DA), diámetro geométrico medio (DGM), porosidad (PO), resistencia a la penetración (RP), conductividad eléctrica (CE), pH y actividad enzimática de catalasa (CAT). Con el CMD se calculó el Índice aditivo ponderado (ICSw). Para el análisis de SE, se seleccionaron 18 indicadores de la dimensión ecológica, incluyendo biodiversidad, resiliencia ecológica y reducción de impactos ambientales negativos. **Resultados y discusión:** Los valores más altos del ICSw se encontraron en cultivos de cítricos (0,86) y plátano (0,83 y 0,84) en la finca "3R", atribuidos a diferencias en prácticas agrícolas, afectando principalmente los indicadores físicos: EA, RP, DA, estructura y velocidad de infiltración. No se evidenciaron mejoras en biodiversidad ni en resiliencia ecológica en ambas fincas. Asimismo, los SE relacionados con la reducción de impactos ambientales negativos presentaron niveles bajos. **Conclusiones:** Algunos indicadores de calidad del suelo mostraron respuestas favorables al manejo agrícola, pero se requiere fomentar prácticas sostenibles para evitar su degradación y preservar los SE. Este estudio aporta información relevante para la toma de decisiones en políticas agrícolas y económicas enfocadas en la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Palabras clave: Conjunto mínimo de datos, degradación del suelo, índices de calidad, propiedades edáficas. (Fuente: *Tesaurus Ambiental para Colombia*)

Assessment of Soil Quality and Ecosystem Services in Agroecosystems of Meta, Colombia

Abstract

Introduction: Soils deliver critical ecosystem services (ES); however, conventional agricultural practices degrade soil quality and compromise the provision of essential ES for human and environmental well-being. **Objective:** To assess soil quality and its associated ecosystem services across five agroecosystems on two farms—Tres Romiles (3R) and Los Yopos (Y)—located in Barranca de Upía, Meta, Colombia. **Materials and Methods:** Sixteen edaphic variables were analyzed, from which a minimum data set (MDS) of nine indicators was selected: stability index (SI), aggregate stability (AS), bulk density (BD), mean weight diameter (MWD), porosity (PO), penetration resistance (PR), electrical conductivity (EC), pH, and catalase enzyme activity (CAT). A weighted additive index (ICSw) was calculated using the MDS. For ecosystem service assessment, 18 ecological indicators were analyzed, focusing on biodiversity, ecological resilience, and reduction of negative environmental impacts. **Results and Discussion:** The highest ICSw values were observed in citrus (0.86) and plantain (0.83 and 0.84) crops on the “3R” farm, likely reflecting differences in agronomic practices and their impact on key physical indicators (AS, PR, BD, soil structure, and infiltration rate). No significant improvements were observed in biodiversity or ecological resilience. Additionally, ecosystem services related to the reduction of negative environmental impacts were rated low across both farms. **Conclusions:** Although certain soil quality indicators responded favorably to specific management practices, broader adoption of sustainable practices is essential to prevent soil degradation and preserve ecosystem services. These findings provide critical insights for informing sustainable agricultural and environmental policy decisions.

Keywords: Minimum data set, soil degradation, quality indices, soil properties, ecosystem services (Source: *Environmental Thesaurus for Colombia*)

Introducción

Los suelos a nivel mundial enfrentan problemáticas de degradación, como la contaminación, erosión, pérdida de nutrientes y biodiversidad, acidificación y compactación, las cuales son el resultado principalmente, de prácticas de manejo agropecuarias no sostenibles (Díaz et al., 2022). Adicionalmente, los conflictos de uso del suelo y el cambio climático impactan negativamente en la calidad edáfica, alterando la capacidad del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos (SE) esenciales para el desarrollo humano (Moura et al., 2021; Hyun et al., 2022).

El deterioro de la calidad de los suelos (CS) agrícolas afecta una amplia variedad de propiedades edáficas, entre ellas la estructura, porosidad, pH, contenido de nutrientes, densidad aparente, así como la densidad y actividad biológica. Esto, a su vez, repercute en el rendimiento de los cultivos, la salud de las plantas y la productividad agrícola (Rodríguez et al., 2021; Díaz et al., 2022). Los servicios ecosistémicos están estrechamente ligados al manejo y la calidad de los suelos (Melgarejo et al., 2020; Bedoya et al., 2021). Alteraciones en las propiedades edáficas reducen la provisión de los servicios ecosistémicos, mermando la capacidad del suelo para cumplir funciones esenciales, como suministrar nutrientes, brindar soporte, aireación, humedad, fundamentales para el desarrollo de las plantas y la productividad (Hyun et al., 2022).

Para conservar y mejorar la calidad de los suelos en agroecosistemas en las próximas décadas, se requieren herramientas de evaluación y monitoreo temprano confiables, integrales y reproducibles. Estas herramientas facilitarán la planificación y gestión sostenible del suelo (Díaz et al., 2022). La evaluación de la CS implica comprender los servicios ecosistémicos y las funciones del suelo relacionadas con los indicadores identificados (Vázquez y Martínez, 2017; Melgarejo et al., 2020). Para determinar la calidad en suelos agrícolas se han empleado diferentes metodologías alrededor del mundo. Estas van desde guías diagnósticas y herramientas de evaluación visual del suelo en campo, hasta modelos dinámicos con indicadores e índices de calidad (IC) y enfoques geoestadísticos (Vallejo et al., 2021; Li et al., 2022).

En los últimos años, diversos autores han propuesto el empleo de un Conjunto Mínimo de Datos (CMD) en el momento de evaluar la CS en diferentes agroecosistemas (Ardila et al., 2022; Díaz et al., 2022). Este enfoque implica elegir un número óptimo de propiedades edáficas que identifiquen los principales procesos y funciones del suelo. El empleo de un CMD presenta ventajas frente al empleo tradicional de amplios conjuntos de propiedades edáficas. Principalmente, la selección de un CMD permite el reconocimiento de indicadores sensibles, apropiados y comprensibles al manejo antrópico, disminuye los costos asociados con la evaluación de la CS (a nivel de muestreo y análisis de laboratorio), ahorro de tiempo en el desarrollo de metodologías para la determinación de los indicadores y facilita la comparación de datos entre distintos sitios y regiones (Vallejo et al., 2020; Ardila et al., 2022). Los indicadores del CMD se transforman a valores estandarizados entre 0 y 1 según funciones predefinidas y se ponderan para ser utilizados en índices de calidad del suelo (IC) mediante métodos estadísticos multivariados. La integración de propiedades físicas, químicas y biológicas cuidadosamente seleccionadas ofrece una visión holística de la calidad del suelo (CS) en comparación con el análisis de propiedades aisladas, facilitando su interpretación y comprensión (Ardila et al., 2022; Li et al., 2022).

Tradicionalmente, los estudios sobre la CS en agroecosistemas colombianos han sido limitados en su alcance geográfico, así como en el número y tipo de indicadores monitoreados. Estos estudios en su mayoría se han enfocado en propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de manera aislada y sin considerar o integrar el estudio de indicadores en campo. Lo anterior, dificulta los procesos de apropiación e implementación de herramientas para diagnosticar y evaluar problemáticas de degradación de suelos, así como la interpretación de dichos análisis, por parte de técnicos, profesionales y productores. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la calidad y los servicios ecosistémicos del suelo en agroecosistemas del municipio de Barranca de Upía. Los objetivos específicos fueron: I) comparar la CS en agroecosistemas a través de indicadores en campo, la selección de un CMD y un índice de calidad de suelos, y II) evaluar el nivel de promoción de servicios ecosistémicos del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Barranca de Upía, al norte del departamento del Meta. Este municipio se caracterizó por una época de sequía de diciembre a febrero y una temporada de lluvias de abril a octubre. La zona presenta un relieve de terrazas con características planas a ligeramente onduladas y pendientes suaves (0-7%). Los suelos predominantes son profundos a superficiales, con

órdenes principalmente representados por ultisoles y oxisoles y texturas: franco arenosas, franco arcillosas y arcillosas (IGAC, 2016). La precipitación promedio anual es de 3500 mm y la temperatura promedio es de 25 °C (IDEAM, 2023).

Las fincas evaluadas pertenecen a la vereda Las Moras. La primera finca, denominada Los Tres Romiles-3R, ocupa una extensión de 8 hectáreas y se encuentra ubicada en una latitud de 04°32' N y una longitud 72°57' W. Esta finca se dedica principalmente a los cultivos de plátano, limón y aguacate. La segunda finca, conocida como Los Yopos-Y, abarca una superficie de 21 hectáreas y está situada en una latitud 04°32' N y una longitud de 72°57' W. En esta finca se llevan a cabo actividades de ganadería, arborización y cultivos de plátano, yuca y maíz (Tabla 1).

Muestreo de suelos y diseño experimental

Se seleccionaron cinco agroecosistemas en las dos fincas comparadas: *Los Tres Romiles – 3R* y *Los Yopos – Y*. Estos incluyeron dos cultivos de plátano y un cultivo de cítricos de la finca 1, y un cultivo de plátano y un sistema en descanso de la finca 2 (Tabla 1). Para cada finca, se definieron 2 áreas homogéneas en los agroecosistemas basadas en el relieve, clase textural y tipo de cultivo. En cada área, se establecieron y delimitaron 2 cuadrantes de 3 x 3 metros, y en ellos se tomaron 2 muestras compuestas aleatorias utilizando barrenos metálicos. Cada muestra compuesta se formó a partir de 25 submuestras tomadas a una profundidad de 0–15 cm. Las 20 muestras compuestas de suelo se almacenaron en bolsas plásticas herméticas y fueron debidamente rotuladas hasta su llegada al laboratorio de suelos en la Universidad Central. En el laboratorio, las muestras fueron tamizadas a un tamaño de 2 mm; una parte de ellas fue secada a temperatura ambiente para análisis fisicoquímicos, mientras que la otra parte fue refrigerada a 4 °C para los análisis bioquímicos.

Tabla 1

Descripción de los agroecosistemas comparados en el estudio

Finca	Agroecosistema	Características	Prácticas realizadas
Los Tres Romiles –3R	Cultivo de plátano 1 (CPR1)	Cultivo de Plátano Hartón. <i>Musa Paradisiaca</i> var. <i>Hartón</i> . Extensión: 4 ha.	Labranza manual y tradicional. Riego por aspersión. Agua procedente de pozos de río. Fertilizante químico tipo NPK.
	Cultivo de plátano 2 (CPR2)	Cultivos de Plátano Hartón. <i>Musa Paradisiaca</i> var. <i>Hartón</i> . Edad del cultivo: 20 años. Extensión: 4 ha.	Labranza manual y tradicional. Uso de agroquímicos: Insecticida Cipermetrina 20 EC (quincenal o bimensual), fertilizantes orgánicos cada dos meses (gallinaza y humus de lombriz).
	Cultivo de cítricos (ZSC)	Siembra aleatoria de árboles de limón y naranja. Edad: 1 año y medio. Extensión: 1 ha.	Plantaciones aleatorias de cítricos (20 árboles/ha). El laboreo y la fertilización química se han limitado, se incorporan residuos vegetales al suelo.

Los Yopos–Y	Cultivo de plátano (CPY)	Cultivos de plátano Edad: 5 años. Variedad: Plátano Hartón. <i>Musa Paradisiaca</i> var. <i>Hartón</i> . Extensión: 3 ha.	Labranza manual y tradicional, cada 6 meses. Riego por aspersión y empleo de motobombas. Uso de agroquímicos: Fertilizante compuesto tipo NPK alternado con abono orgánico, tipo compost, herbicida Roundup.
	Zona sin cultivo (ZNC)	Actividad productiva: Cese de actividades agrícolas (1 año). Edad: 5 años. Extensión: 1 ha.	Pastoreo ocasional de ganado.

Fuente: elaboración propia.

Análisis fisicoquímicos y bioquímicos

Indicadores evaluados en campo: guía diagnóstica de CS

Se midió un conjunto de indicadores físicos, los cuales incluyeron: la estructura y consistencia, porosidad, resistencia al rompimiento por horizonte, presencia de capas endurecidas, velocidad de infiltración, color y resistencia a la penetración (Concrete pocket penetrometer de 178 x 19 mm), siguiendo la metodología basada en Cook et al., 2010 y Shepherd, 2000, descrita y ajustada por Vallejo et al. (2021). Para evaluar la CS se sumaron los puntajes de clasificación de los indicadores medidos. Los suelos con una sumatoria de puntajes menor a 10 fueron considerados de mala calidad, aquellos con valores entre 10 y 25 presentaron una calidad moderada, y los suelos con una sumatoria de puntajes mayor a 25 fueron considerados de buena calidad.

Indicadores en laboratorio

Se utilizaron los métodos citados por Vallejo et al. (2018) para determinar la mayoría de las propiedades fisicoquímicas y bioquímicas del suelo. Los indicadores fueron el diámetro ponderado medio (DPM), diámetro geométrico medio (DGM), índice de estabilidad (IE), humedad (H), pH, textura, carbono orgánico y actividad de catalasa (CAT). Además, se consideraron otros indicadores como: densidad real (DR) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002), densidad aparente (DA) y porosidad (POR) (Flores & Alcalá, 2010) y actividad β -glucosidasa (Tabatabai, 1994).

Análisis estadístico

La distribución normal de los datos se determinó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparaciones múltiples (TUKEY) ($p \leq 0,05$) para contrastar los indicadores fisicoquímicos y bioquímicos, a través del programa estadístico SPSS vs. 25[®]. 2021.

Conjunto Mínimo de Datos (CMD) y determinación del índice de calidad de suelos

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para la selección del Conjunto Mínimo de Datos (CMD), utilizando una matriz de correlación de variables y el paquete estadístico PAST vs. 2.17c (2001), siguiendo la metodología descrita por Vallejo et al. (2020) y Ardila et al. (2022). Brevemente, la selección de variables para el CMD se basó en los Componentes Principales (CP) con valores propios ≥ 1 y que explicaran al menos el 5 % de la variación total. Se seleccionaron aquellos CP con correlaciones $\geq 0,75$ y, dentro de estos, los atributos con cargas factoriales superiores o iguales al 10 % de la mayor carga ponderada, garantizando así la representación de la variabilidad estructural de los datos. El CMD quedó conformado por las variables que mejor representaban la variabilidad total de los atributos inicialmente considerados. Adicionalmente, para la evaluación integral de la calidad del suelo, se aplicó el índice aditivo ponderado (ICSw) propuesto por Karlen & Stott (1994), el cual ha sido ampliamente utilizado en diferentes contextos geográficos (Nabiollahi et al., 2017; AbdelRahman et al., 2019; Zeraatpisheh et al., 2020).

Evaluación de servicios ecosistémicos

Se evaluaron los servicios ecosistémicos (SE) en los agroecosistemas con la metodología citada por Melgarejo et al. (2020). Se priorizaron aquellos servicios pertinentes y medibles en las condiciones de campo del estudio y los indicadores de CS seleccionados. Estos SE están asociados a principios de valoración que son premisas universales para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles. El nivel de cumplimiento de los principios demuestra el valor que los SE tienen para el funcionamiento del agroecosistema. Los principios se evaluaron con indicadores descritos en la [Tabla 2](#).

Tabla 2

Indicadores de evaluación de Servicios ecosistémicos priorizados

Principio 1: aumento de la biodiversidad en el agroecosistema

Indicador: índice de rotación de cultivos: Ir. Donde: S: superficie de praderas de 4 o más años de duración; St: superficie total que integra la rotación agrícola. A mayor valor del índice Ir, será mayor la rotación de cultivos. Basado en (Evia & Sarandón, 2002 citado por Melgarejo et al., 2020)

Indicador: Mb-Manejo de la biodiversidad (rotación y diversificación) Metodología basada en (Sarandón, Zuluaga, Cieza, Janjetic & Negrete, 2008, citado por Melgarejo et al., 2020)

Funciones ecosistémicas valoradas: Hábitat- Mantenimiento de la diversidad biológica

MBRD = C1+ C2

Donde: C1: biodiversidad temporal. (4): rota todos los años, (3): deja descansar 1 año el suelo o incorpora leguminosas o abonos verdes; (2): rota cada 2 o 3 años; (1): realiza rotaciones eventualmente; (0): no realiza rotaciones. C2: biodiversidad espacial. (4): establecimiento totalmente diversificado, con asociaciones entre ellos y con vegetación natural; (3): alta diversificación de cultivos, con media asociación entre ellos; (2): diversificación media, con muy bajo nivel de asociación entre ellos; (1): poca diversificación de cultivos, sin asociaciones; (0): monocultivo.

Indicador: IE-índice ecológico
 Metodología basada en (Sarandón, Zuluaga, Cieza, Janjetic & Negrete, 2008, citado por Melgarejo et al., 2020)

Funciones ecosistémicas valoradas: Hábitat-Mantenimiento de la diversidad biológica. Regulación-Retención de suelo

PCS: prácticas de conservación de la vida de suelo; A1: manejo de la cobertura vegetal, A2: rotaciones de cultivos; A3: diversificación de cultivos; Re: pérdida de suelo por erosión; B1: pendiente predominante, B2: cobertura vegetal, B3: orientación de los surcos; Mb: manejo de la biodiversidad, rotación y diversificación; C1: biodiversidad temporal, C2: biodiversidad espacial

Indicador: EAP-Estructura agroecológica principal
 Metodología basada en (León, Mendoza & Córdoba, 2014; Cleves- Leguízamo, Toro-Calderón, Martínez-Bernal & León-Sicard, 2017, citado por Melgarejo *et al.*, 2020)

Funciones ecosistémicas valoradas: Hábitat, Producción de alimentos, Materias primas, Regulación de gases-mitigación del cambio climático, Prevención de alteraciones, Polinización, Control biológico, Regulación del microclima

Donde: EEP: conexión con la estructura ecológica principal del paisaje; ECE: extensión de conectores externos; DCE: diversificación de conectores externos; ECI: extensión de conectores internos; DCI: diversificación de conectores internos, US: usos del suelo; MA: manejo de arvenses; OP: otras prácticas de manejo; PC: evalúa el grado de claridad conceptual y conciencia de los productores respecto a la agrobiodiversidad; CA: evalúa las capacidades y posibilidades de los agricultores para establecer, mantener o mejorar su EAP.

Principio 2: Mejora de la resiliencia ecológica

Indicador: RBA-Residuos biodegradables aprovechados.
Funciones ecosistémicas valoradas: Regulación-Asimilación de residuos, Formación de suelo y regulación de nutrientes

Donde: MRB: masa de Residuos biodegradables aprovechados. MTRG: masa total de residuos generados. Metodología basada en (Fu et al., 2000, citado por Melgarejo *et al.*, 2020).

Principio 3: Reducción de efectos ambientales negativos en el agroecosistema

Indicador: UIE-Uso de insumos externos (combustibles fósiles y agroquímicos).
Funciones ecosistémicas valoradas: Regulación- Asimilación de residuos, Formación de suelo y regulación de nutrientes.

Donde: IE_i: insumos utilizados en la producción que provienen del exterior de la finca; IT: total de insumos usados para la producción. Metodología basada en (Altieri et al., 2012; Funes-Monzote, 2011; Casimiro-Rodríguez, 2016, citado por Melgarejo et al., 2020)

Indicador: V-velocidad del viento
 Metodología basada en (Alanoca, 2012, citado por Melgarejo et al., 2020).

Funcionalidad ecosistémica: Regulación del clima

$V = Fi$
 Donde: Fi: fuerza de la velocidad del viento.
 Fuerza: 0 calmo; velocidad menor a 2 kilómetros por hora (km/h). Fuerza: 1 aire ligero; velocidad: 2-6 km/h. Fuerza: 2 brisa ligera; velocidad: 7-11 km/h. Fuerza: 3 brisa suave; velocidad: 12-19 km/h. Fuerza: 4 brisa moderada; velocidad: 20-29 km/h. Fuerza: 5 brisa moderada; velocidad: 30-39 km/h.

	Fuerza: 6 brisa fuerte; velocidad: 40-50 km/h. Fuerza: 7 ventarrón moderado; velocidad: 51-61 km/h. Fuerza: 8 ventarrón medio; velocidad: 62-74 km/h.
Indicador: Eficiencia en los sistemas de irrigación.	Porcentaje de eficiencia o cantidad de agua útil para las plantas en el suelo según el método de riego, tomando como referencia: Superficial: riego tradicional del 10% al 30%; riego en curvas de nivel del 30% al 60%; riego por bordes del 40% al 80%; riego por surcos del 40% al 85%. Presurizado: riego por aspersión del 50% al 90%; riego por microjet del 60% al 95%; riego por goteo del 65% al 95%. Metodología basada en (Hoyos, 2002, citado por Melgarejo et al., 2020)
Funciones ecosistémicas valoradas: Regulación- Prevención de alteraciones (resiliencia). Información- Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	
Indicador: Es- Metodología basada en Estructura del suelo	Es= N (Altieri & Nicholls, 2002, Donde: N: valor de estructura del suelo. Estructura citado por Melgarejo et al., 2020) Suelo polvoso, sin gránulos visibles (1). Suelo suelto, pocos gránulos que se rompen al aplicar presión suave (5). Suelo friable y granular, los agregados mantienen la forma después de aplicar presión gases, suave, aún humedecidos (10).
Indicador: CIs- Retención del suelo, Compactación e infiltración del suelo	CIs= N Donde: N: valor de compactación e infiltración. Compacto, se anega (1). Presencia de capa compacta delgada, el agua se infiltra lentamente (5). Suelo no compacto, el agua se infiltra fácilmente (10).
Indicador: Ps- Profundidad del suelo	Ps= N Donde N: valor de profundidad del suelo. Subsuelo casi expuesto (1). Suelo superficial delgado, con menos de 10 cm (5). Suelo superficial más profundo, con más de 10 cm (10).
Indicador: DA- Densidad aparente Metodología basada en (Salamanca & Sadeghian, 2005, citado por Melgarejo et al., 2020). Funciones ecosistémicas valoradas: Regulación hídrica	DA= $1,77 - 0,14 MO + 0,006 MO^2 - 0,00008 MO^3$ (R ² =0,69) Ecuación reportada por la fuente consultada, basado en datos de campo para la zona cafetera colombiana. Baja densidad aparente indica suelos porosos, bien aireados y con buen drenaje. MO: Materia orgánica.

Indicador: DRs- Metodología basada en DRs= N	
Desarrollo de raíces	(Altieri & Nicholls, 2002; IAD, 2017; Moraga et al., 2012, citado por Melgarejo et al., 2020)
Funciones ecosistémicas	desarrolladas, enfermas-cortas (1). Raíces con crecimiento limitado, algunas raíces finas (5). Raíces con buen crecimiento, saludables-profundas, con abundante presencia de raíces finas (10).
Indicador: Erosión (E)	E= N
Funciones ecosistémicas	Donde N: valor de erosión del suelo. Erosión severa, se nota arrastre de suelo y presencia de cárcavas y canalillos (1). Erosión evidente, pero poca (5). No hay mayores señales de erosión (10).
Indicador: Cobertura del suelo (Cs)	Cs= N
Funciones ecosistémicas	Donde N: valor de Cobertura de suelo. Suelo desnudo (1). Menos del 50 % del suelo está cubierto por residuos, hojarasca o cubierta viva (5). Más del 50 % del suelo con cobertura viva o muerta (10).

Principio 5: Generación de infraestructura social resiliente en el agroecosistema

Indicador: Conocimiento y conciencia ecológica	CCE- Metodología basada en CCE=Escala (Sarandón et al., 2008, citado por Melgarejo et al., 2020)
Funciones ecosistémicas	Relacionado a la asistencia a capacitaciones sobre conservación, mantenimiento, cuidado y manejo adecuado de la biodiversidad, suelo, agua, residuos y el ecosistema. Escala: (4): muy alta; (3): alta; (2): media; (1): baja; (0): nula
valoradas: Prevención de alteraciones (resiliencia)	

Nota. Esta tabla se basó en Melgarejo et al. (2020). Fuente: elaboración propia.

Resultados

Evaluación de la calidad edáfica a través de la guía diagnóstica

Los resultados evidencian que todos los agroecosistemas presentaron una calidad moderada (valores: 18- 20), con una calificación menos deseable y moderada (0 y 1, respectivamente) en tres indicadores: velocidad de infiltración, estructura y consistencia (Tabla 3). Por su parte, el cultivo de plátano en la finca Los Yopos (CPY) tuvo valores bajos en las variables: estructura y consistencia, velocidad de infiltración y color (Tabla 3); siendo este, el agroecosistema que presentó en términos generales una menor calidad física del suelo (18). Finalmente, el ZNC en la finca Los Yopos, presentó una mejor calidad (20,5) mostrando una mejor respuesta particularmente, para dos indicadores: presencia de capas endurecidas y resistencia a la penetración.

Efecto del manejo agrícola en los agroecosistemas sobre las propiedades del suelo

Todos los suelos evaluados, independiente de la finca o agroecosistema, presentaron la misma clase textural: franco- arcillosa- limosa. En general, se midieron 16 propiedades edáficas como potenciales indicadores de CS en los agroecosistemas comparados (Tabla 4). De dichas propiedades, se evidenciaron diferencias significativas (ANOVA $p \leq 0,05$) con respecto a las variables: EA, DA, H, pH, BGLU y RP, mientras que, las propiedades: DR, IE, DGM, DPM, PO, CO, CE, CIC y CAT no presentaron diferencias significativas en los agroecosistemas comparados (ANOVA $p \geq 0,05$).

Tabla 3

Resultados de la puntuación de la calidad del suelo

Indicadores calidad del suelo	visuales	Puntuación visual (0=menos deseable, 1=moderada, 2=Preferido)				
		Los 3 Romiles			Los Yopos	
		CPR1	CPR2	ZSC	CPY	ZNC
Estructura consistencia.	y	1	1	1	1	1,5
Porosidad		2	2	1,5	1	1
Resistencia rompimiento	al	1	1	1,5	2	1
Capas Endurecidas		2	2	1	2	2
Resistencia penetración	a la	2	2	2	2	2
Velocidad infiltración	de	0	0	0	0	1
Color		1,5	1,5	1,5	1	1
Puntuación clasificación EVS	de la	20	20	18,5	18	20,5

Calidad moderada

Fuente: elaboración propia.

Selección de los indicadores para CMD

La selección de indicadores para el CMD se realizó a partir de un conjunto total de datos (16 indicadores) quedando así, nueve variables: IE, EA, DA, DGM, PO, RP, CE, pH y CAT (Tabla 4). El ACP indicó que el 61,31 % de las diferencias evidenciadas entre las propiedades pueden ser explicadas en un 27,19 % por el componente uno, en un 20,53 % por el componente dos y en un 13,58 % por el componente tres. Los tres primeros CP se seleccionaron porque presentaron valores propios ≥ 1 . De cada uno de los tres CP seleccionados, solo los parámetros con mayores valores de carga ($\geq 0,75$) fueron considerados para la indexación. Para el CP1 se seleccionaron IE, DA, DGM y RE para el CP2 se seleccionaron EA, CE, pH y CAT y finalmente, para el CP3 la PO (Tabla 5).

Tabla 4
Indicadores fisicoquímicos y bioquímicos evaluados

Indicador	Nombre indicador	Agroecosistema				
		CPR1	CPR2	ZSC	CPY	ZNC
Fisicoquímicos	Textura	Franco Arcillosos Limosos				
	DR (g/cm ³)	1,87 a	2,33a	2,01a	2,24a	2,02a
	DA (g/cm ³)	1,71a	1,71a	1,71a	1,81b	1,80b
	PO (%)	61, 90 a	68, 55a	64, 65a	60,14a	60,26a
	H (%)	19, 43 a	17,65 a	18,19a	27,27 b	17,28 a
	IE (%)	1,88 a	1,98 a	2,19 a	1,52 a	1,45 a
	EA (%)	94,44 a	92,97 a	99,10 a	96,52 a	90,85 b
	DGM (mm)	0,78 a	0,70 a	0,93 a	0,95 a	0,82 a
	DPM (mm)	2,11 a	1,90 a	2,53 a	2,59 a	2,23 a
	CE (DS/m)	0,07 a	0,08 a	0,07 a	0,08 a	0,09 a
	pH	5,57 a	5,30 a	5,59 a	5,12 a	6,54 b
	CO (%)	5,04 a	4,71 a	4,30 a	4,32 a	3,92 a
	CIC (cmolc/kg)	3,30 a	3,40 a	3,10 a	3,10 a	3,30 a
	RP (MPa)	0.28 a	0.23 a	0.24 a	0.58 b	0.65 b
Bioquímicos	BGLU (µg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	2,22 a	1,64 a	4,42 b	4,29 b	3,35 b
	CAT (mmoles de H ₂ O ₂ consumidos /g*h)	2,14 a	2,11 a	1,89 a	2,04 a	2,32 a

DR=Densidad Real; DA=Densidad Aparente; PO: Porosidad; H=Humedad; IE= Índice de Estabilidad; EA= Estabilidad de Agregados; DGM=Diámetro Geométrico Medio; DPM= Diámetro Ponderado Medio; CE=Conductividad Eléctrica; CO=Carbono Orgánico; CIC=Capacidad de intercambio catiónico; RP=Resistencia a la Penetración; BGLU: Glucosidasas; CAT; Catalasas; Letras diferentes indican diferencias significativas entre los agroecosistemas para cada finca, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5
Resultado del ACP realizado con las propiedades edáficas

	CP1	CP2	CP3
Valores propios	3,807	2,875	1,9015
Porcentaje de Varianza (%)	27,193	20,538	13,582
Varianza acumulada	61,313		
DA	<u>0,7785</u>	0,1679	0,444
DR	-0,4259	-0,1212	0,6462
PO	-0,4859	-0,1064	<u>0,7641</u>
H	0,3432	-0,4613	0,4322
IE	<u>-0,7831</u>	-0,1172	-0,07481
EA	0,2634	<u>-0,7505</u>	-0,3697
DGM	<u>0,8315</u>	-0,09955	-0,1706
DPM	0,1327	0,4577	-0,4204
CE	0,045	<u>0,7685</u>	0,06029
pH	0,1491	<u>0,7003</u>	-0,2575
CO	-0,3768	0,06389	0,114
CIC	-0,1475	0,1104	0,2493
RP	<u>0,7805</u>	0,2839	0,4043
GLU	0,6714	-0,54	0,1732
CAT	0,209	<u>0,7429</u>	0,07963

DR=Densidad Real; DA=Densidad Aparente; PO: Porosidad; H=Humedad; IE= Índice de Estabilidad; EA= Estabilidad de Agregados; DGM=Diámetro Geométrico Medio; DPM= Diámetro Ponderado Medio; CE=Conductividad Eléctrica; CO=Carbono Orgánico; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; RP=Resistencia a la Penetración; BGLU: Glucosidasas; CAT; Catalasas.

Fuente: elaboración propia.

Evaluación de la calidad del suelo mediante el índice ponderado aditivo

Se evidenció que el ICS aditivo ponderado fue mayor en ZSC (0,86) con respecto a CPR1 (0,83), CPR2 (0,84), CPY (0,75) y ZNC (0,74). La finca Los Tres Romiles obtuvo mayores valores en el ICSw para sus Tres agroecosistemas; ZSC (0,86), CPR2 (0,84) y en CPR1 (0,83), en comparación con La Finca Los Yopos. Dichas diferencias, podrían asociarse a mejores condiciones en propiedades fisicoquímicas y bioquímicas, tales como: DA (para CPR1, CPR2 y ZSC), EA (para ZSC), pH (CPR1 y ZSC), RP (CPR1, CPR2 y ZSC) y BGLU (ZSC).

Evaluación de servicios ecosistémicos

Principio 1: aumento de la biodiversidad en el agroecosistema; se obtuvo un 25 % de Índice de rotación de cultivos para Romiles y 23,8 % para Yopos. El Indicador Manejo de la biodiversidad (MBRD) fue de 1 para Romiles y 3 para Yopos, indicando baja diversificación y rotación de cultivos. El valor deseable sería un rango de 6-8. En el índice ecológico (IE), se obtuvieron valores de 1,3 para Romiles y 1,9 para Yopos. El valor deseable estaría cercano a cuatro. Ambas fincas tienen poca cobertura vegetal debido a los monocultivos. No se deja descansar el terreno ni se aportan abonos verdes para mejorar la calidad del suelo. La estructura agroecológica principal obtuvo valores de 14-26, correspondientes a una diversificación media.

Principio 2: mejora de la resiliencia ecológica; la finca Los Tres Romiles no aprovecha sus residuos, mientras que la finca Los Yopos tiene un 50 % de aprovechamiento. El valor deseable es 100 %.

Principio 3: reducción de efectos ambientales negativos en el agroecosistema; el uso de insumos externos superó el 70% en ambas fincas. La velocidad del viento fue de aproximadamente 15 km/h en Los Tres Romiles y 25 km/h en Los Yopos. El sistema de riego en Los Tres Romiles mostró una eficiencia del 65 % utilizando sistemas superficiales de aspersión y manguera, lo que no es ideal debido a la no distribución completa del agua y el transporte de residuos de agroquímicos. En cambio, Los Yopos obtuvieron una eficiencia del 86 % con sistemas presurizados de riego por goteo, lo que garantiza un uso más eficiente del agua. En cuanto a la estructura del suelo, ambas fincas presentaron valores bajos de compactación e infiltración (5 en lugar del valor deseable cercano a 10). Además, la profundidad del suelo fue de 2, cuando lo deseable es un valor cercano a 10. El índice de desarrollo de raíces fue de 6 en Los Tres Romiles y 7 en Los Yopos, indicando un buen crecimiento de raíces con longitud y raíces finas. Sin embargo, el indicador de cobertura de suelo obtuvo resultados inferiores a 7, el valor deseado es cercano a 10. Ambas fincas mostraron un grado de erosión de 5 en una escala de 1 a 10.

Principio 5: generación de infraestructura social resiliente en el agroecosistema; el valor obtenido para el conocimiento y conciencia ecológica en ambas fincas evaluadas fue de uno, mientras que el valor deseable es de cuatro.

Discusión

Los valores obtenidos de la guía diagnóstica con respecto a la estructura y consistencia para CPR1, CPR2, ZDR y CPY fueron menores que en ZNC (Tabla 3). La puntuación evidenciada en CPR1, CPR2 y CPY podría relacionarse con el sistema de laboreo realizado desde hace seis años, la baja rotación de cultivos y el poco tiempo de descanso (uno a dos meses) entre siembras, prácticas que impactan negativamente la condición física del suelo (Calderón et al., 2018; Ardila et al., 2022). Por su parte, la resistencia al rompimiento presentó una condición moderada para CPR1, CPR2 y ZNC, variable que cambia en función del contenido de humedad, el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo, siendo esta última, una de las alteradas en los tres agroecosistemas. En general, la respuesta de estos 3 indicadores podría significar afectaciones a nivel del espacio poroso del suelo, lo que haría más susceptible al suelo a la compactación y la erosión.

Con relación a la porosidad, se evidenciaron valores moderados en CPY y ZNC. Si bien para el caso de CPY esto podría asociarse con las prácticas de manejo tradicionalmente adoptadas, el ZNC

aunque se encuentra en período de descanso, durante el día se presenta pastoreo ocasional de ganado, lo cual podría impactar algunos de los indicadores estudiados. Finalmente, con relación a la velocidad de infiltración, se obtuvieron valores menores deseables en CPR1, CPR2, ZSC y CPY. Dichos valores podrían asociarse con la clase textural del suelo y el tipo de estructura presente (prismática, bloques y granular), lo cual afecta la circulación del agua a través del perfil edáfico. De manera general, el comportamiento de los indicadores evaluados a través de las guías varía en función de las prácticas implementadas, el tipo de indicador evaluado y su sensibilidad frente al manejo antrópico.

Con relación a las propiedades físicas evaluadas en laboratorio, se evidenció que el porcentaje EA fue significativamente mayor en el ZSC (99,10), en comparación con ZNC que obtuvo el valor más bajo (90,85) (Tabla 4) (Tukey $p \leq 0,05$). Los mayores porcentajes de EA en el ZSC pueden asociarse con dos aspectos, el primero, relacionado con el cese de prácticas agropecuarias desde hace un año, y el segundo, asociado a la incorporación de residuos de cosecha por parte del agricultor como estrategia para la protección y recuperación del suelo. Los porcentajes de EA obtenidos en ZSC son similares a los reportados por Ardila et al. (2022) en policultivos (90,45 %) y cultivos de café orgánico (91,69 %), bajo prácticas de agricultura de conservación en el municipio de Cachipay. Si bien, en el presente estudio no hubo diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico, variable que afecta el estado físico del suelo, algunos autores consideran que esta no se considera un indicador temprano de calidad y aporta muy poco en el momento de estudiar los efectos a corto o mediano plazo de las prácticas agronómicas implementadas en el suelo (Zhang et al., 2020). Con relación a la humedad, esta fue significativamente mayor en CPY (finca los Yopos) en comparación con los otros agroecosistemas, lo cual podría relacionarse con la adición de abonos orgánicos que contribuyen a regular la temperatura y la humedad edáfica, reduciendo la evaporación del agua.

De las propiedades químicas, únicamente el pH presentó diferencias significativas entre los agroecosistemas, siendo significativamente mayor en el ZNC frente a CPR1, CPR2, ZSC y CPY (Tabla 4). Lo anterior podría relacionarse con el descanso en ZNC, período en el cual no se ha realizado ninguna aplicación de fertilizantes nitrogenados que son los principales responsables de la acidificación en suelos agrícolas (Vallejo et al., 2018).

Respecto a las actividades enzimáticas, los valores de la β -glucosidasa fueron significativamente mayores en ZSC (4,42 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) y CPY (4,29 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) (Tukey $p \leq 0,05$) (Tabla 4). Lo anterior puede atribuirse a que en el caso del ZSC se han limitado las prácticas agrícolas y se ha garantizado el aporte de material orgánico al suelo como medida de protección y recuperación del suelo. Wanjiru et al. (2015) destaca que la implementación de prácticas asociadas con agricultura de la conservación, tales como, la alteración mecánica mínima en el suelo, el mantenimiento de una cobertura vegetal y la diversificación de cultivos impacta positivamente las actividades enzimáticas asociadas con el ciclo del C, entre esas la β -glucosidasa. Contrariamente, los valores bajos de dicha actividad enzimática en el CPR2, puede relacionarse con el uso prolongado de agroquímicos, los cuales generan cambios a nivel de la calidad y cantidad de la materia orgánica, la estructura y composición de la comunidad microbiana y consecuentemente, afecta la actividad enzimática, incluso puede llegar a inhibir (Bedoya et al., 2013; Li et al., 2019).

De los nueve indicadores seleccionados para el CMD del presente estudio, tres de ellos (pH, la CE y la DA) coinciden con los seleccionados por Nabiollahi et al. (2017) quienes evaluaron la calidad de suelos en tierras agrícolas afectadas por sal en la provincia de Kurdistán (Irán), utilizando tres índices; el Índice de Calidad del Suelo Aditivo (SQIa), el Índice de Calidad del Suelo Aditivo Ponderado

(SQIw) y el Índice de Calidad del Suelo Nemoro (SQIn). Los autores concluyen que el índice SQIw y el CMD seleccionado representan adecuadamente el conjunto total de datos ($R^2 = 0,82$) y así, se reduce el tiempo y el costo, asociado con el análisis de un alto número de indicadores. Similarmente, Hemmati et al. (2023) seleccionó dentro de su CMD variables físicas, químicas y bioquímicas, como: DA, actividad enzimática de ureasa, CO y contenido de Zn disponible para cultivos de arroz en el norte de Irán, de las cuales dos coinciden con las del presente estudio; DA y CO.

Para el caso de Colombia, estudios desarrollados por Farfán-Valencia e Hincapié-Gómez (2014); Jamioy et al. (2015) y Vallejo et al. (2020), identificaron cinco de los indicadores planteados en el presente estudio (DA, RP, pH, Índice de estabilidad de agregados y CE) en agroecosistemas de policultivos, cultivos de café, pastizales convencionales, piña golden, maíz, soja, naranja, entre otros, en municipios de los departamentos de Santander, Caldas, Cauca, Cundinamarca y Meta.

El CMD propuesto en el presente estudio incluyó en su mayoría propiedades físicas del suelo, indicadores que tienen impacto sobre aspectos relacionados como la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de almacenamiento de agua, transferencia y la retención de nutrientes, lo cual impacta la calidad biológica edáfica (Hermans et al., 2020). El CMD obtenido refleja la necesidad de integrar indicadores fisicoquímicos y bioquímicos, lo cual, a diferencia de un CTD, ahorra tiempo y dinero en los programas de monitoreo de CS, permitiendo a los agricultores tomar medidas oportunas que promuevan la gestión sostenible del suelo.

Los valores de los índices de calidad en los agroecosistemas reflejan las diferencias en las prácticas implementadas en las fincas. Específicamente, Los Tres Romiles ha acogido la incorporación al suelo de materiales orgánicos y humus de lombriz para CPR1, CPR2 y ZNC, con lo cual, se ha evidenciado que se logra mejorar la respuesta de distintos IC del suelo y su fertilidad (Bappa et al., 2016; Vallejo et al., 2020).

La evaluación de los SE en ambas fincas revelaron aspectos importantes que afectan la sostenibilidad y resiliencia de los agroecosistemas. En cuanto al principio de aumento de la biodiversidad, se identificó una baja rotación de cultivos, lo que sugiere una falta de diversificación, afectando la biodiversidad y los hábitats para los organismos. La baja diversificación y rotación de cultivos, respaldada por los bajos valores en el Índice de Rotación de Cultivos y el MBRD, pueden resultar en la aparición de plagas y la dependencia excesiva de agroquímicos para su control. Los valores bajos del IE indican una limitada cobertura vegetal debido a los monocultivos y la falta de prácticas sostenibles, como el uso de abonos verdes, asimismo, se evidencia una configuración espacial con poca conectividad entre sectores y corredores ecológicos, afectando el movimiento e intercambio de especies.

Con relación al principio de mejora de la resiliencia ecológica, se destaca el bajo aprovechamiento de residuos en la finca Los Tres Romiles. La falta de reutilización de residuos representa una oportunidad para promover procesos de transferencia de energía y materia en el agroecosistema. La implementación de abonos verdes podría ayudar a mejorar esta situación y fortalecer la resiliencia del sistema. El principio de reducción de efectos ambientales negativos revela una alta dependencia de insumos externos siguiendo un modelo de producción convencional principalmente en agroquímicos y combustibles fósiles, en ambas fincas, sugiriendo la necesidad de transitar hacia prácticas agrícolas sostenibles. El indicador de velocidad del viento, si bien este no es un factor causante de erosión, puede influir en la generación de microclimas. El uso de sistemas de riego más

eficientes, como el riego por goteo en Los Yopos, demuestra que es posible lograr un mejor aprovechamiento del recurso hídrico y reducir la pérdida de agua por escorrentía. La estructura del suelo muestra respuestas desfavorables, tales como una baja capacidad de retención de agua, pérdida de horizontes superficiales en algunas zonas y evidencias de compactación. Ambas fincas tienen menos del 50 % de áreas de cultivos con cobertura vegetal, ya sea hojarasca u otra y evidencian un grado de erosión medio, lo que indica una mayor vulnerabilidad a fenómenos naturales y antrópicos. Estos factores pueden afectar el crecimiento de las plantas y, por ende, limitar las actividades agrícolas en ambas fincas. Por último, el principio de generación de infraestructura social resiliente indica que ambas fincas presentan un bajo nivel de conocimiento sobre el suelo y conciencia ecológica entre los agricultores. La asistencia a capacitaciones y programas de desarrollo agropecuario es fundamental para mejorar la sostenibilidad y resiliencia de los agroecosistemas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos de la guía diagnóstica de calidad física muestran que ZNC, CPR1 y CPR2 obtuvieron mejores puntuaciones en los indicadores de porosidad y color, indicando una mayor CS frente al CPY y ZSC para quienes su baja calidad es atribuida principalmente al manejo convencional empleado. Adicionalmente, el CMD seleccionado en el presente estudio, permitió identificar nueve variables fisicoquímicas y bioquímicas (IE, EA, DA, DGM, PO, RP, CE, pH y CAT) que resultan altamente sensibles frente al uso y manejo del suelo de cultivos de plátano. Además, se observó un mayor índice de calidad en la Finca Los Tres Romiles, debido principalmente a la contribución compensatoria de los fertilizantes orgánicos, como los abonos y el humus de lombriz empleados en los agroecosistemas CPR1 y CPR2, así como el material orgánico en ZSC. Estos elementos ayudan a mitigar la degradación del suelo.

La valoración de los servicios ecosistémicos revela el estado de las funciones del suelo (hábitat, producción y regulación) en los agroecosistemas, así como el impacto de las prácticas agrícolas en estos sistemas. En los agroecosistemas estudiados, se observa una baja rotación y diversificación de cultivos, una cobertura del suelo inferior al 50 % con residuos, hojarasca o cubierta viva, un uso significativo de insumos externos (agroquímicos y combustibles fósiles), un crecimiento limitado de las raíces y un escaso conocimiento y conciencia ecológica sobre prácticas agroecológicas que aumente la productividad sin comprometer la calidad del suelo. Como resultado, se evidencia un deterioro en los indicadores físicos del suelo, lo cual se relaciona con una baja provisión de SE como el mantenimiento de la productividad en los cultivos, la prevención la erosión y la sedimentación. Estos factores tienen un impacto negativo en la estabilidad de la estructura del suelo, la porosidad, la aireación y el almacenamiento del agua. Además, impiden el desarrollo de SE cruciales para la sostenibilidad de los agroecosistemas como la regulación de nutrientes, la retención y formación del suelo, la asimilación de nutrientes en los cultivos, el control biológico, el mantenimiento de la biodiversidad y los recursos genéticos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los agricultores de las fincas, así como a la Universidad Central y a la Universidad Santo Tomás por la financiación del presente proyecto.

Potencial conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Fuentes de financiación

Este artículo fue financiado por la Universidad Central y la Universidad Santo Tomás.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, D., Estrada, I. y Cock, J. (2010). RASTA Rapid Soil and Terrain Assessment: Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Corporación Biotec, Cali, CO. 62 p. Recuperado de: <https://cgspace.cgiar.org/items/ee7882aa-299f-491a-9d43-4e6a4c15899f>.
- Ardila-Garcia, V., Vallejo, V. E., y Plazas-Navarro, L.P. (2022). Agricultura De conservación Como Estrategia Potencial Para Incrementar La Calidad Del Suelo En Agroecosistemas De Colombia. *Ciencia y Tecnología. Agropecuaria*, 23(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2674.
- Bedoya, G., Ortiz-Moreno, M.L & Ortiz-Rojas, L. Y. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta Agronómica*. 62(1), 66-72, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122013000100010&lng=en&tlng=es.
- Bedoya-Gómez, Bis Davinson, Dossman-Gil, Miguel Ángel, & Marín-Fernández, Jeferson. (2021). Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbría, Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 160-181. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.8>
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P y Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141–157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>.

- Das, B., Chakraborty, D., Singh, V., Ahmed, M., Singh, A. & Barman, A. (2016). Evaluating fertilization effects on soil physical properties using a soil quality index in an intensive rice-wheat cropping system. *Pedosphere*, 26(6), 887-894. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60093-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60093-5)
- Diaz, F. A., Vuelvas, J., Correa, C.A., Vallejo, V.E & Patino, D. (2022). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review. *Ecological Indicators*, 135, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>.
- Fao y Mads. (2018). Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales. Construcción participativa para la gestión de planes de intervención prácticas de manejo sostenible de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Bogotá D.C, Colombia.
- Farfán-Valencia, F y Hincapié-Gómez, E. (2014). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *Cenicafé* 62(1), 100-118. [Link](#)
- Flores, L. y Alcalá, J. (2010). Manual de procedimientos analíticos: laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/lfs/manualLFS.pdf>
- Hemmati, S., N. Yaghmaeian, M. B. Farhangi & A. Sabouri. (2023). Soil quality assessment of paddy fields (in Northern Iran) with different productivities: establishing the critical limits of minimum data set indicators. *Environment Science and Pollution Research*, 30(4), 10286-10296. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22846-8>
- Hermans, S.M., Buckley, H.L., Case, B.S., Curran-C, F., Taylor, M, & Lear, G. (2020). Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality. *Microbiome*, 8(79), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00858-1>.
- Hyun, J., Kim, Y., Kim, A., Plante, A. & Yoo, G. (2022). Ecosystem services-based soil quality index tailored to the metropolitan environment for soil assessment and management. *Science Total Environment*, 820. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972200393X>
- Instituto de Hidrología, Meteorología & Estudios Ambientales – IDEAM. (2023). Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2016). Clases de suelos - categoría orden según USDA. IGAC. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>
- Jamioy, D., Menjivar, J. y Rubiano, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.38731>

- Karlen, D. & D. Stott. (1994). A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. En: Doran, J.W., D.C. Molina y R.F. Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.
- Li, Y., Nie, C., Liu, Y., Du, W., & He, P. (2019). Soil microbial community composition closely associates with specific enzyme activities and soil carbon chemistry in a long-term nitrogen fertilized grassland. *Science of The Total Environment*, 654, 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.031>
- Li, K., Wang, C., Zhang, H., Zhang, J., Jiang, R., Feng, G., Liu, X., Zuo, Y., Yuan, H., Zhang, C., Gai, J., Tian, J., Li, H., Sun, Y., & Yu, B. (2022). Evaluating the effects of agricultural inputs on the soil quality of smallholdings using improved indices. *Catena*, 209(1). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105838>.
- Melgarejo, V., Bautista-Rodríguez, S. C., y Camargo Pardo, M. (2021). Dimensiones y enfoques de valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.devs>
- Moura, E., Sousa, R., Campos, L., Cardoso-Silva, A., Mooney, S., & Aguiar, A. (2021). Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming? *Ecological Indicators* 127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107723>
- Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry., & S. Moradian. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*. 83, 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001>.
- Rodríguez, I., H. Pérez, y R. García. (2021). Degradación del suelo en sistemas agrícolas de la granja Santa Inés, provincia de El Oro, Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 557-564.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003) Norma Oficial Mexicana NOM-022-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. *Diario Oficial de la Federación*. [Link](#)
- Shepherd, G. (2000). *Visual Soil Assessment Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country* (2 ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). http://orgprints.org/30582/1/VSA_Volume1_smaller.pdf
- Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. pp. 775-833. In: R. W. Weaver, J. S. Angle, and P. S. Bottomley (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*.
- Vallejo, V. E, Afanador, L. N, Hernández, M. A, y Parra, D. C. (2018). Efecto de la implementación de diferentes sistemas agrícolas sobre la calidad del suelo en el municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia. *Bioagro*, 30(1), 27-38. [Link](#)

- Vallejo, V., Afanador-Barajas, L., Coca, D., Vargas, A., Bautista, M., y Hernández, A. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia forestal*, 23(1), 35-50. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- Vallejo, V., Ardila, V. y Plazas, L. P. (2021). Evaluación de la calidad física de suelos. Universidad Central <https://doi.org/10.30578/c.suelos.2021>
- Vázquez, L. L., y Martínez, H. (2017). Propuesta metodológica para la evaluación del proceso de reconversión agroecológica. *Agroecología*, 10(1), 33-47. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300721>
- Wanjiru, L., Acosta-Martinez, V., DeBryn, J., Schaeffer, S., Tyler, D., Odoi, E., Mpheshea, M., Walker, F. & Eash, N. (2015). Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.016>.
- Zeraatpisheh, M., E. Bakhshandeh, M. Hosseini, & S. M. Alavi. (2020). Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114139>
- Zhang, L., X. Chen., Xu, Y., Jin, M., Ye, X., Gao, H., Chu, W., Mao, J. & Thompson, M (2020). Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation. *Scientific Reports* 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68163-3>

1 Ingeniera Ambiental. Universidad Central, Bogotá, D.C, Colombia. Correo electrónico: abuitrago7@ucentral.edu.co – ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4247-7793> - [Google Scholar](#)

2 Ingeniera Ambiental. Universidad Central, Bogotá, D.C, Colombia. Correo electrónico: ecotem@ucentral.edu.co – ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5210-3842> - [Google Scholar](#)

3 Ingeniera Química, Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo, Doctora en Ingeniería. Universidad Central, Bogotá, D.C, Colombia. Correo electrónico: sbautistar2@ucentral.edu.co – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9856-4706> - [Google Scholar](#): <https://scholar.google.com/citations?user=pakR30QAAAAJ&hl=es>

4 Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia. – Correo electrónico: smartinezmolina@unillanos.edu.co – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7855-4714> - [Google Scholar](#): <https://scholar.google.com/citations?user=Q-hTudIAAAAJ&hl=es>

5 Bacterióloga, Magíster en Microbiología, Doctora en Ciencias Biológicas. Universidad Central, Bogotá, D.C, Colombia. Correo electrónico: evallejoq@ucentral.edu.co – ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-4649-6078>

-

Google

Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=7hvQSywAAAAJ&hl=es>

Para citar este artículo: Buitrago Álvarez, A. S., Cote Mendoza, E. L., Bautista Rodríguez, S. C., Martínez Molina, S., y Vallejo Quintero, V. (2024). Evaluación de la calidad del suelo y sus servicios ecosistémicos en agroecosistemas del Meta, Colombia. Revista Luna Azul, 59, 32-52. <https://doi.org/10.17151/luaz.2024.59.3>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](#)



Código QR del artículo

