



Almacenamiento de carbono orgánico en suelos con fragmentos de roca en una microcuenca andina

Organic carbon stock in soils with rock fragments in an Andean micro-watershed

Armazenamento de carbono orgânico em solos com fragmentos de rocha em uma microbacia hidrográfica andina

Julían Leal Villamil^{1*}, Edgar Álvaro Ávila Pedraza², Juan Carlos Rey Brina^{2,3}, Deyanira Lobo Luján³

Received: Aug/21/2024 • Accepted: Apr/1/2025 • Published: Nov/30/2025

Resumen

[Objetivo] El objetivo fue estimar el almacenamiento de carbono orgánico y su distribución espacial en los suelos de la microcuenca Zanja Honda (Ibagué-Colombia). **[Metodología]** Se delimitaron las unidades de respuesta hidrológica, tomando en consideración la cobertura de la tierra, las unidades de suelo y el rango de la pendiente, y se ubicaron 46 sitios de muestreo, de acuerdo con la representatividad de estas unidades hidrológicas creadas. En el campo, se ubicaron sitios de muestreo y en cada uno de ellos se determinó el espesor de los horizontes, la densidad aparente, la proporción de fragmentos de rocas por peso y volumen, y la concentración de carbono orgánico mediante el método de oxidación húmeda. **[Resultados]** Las mayores magnitudes en la concentración de carbono orgánico y su almacenamiento se observaron en la parte baja de la microcuenca (0.05 Mg ha^{-1}); mientras que las zonas de alta pendiente en la parte media-alta presentaron menores magnitudes de estas variables (0.002 Mg ha^{-1}). Los suelos estudiados almacenan un total de 6736.3 Mg de carbono orgánico, principalmente en los primeros 0.3 m del perfil de suelo. **[Conclusiones]** Los suelos de la microcuenca mostraron un almacenamiento de carbono orgánico menor respecto a otros estudios realizados en el área, siendo almacenado principalmente en zonas bajas con menores inclinaciones, esto demuestra que la variable topográfica juega un papel importante para el almacenamiento de carbono en estos suelos.

Palabras clave: cambio climático; densidad aparente del suelo; entisol; inceptisol; perfil de suelo; unidad de respuesta hidrológica.

* Use este símbolo para: Autor para correspondencia

Julían Leal Villamil, ✉ jlealv@ut.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-5100-2693>

Edgar Álvaro Ávila Pedraza, ✉ eaavila@ut.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-7944-7037>

Juan Carlos Rey Brina, ✉ jcrey67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7271-3606>

Deyanira Lobo Luján, ✉ lobo.deyanira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0444-6080>

1 Grupo interdisciplinario de investigación en fruticultura tropical, Departamento de Estudios Interdisciplinarios, Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

2 Grupo de investigación en Cuencas Hidrográficas, Departamento de suelos y aguas. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

3 Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Maracay 2105, Venezuela.

4 Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay 2105, Venezuela.



Abstract

[Objective] The objective was to estimate the carbon stock and its spatial distribution in soils of the Zanja Honda micro-watershed (Ibagué, Colombia). **[Methodology]** Hydrological Response Units were delineated, considering land cover, soil units, and the range of slopes. Based on the representativeness of these hydrological units, 46 sampling sites were identified. After locating sampling sites in the field, the following parameters were determined at each site: thickness of horizons, bulk density (core method), rock fragment content by weight and volume, and organic carbon concentration using the wet oxidation method. **[Results]** The most significant magnitudes in organic carbon content and soil organic carbon stock generally occur in the lower part of the micro-watershed (0.05 Mg ha^{-1}); while the high slope areas in the middle-upper part present lower magnitudes of these variables (0.002 Mg ha^{-1}). The soils studied store a total of 6736.3 Mg of organic carbon, which is generally stored in the first 0.3 m of the soil profile. **[Conclusions]** Micro-watershed soils exhibited lower organic carbon stocks compared to other studies conducted in the area, with carbon stocks primarily occurring in low areas with lower inclinations. This suggests that topographic variables play a significant role in determining carbon stocks in these soils.

Keywords: Climatic change; soil bulk density; entisols; inceptisols; soil profile; hydrologic response unit.

Resumo

[Objetivo] O objetivo foi estimar o armazenamento de carbono orgânico e sua distribuição espacial nos solos da microbacia hidrográfica de Zanja Honda (Ibagué, Colômbia). **[Metodologia]** Foram delimitadas unidades de resposta hidrológica, levando em consideração a cobertura da terra, as unidades de solo e a faixa de declive, e foram localizados 46 locais de amostragem, de acordo com a representatividade dessas unidades hidrológicas criadas. No campo, foram localizados locais de amostragem e, em cada um deles, foram determinados a espessura dos horizontes, a densidade aparente, a proporção de fragmentos de rocha por peso e volume e a concentração de carbono orgânico pelo método de oxidação úmida. **[Resultados]** As maiores magnitudes de concentração e armazenamento de carbono orgânico foram observadas na parte inferior da microbacia hidrográfica ($0,05 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto as áreas de alta declividade na parte média-alta apresentaram magnitudes mais baixas dessas variáveis ($0,002 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os solos estudados armazenam um total de 6.736,3 Mg de carbono orgânico, principalmente nos primeiros 0,3 m do perfil do solo. **[Conclusões]** Os solos da microbacia hidrográfica apresentaram um armazenamento de carbono orgânico menor em comparação com outros estudos realizados na área, sendo armazenado principalmente em áreas baixas com declives menores, o que mostra que a variável topográfica desempenha um papel importante no armazenamento de carbono nesses solos.

Palavras-chave: mudança climática; densidade aparente do solo; entisol; inceptisol; perfil do solo; unidade de resposta hidrológica.

Introducción

El carbono orgánico del suelo (CO) representa un factor clave para el desarrollo de la agricultura sustentable, siendo el principal indicador de la calidad del suelo y

su potencial productivo. Múltiples atributos del suelo dependen, en gran medida, de la concentración de CO, tales como la disponibilidad de agua y nutrientes, la porosidad, la agregación, la resistencia a la erosión, la actividad microbiana, entre otros factores. La



evidencia sugiere que los suelos con mayor concentración de CO suelen ser de mayor productividad (Ma *et al.*, 2023; Oldfield *et al.*, 2022; Vendig *et al.*, 2023). A escala global, los suelos más fértiles constituyen una oportunidad para satisfacer las crecientes demandas impulsadas por el rápido crecimiento de la población (Pravia *et al.*, 2020).

Se ha sugerido que la liberación del CO almacenado en el suelo se encuentra estrechamente vinculada con procesos de cambio climático y degradación del suelo (Baveye *et al.*, 2020; Beillouin *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). El almacenamiento o *stock* de CO (SCO) se define como el tamaño del depósito de CO; es decir, la cantidad o contenido de CO en el suelo (Don *et al.*, 2024). En términos globales, los suelos representan el reservorio terrestre más grande de C, el cual equivale a aproximadamente tres veces las reservas de C en la vegetación y dos veces las reservas en la atmósfera (Lal *et al.*, 2021; Smith *et al.*, 2020). Se estima que las reservas mundiales de C orgánico en el suelo varían entre 1.500 y 2.400 Pg (~5.500-8.800 Pg de CO₂) a una profundidad de 0 a 1 m (Lal, 2018; Lal *et al.*, 2021; Smith *et al.*, 2020).

Dada la magnitud de reservas de C, pequeños cambios en sus contenidos pueden transformar a los suelos en significativos sumideros o fuentes de emisión de C en todo el mundo. Como fuente, los suelos pueden emitir gases a la atmósfera (metano, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, entre otros) y esto contribuye al calentamiento global. Como sumidero, los suelos tienen la capacidad de secuestrar C de la atmósfera transformándolo en formas más estables como son los compuestos orgánicos (FAO, 2017; Olson *et al.*, 2014).

La estimación de las reservas y el potencial de captura de CO son importantes,

tanto para poder comprender el ciclo del carbono a nivel local y global, como para el diseño de posibles estrategias de mitigación del cambio climático (Weil y Brady, 2017).

La evaluación del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establece una meta de reducción del 42 % en las emisiones de carbono para el año 2030; sin embargo, las proyecciones indican que, de no aplicarse políticas y acciones para fomentar el secuestro de carbono, dicha meta no podrá lograrse (UN, 2024). Esta situación se refleja en el escaso involucramiento del almacenamiento de carbono en los documentos de políticas públicas de los países, debido a limitaciones técnicas, económicas, políticas y sectoriales, o por barreras institucionales y diplomáticas (Wiese *et al.*, 2019).

Se han desarrollado diversos métodos para evaluar este importante fenómeno, cada uno con enfoques particulares y desafíos inherentes. Entre estos destacan la medición directa y el modelado. Los métodos de medición directa implican el muestreo de suelo y su análisis en laboratorio, mientras que el modelado emplea ecuaciones matemáticas para predecir los niveles de carbono en función de distintas variables (Rodrigues *et al.*, 2023). Dentro de los métodos analíticos más utilizados para la determinación del CO se encuentran la combustión seca y la oxidación húmeda. En el primero, la muestra de suelo es sometida a altas temperaturas en presencia de oxígeno, lo cual permite oxidar por completo el carbono orgánico (Schulte y Hopkins, 1996; Storer, 1984). En el segundo, el CO es oxidado mediante una solución de dicromato de potasio en un medio ácido, en un proceso químico clásico conocido como el método de Walkley y Black (1934).

La estimación del almacenamiento de CO en los suelos (SCO) con fragmentos



de roca (RF) presenta desafíos específicos, pues requiere una cuidadosa cuantificación de la concentración de carbono orgánico y de la densidad aparente del suelo. En estos casos, la proporción de RF es crucial, ya que no solo determina el volumen de suelo disponible para el SCO, sino que también puede influir su densidad aparente. De igual manera, algunas condiciones del suelo y del muestreo, tales como problemas de compactación, obstrucción por rocas y condiciones del sitio de muestreo, pueden conducir a subestimaciones o sobreestimaciones del SCO (Xu *et al.*, 2016).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que la relación entre los RF y el SCO puede ser negativa o positiva; en este sentido, se han encontrado evidencias de un aumento de SCO en las áreas más rocosas de un campo agrícola (Bornemann *et al.*, 2011) e incluso RF que pueden llegar a contener cantidades significativas de CO (Agnelli *et al.*, 2002); mientras que en otras investigaciones se ha encontrado una relación negativa entre el SCO y los RF (Beem-Miller *et al.*, 2016; Ferrara *et al.*, 2012; Lai *et al.*, 2022).

Como parte de los compromisos que ha asumido Colombia frente al cambio climático y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se formuló la “Estrategia Climática de Largo Plazo E2050”, con el fin de reducir en un 90 % las emisiones de gases de efecto invernadero respecto al año 2015 y compensar el 10 % restante mediante la captura de carbono. Esta estrategia proyecta una absorción estimada entre 14,4 y 31,5 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente por año hacia el 2050. En este contexto, el suelo se reconoce como un pilar esencial para alcanzar la meta de carbono neutralidad, gracias a su capacidad natural de capturar y almacenar carbono. Para ello, la estrategia destaca el uso de información espacial y modelamiento, el

cual permite identificar las zonas con mayor potencial de captura de carbono y priorizar la planificación territorial con base en criterios ecológicos y climáticos (Gobierno de Colombia, 2021).

Con el propósito de elaborar la cartografía del carbono orgánico del suelo en Colombia, se llevó a cabo un trabajo interinstitucional entre la FAO, la Alianza Mundial por el Suelo y el IGAC. Este permitió actualizar el mapa nacional de almacenamiento de carbono hasta una profundidad de 0,3 metros, mediante técnicas de mapeo digital de suelos y con una resolución espacial de 1 kilómetro (Bolívar *et al.*, 2021; FAO, 2021). Así mismo, se han realizado diversos esfuerzos investigativos para determinar el SCO en varios suelos de Colombia, pero cada uno con diferentes objetivos y enfoques particulares (Abril-Herrera *et al.*, 2023; Andrade Castañeda *et al.*, 2013; Andrade *et al.*, 2022; Carvajal-Agudelo y Andrade, 2021; Gutiérrez *et al.*, 2020; López-Hernández *et al.*, 2014; Rojas *et al.*, 2018; Walteros *et al.*, 2022).

La cuenca hidrográfica del río Combeima es de alta importancia para el municipio de Ibagué, ya que constituye su principal fuente de abastecimiento de agua. No obstante, presenta una alta vulnerabilidad a fenómenos de riesgo como los movimientos en masa y la pérdida de suelo por erosión, especialmente en zonas de suelos con texturas gruesas y pendientes pronunciadas (Departamento Nacional de Planeación, 2009). De acuerdo con Muñoz *et al.* (2017), conservar las propiedades del suelo en esta cuenca es esencial para mantener los servicios ecosistémicos. La microcuenca Zanja Honda, ubicada en la parte baja de la cuenca del río Combeima, se caracteriza por suelos derivados de granitos del Batolito de Ibagué, de textura gruesa, infiltración rápida, pendiente



pronunciadas, diferentes grados de erosión y presencia de fragmentos de roca (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004).

Dada la dificultad que implica la presencia de fragmentos de roca en los suelos para el análisis de sus propiedades (Leal *et al.*, 2021), la información disponible sobre estos componentes suele ser limitada. En este contexto, resulta fundamental llevar a cabo un estudio detallado de sus características, pues permite comprender con mayor precisión su comportamiento y contrastarlo con fuentes de información secundaria disponibles a mayor escala para la zona, evaluando así su nivel de representatividad.

El objetivo del presente estudio fue estimar el SCO en los suelos con fragmentos de roca (RF) en la microcuenca Zanja Honda (Ibagué-Colombia), bajo diferentes coberturas y usos representativos de la tierra.

Con el desarrollo de esta investigación no solo se fortalece el conocimiento sobre los suelos de la microcuenca, sino que también se contribuye a su modelación hidrológica y de servicios ecosistémicos, así como a la implementación de estrategias de planificación y manejo más eficaces. Los resultados obtenidos para los órdenes de suelo presentes pueden constituir valores de referencia útiles para el estudio de suelos con características similares en Colombia y en otras regiones del mundo. Asimismo, pueden servir como insumo valioso para el fortalecimiento de iniciativas nacionales e internacionales orientadas a la mitigación del cambio climático, como la Estrategia Climática de Largo Plazo (E2050) de Colombia y los programas de evaluación y mapeo de carbono en suelos promovidos por la FAO. La generación detallada de datos sobre suelos con fragmentos de roca, especialmente en zonas de alta pendiente,

contribuye a cerrar brechas de conocimiento en territorios donde el manejo del carbono aún ha sido escasamente abordado.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio correspondió a 231.6 ha pertenecientes a la microcuenca Zanja Honda (Ibagué, Colombia), situada en la parte baja de la cuenca del río Combeima (cordillera central colombiana), entre las coordenadas geográficas 4°24.55'N a 4°23.58'N y 75°13.18'W a 75°11.11'W. El área de estudio posee elevaciones desde los 941 m hasta los 1631 m sobre el nivel del mar y presenta amplios rangos de pendientes que pueden ir desde 0 % hasta mayores a 100 % (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2016; JAXA/METI, 2010). Desde el punto de vista climatológico, la microcuenca registra una precipitación media anual de 1.850 mm y una temperatura media anual de 22 °C, según datos correspondientes al periodo 1990-2022 reportados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2022).

Los estudios geológicos presentados por Nuñez *et al.* (2001) y Nuñez y Murillo (1982) reportan que en el área de estudio se presenta una predominancia de material litológico de origen granítico; sin embargo, también se pueden encontrar unidades de conglomerados, sedimentos no consolidados y materiales volcánicos provenientes del volcán monogenético Guacharacos. De acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004), los suelos de la microcuenca son predominantemente entisoles e inceptisoles de las asociaciones Eutrudept típico (Typic Eutrudepts)-Udortent típico (Typic Udorthents) – Hapludol entico (Entic Hapludolls) y Udorthent típico (Typic



Udorthents)-Dystrudept típico (Typic Dystrudepts), estos suelos poseen texturas de francas a franco arenosas, drenaje rápido y, por lo general, contienen diversos tamaños de fragmentos de roca en variado estado de meteorización.

Diseño del muestreo

Para poder establecer puntos de muestreo representativos en la microcuenca, se recurrió al sistema de muestreo estratificado debido a que es una de los más reconocidos para disminuir la heterogeneidad espacial de las variables edáficas (Bautista *et al.*, 2011). Los estratos del muestreo fueron establecidos mediante las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) de la microcuenca, las cuales se definen como áreas bajo similares condiciones de cobertura del suelo, unidad de suelo y rango de pendiente (Flügel, 1997). Para la delimitación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), se utilizó la geoinformación disponible para el área de estudio, incluyendo unidades de suelos, coberturas y usos del suelo, así como pendientes porcentuales del terreno, derivadas de fuentes secundarias (Corporación Autónoma Regional

del Tolima y Universidad de Ibagué, 2018; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004; JAXA/METI, 2010). En un inicio, los datos fueron delimitados con base en el límite de la microcuenca. Las pendientes se reclasificaron en siete categorías, según la metodología del IGAC para estudios edafológicos en Colombia (Mosquera, 1986; Mosquera *et al.*, 1973). Por último, se realizó una intersección entre las tres capas de información para generar las URH de la cuenca.

A través del análisis de geoprocésamiento, se identificaron 86 Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) en la microcuenca. Para el muestreo, se distribuyeron 46 puntos, al asignar un mayor número de muestras a las URH de mayor extensión, en concordancia con las directrices de la United States Office of Environmental Protection Agency (2002). Los 46 sitios de muestreo se distribuyeron mediante un muestreo aleatorio dirigido en 23 URH, las cuales representan el 80 % de la extensión total de la microcuenca (Figura 1).

Medición de las variables

Entre los años 2020 y 2021, se realizaron diversas visitas de campo en toda el área de la microcuenca, en cada sitio de muestreo se excavó una calicata escalonada con dimensiones aproximadas de 1.5 m de largo, 0.5 m de ancho y 1 m de profundidad; en estas calicatas, los escalones se correspondieron con los horizontes de suelo delimitados en cada sitio. En cada horizonte de suelo observado en las calicatas se determinó el espesor, se extrajo una muestra alterada de suelo (peso superior a 2 kg y debidamente preservada en bolsa hermética)

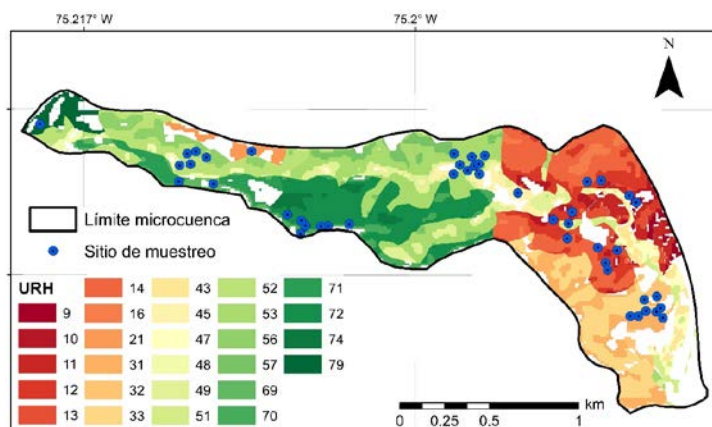


Figura 1. Distribución espacial de los sitios de muestreo en las URH delimitadas.

Nota: fuente propia de la investigación.



y se extrajeron tres muestras inalteradas de suelo en cilindros metálicos (volumen aproximado de 98.1 cm³). Las muestras en cilindros metálicos fueron usadas para determinar la densidad aparente del suelo siguiendo el método del cilindro propuesto por [Blake y Hartge \(1986\)](#). Posteriormente, el contenido de cada cilindro fue tamizado con un tamiz de 2 mm para separar la fracción fina (matriz de suelo) de la fracción gruesa (fragmentos de roca) y se determinó tanto el peso de los fragmentos como su volumen mediante el método de desplazamiento en agua ([Lal y Shukla, 2004](#)).

Durante el año 2022, las muestras alteradas de suelo fueron secadas al aire y tamizadas por 2 mm para separar la matriz de suelo, la cual fue empleada para determinar la concentración de carbono orgánico mediante el método de oxidación húmeda propuesto por [Walkley y Black \(1934\)](#). El almacenamiento de carbono en cada horizonte de suelo fue calculado con la Ecuación 1 ([Beem-Miller et al., 2016](#)).

$$SCO = CO * \rho_{bFE} * E * (1 - RF) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, **SCO** corresponde al almacenamiento de carbono orgánico del suelo (kg m⁻²), **CO** es la concentración de carbono orgánico del suelo (kg kg⁻¹), ρ_{bFE} corresponde a la densidad aparente de la matriz (fracción fina) de suelo (kg m⁻³), **E** es el espesor del horizonte (m) y **RF** es la fracción volumétrica de los fragmentos de roca presentes en el suelo (m³ m⁻³). Empleando el método de interpolación spline de preservación de masa contenido en el paquete “Mpspline2” ([O’Brien et al., 2022](#)) del programa R ([R Core Team, 2023](#)) se estimó la magnitud del almacenamiento de carbono en los rangos de profundidad de 0 a 0.3 m y de 0.3 a 1.0 m para cada uno de los sitios de muestreo.

Distribución espacial

Se elaboró una base de datos con los resultados de las variables obtenidas en cada uno de los horizontes de suelo en los 46 sitios de muestreo para las 23 URH estudiadas. Para efectos de cartografiar la distribución espacial de cada variable en las URH establecidas, se emplearon los valores de la mediana para cada una de las variables de interés, descritas en los diferentes puntos de muestreo realizados por cada URH. Este estadístico fue seleccionado debido a que las variables no mostraron una distribución normal.

Resultados

Variables determinadas

El espesor promedio de los horizontes de suelo en los perfiles evaluados para la cuenca fue variado (Tabla 1), cuya distribución espacial puede observarse en la Figura 2. Esta variable presentó magnitudes entre 0.08 y 0.92 m, con un promedio de 0.38 m (Coeficiente de variación–CV – 66.9 %). En algunas URH, ubicadas especialmente en la parte media y baja de la microcuenca, existe una predominancia de horizontes con mayor espesor (URH 9, 45, 47, 48, 57 y 70), mientras que en otras de mayor pendiente (URH 74 y 53) ocurre lo opuesto. La densidad aparente de la fracción fina (matriz) presentó un promedio para los horizontes de suelo estudiados de 1243.11 kg m⁻³ (CV 16.8 %). Se observó que la densidad aparente tiende a ser más alta en las zonas con poca pendiente localizadas en la parte baja del área de estudio (URH 11, 12 y 13), las cuales se asocian a coberturas de pasturas y actividad de ganadería; en contraste, las URH con menores magnitudes de la variable se distribuyeron por toda la cuenca, por lo cual se les asoció

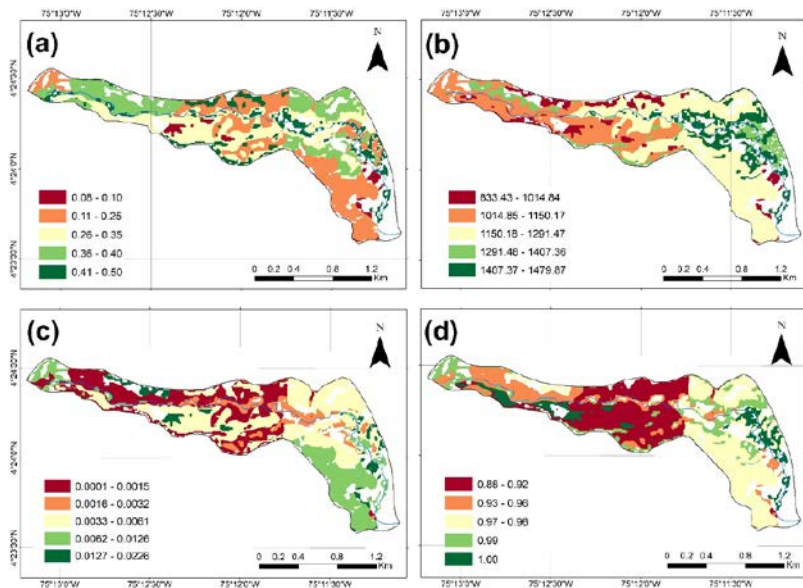


Figura 2. Distribución espacial de los valores de medianas para las variables edáficas evaluadas en las URH delimitadas.

a) Espesor de los horizontes de suelo (m); **b)** Densidad aparente de los horizontes de suelo (kg m^{-3}); **c)** Contenido de carbono orgánico de los horizontes de suelo (kg kg^{-1}); **d)** Fracción volumétrica de la matriz de suelo de los horizontes de suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Nota: fuente propia de la investigación.

a zonas de alta pendiente y coberturas de vegetación natural o cultivos (URHs 21, 32, 57 y 69).

El contenido volumétrico de la matriz de suelo en los 110 horizontes muestreados presentó un valor promedio $0.94 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (CV 7.3 %). Las zonas con mayores contenidos volumétricos mostraron una distribución aleatoria a lo largo de la microcuenca (URH 11, 47, 48, 70, 71, 74 y 79); en contraste, los valores menores tendieron a concentrarse en la parte media del área (URH 72, 69, 57, 53 y 52). La concentración de carbono orgánico en los horizontes del suelo registró un valor promedio de 0.007 kg kg^{-1} , lo cual y de acuerdo con Gilabert De Brito *et al.* (2015), se clasifica como una categoría “baja” (< 0.87 %) para suelos con texturas gruesas;

se obtuvo un valor máximo de 0.04 kg kg^{-1} y CV 114.3 %. Los resultados son consistentes con los reportados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) para los suelos de la zona.

En 13 horizontes subsuperficiales de los perfiles evaluados, el método de digestión en húmedo no permitió determinar concentraciones de carbono orgánico. Las mayores concentraciones de carbono se localizaron en puntos específicos de la zona baja y en laderas de la zona media-alta de la microcuenca (URH 9 y 21), mientras que los valores más bajos se observaron, en su mayoría,

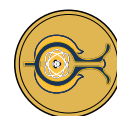
en la parte media-alta, en áreas dominadas por fuertes pendientes. El almacenamiento del carbono orgánico en los diferentes horizontes del suelo presentó un valor promedio de 1.97 kg m^{-2} , con máximos de 18.57 kg m^{-2} y mínimos de 0 kg m^{-2} (CV 123.5 %). Por otra parte, al comparar los resultados de carbono orgánico del suelo con los contenidos volumétricos de fragmentos de roca, se evidenció que los suelos estudiados presentan, en general, mayores proporciones de fragmentos de este material que de carbono orgánico, con un contenido promedio de fragmentos de roca del 6.6 %, frente a concentraciones promedio de CO del 0.7 %.

Tabla 1. *Medidas de tendencia central para las variables evaluadas en las diferentes URH de la microcuenca*

URH	Ns	Ext	Cobertura de la tierra	Espesor		CO		DA		RVMTX		RF		SCO	
				Mediana	CV%	Mediana	CV%	Mediana	CV%	Mediana	CV%	Mediana	CV%	Mediana	CV%
9	1	1.1	Pastos	0.50	91	0.0227	123	1398.12	5	0.98	2	0.02	2319.19	6.68	69
11	1	2.1	Pastos	0.25	71	0.0058	97	1407.36	11	1.00	2	0.00	1825.84	1.55	41
12	3	5.2	Pastos	0.33	54	0.0076	95	1470.27	11	0.98	4	0.02	619.99	1.81	146
13	1	1.3	Pastos	0.40	35	0.0061	125	1441.01	15	0.97	3	0.03	389.91	1.35	82
14	5	8.8	Pastos	0.40	67	0.0078	113	1291.47	20	0.97	10	0.03	362.72	1.46	71
21	1	1.3	Cultivos permanentes	0.40		0.0217		940.24		0.97		0.03		7.92	
31	3	4.9	Pastos	0.25	89	0.0082	51	1251.60	13	0.98	5	0.02	843.27	3.72	47
32	1	1	Bosques	0.08		0.0212		833.43		0.94		0.06		1.33	
33	4	6.7	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	0.25	73	0.0095	75	1265.49	15	0.98	5	0.02	563.57	1.80	79
45	1	2.1	Pastos	0.50	85	0.0033	107	1479.87	11	0.97	1	0.03	1622.17	1.25	28
47	1	2	Pastos	0.50	99	0.0076	71	1465.66	3	1.00	0	0.00	15489.22	3.63	46
48	1	1.3	Cultivos permanentes	0.50	99	0.0104	83	1089.79	3	0.99	1	0.01	4610.67	3.31	29
49	2	4.2	Bosques	0.35	66	0.0061	159	1193.00	15	0.96	3	0.04	580.31	0.80	112
52	3	5.7	Cultivos permanentes	0.40	63	0.0031	137	1094.46	8	0.93	5	0.07	347.38	0.26	119
53	6	10.6	Bosques	0.20	72	0.0023	161	1253.57	13	0.92	6	0.08	341.44	0.15	145
56	1	2.4	Cultivos permanentes	0.40	35	0.0001	100	1333.79	5	0.95	1	0.05	221.01	0.05	87
57	1	2.1	Bosques	0.50	113	0.0056	141	974.48	2	0.91	5	0.09	596.55	0.50	141
69	1	1.2	Bosques	0.30	46	0.0031	133	973.45	4	0.90	8	0.10	126.50	0.70	100
70	1	2.1	Cultivos permanentes	0.50	14	0.0005	141	1373.28	17	0.99	0	0.01	774.34	0.42	141
71	1	2.4	Cultivos permanentes	0.32	48	0.0067	79	1073.49	2	0.99	0	0.01	2615.03	2.08	42
72	5	9.6	Pastos	0.30	77	0.0057	107	1150.17	17	0.88	13	0.12	234.15	0.80	98
74	1	1.2	Cultivos permanentes	0.10		0.0192		1014.84		1		0		1.95	
79	1	1.7	Cultivos permanentes	0.25	71	0.0178	85	1146.01	24	0.99	1	0.01	2838.94	4.22	13

URH: Unidad de Respuesta Hidrológica; **Ns:** número de sitios de muestreo establecidos; **Ext:** Extensión de la URH en el área de estudio (%); **Espesor:** espesor de los horizontes de suelo (m); **CO:** concentración de carbono orgánico (kg kg^{-1}); **DA:** densidad aparente de la matriz de suelo (kg m^{-3}); **RVMTX:** contenido volumétrico de la matriz de suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); **RF:** contenido volumétrico de fragmentos de roca ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); **SCO:** almacenamiento de carbono orgánico en el perfil de suelo (kg m^{-2}).

Nota: fuente propia de la investigación.





Almacenamiento de carbono

La concentración de carbono del suelo en los dos rangos de profundidades (de 0 a 0,3 y de 0,3 a 1,0 m), que se presenta en la Tabla 2, permitió evidenciar que la variable presenta, en general, mayores valores en los primeros 0,3 m de profundidad (promedio 0,01 kg kg⁻¹, CV 74.64 %), mientras que a mayores profundidades (de 0,3 a 1,0 m) su valor promedio disminuyó a 0,002 kg kg⁻¹ (CV 81.64 %). Este comportamiento también fue encontrado para el almacenamiento

de carbono en los dos rangos de profundidad, pues para los primeros 0,3 m de suelo su promedio fue de 2,57 kg m⁻² (CV 89.06 %) y para profundidades entre 0,3 y 1,0 m su magnitud decayó hasta un 1,57 kg m⁻² (CV 98.07 %). Este comportamiento sugiere que la concentración de CO del suelo posee una mayor influencia sobre las magnitudes de los valores del SCO en comparación a los valores de la densidad aparente o el espesor de los horizontes del perfil de suelo.

Tabla 2. *Valores de medianas para el almacenamiento de carbono presentado de 0 a 0,3 y de 0,3 a 1,0 m de profundidad en los suelos de las diferentes URH delimitadas*

URH	Ext	CO0.3	CO1.0	SCO0.3	SCO1.0	COT0.3	COT1.0
9	2.419	0.037	0.004	9.062	2.789	219.3	67.5
11	4.864	0.009	0.001	1.956	0.997	95.1	48.5
12	11.978	0.008	0.003	3.342	2.036	400.3	243.9
13	2.979	0.013	0.001	2.979	0.795	88.8	23.7
14	20.220	0.009	0.002	2.464	1.497	498.2	302.7
21	2.998	0.024	0.005	8.596	1.671	257.7	50.1
31	11.244	0.008	0.004	2.276	4.140	255.9	465.5
32	2.406	0.015	0.001	0.966	0.056	23.2	1.3
33	15.367	0.013	0.002	3.127	1.423	480.5	218.7
45	4.792	0.005	0.001	1.446	0.963	69.3	46.1
47	4.494	0.010	0.003	2.857	5.119	128.4	230.1
48	2.945	0.014	0.003	2.865	4.174	84.4	122.9
49	9.757	0.020	0.001	4.256	1.608	415.2	156.9
52	13.065	0.006	0.000	1.096	0.255	143.2	33.3
53	24.290	0.004	0.000	0.866	0.077	210.4	18.7
56	5.558	0.000	0.000	0.053	0.024	2.9	1.3
57	4.917	0.008	0.001	0.752	0.048	37.0	2.4
69	2.778	0.007	0.001	1.300	0.363	36.1	10.1
70	4.755	0.000	0.001	0.004	0.694	0.2	33.0
71	5.450	0.011	0.003	2.307	1.239	125.7	67.5
72	22.180	0.005	0.003	1.086	1.824	240.9	404.6
74	2.840	0.015	0.001	1.472	0.095	41.8	2.7
79	3.917	0.028	0.007	3.992	4.441	156.4	174.0
Total	186.214	0.269	0.048	59.1	36.3	4010.9	2725.4

URH: Unidad de Respuesta Hidrológica; **Ext:** Área de la URH (m²); **CO0.3:** Concentración de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0 y 0,3 m (kg kg⁻¹); **CO1.0:** Concentración de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0,3 y 1,0 m (kg kg⁻¹); **SCO0.3:** almacenamiento de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0 y 0,3 m (kg m⁻²); **SCO1.0:** almacenamiento de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0,3 y 1,0 m (kg m⁻²); **COT0.3:** total de carbono orgánico almacenado en el suelo a profundidades entre 0 y 0,3 m (Mg); **COT1.0:** total de carbono orgánico almacenado en el suelo a profundidades entre 0,3 y 1,0 m (Mg).

Nota: fuente propia de la investigación.



El SCO en los primeros 0.3 m de profundidad tuvo mayores magnitudes en las URH 9 y 21 (9.06 y 8.59 kg m⁻², respectivamente), las cuales se localizaron en zonas con poca pendiente en la parte baja de la microcuenca y zonas de mayores pendientes en la parte media-alta de esta, como se muestra en la Figura 3.

Los valores más bajos de esta variable se ubicaron en las URH 56 y 70 (0.053 y 0.004 kg m⁻², respectivamente), situadas en laderas de fuerte pendiente sobre ambos márgenes de la parte media-alta de la microcuenca. Con respecto al SCO a profundidades entre 0.3 y 1.0 m, los resultados mostraron que las URH con mayor almacenamiento de carbono orgánico fueron la 47 y 79 (5.12 y 4.44 kg m⁻², respectivamente),

las cuales se ubican en áreas ribereñas con poca pendiente en la parte baja y zona de cabecera de la cuenca, respectivamente. Por otra parte, las URH con menor almacenamiento fueron la 56 y 57 (0.024 y 0.048 kg m⁻², respectivamente) situadas en zonas de fuerte pendiente sobre ambos márgenes de la parte media-alta de la microcuenca.

Los valores más elevados de CO se registraron en zonas con cultivos permanentes (0.55 %) y vegetación herbácea o arbustiva (rastrojo) (0.54 %), mientras que las áreas con pastos mostraron un valor ligeramente menor (0.52 %) y los bosques naturales presentaron los valores más bajos (0.38 %). Por otra parte, respecto al SCO entre 0 y 0.3 m, los valores promedio por cobertura muestran que las zonas de vegetación her-

bácea o arbustiva (rastrojo) (3.12 kg m⁻²), seguida de los pastos (3.05 kg m⁻²), cultivos permanentes (2.54 kg m⁻²) y las áreas con bosques (1.62 kg m⁻²). Para profundidades de 0.3 a 1.0 m el SCO la tendencia fue diferente (pastos 2.24 kg m⁻², cultivos permanentes 1.57 kg m⁻², zonas de vegetación herbácea o arbustiva (rastrojo) 1.42 kg m⁻² y bosques 0.43 kg m⁻²).

Respecto a los rangos de inclinación, se evidenció que en inclinaciones bajas (De 0 a 16 %) el SCO ponderado para los primeros 0.3 m de profundidad en los perfiles de suelo

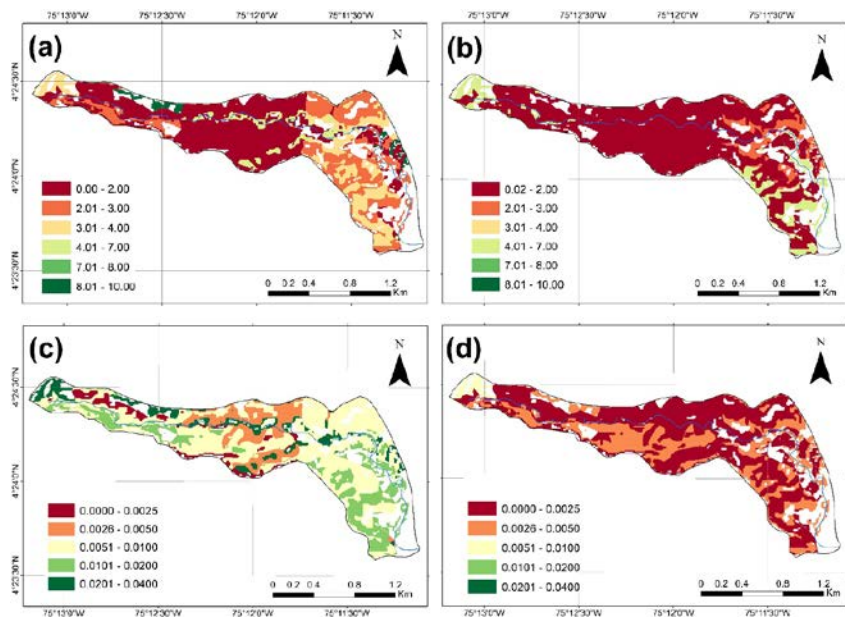


Figura 3. Distribución espacial de la concentración y almacenamiento de carbono orgánico de 0 a 0.3 y de 0.3 a 1.0 m para los perfiles de suelo estudiados

a) Almacenamiento de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0 y 0.3 m (kg m⁻²). **b)** Almacenamiento de carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0.3 y 1.0 m (kg m⁻²). **c)** Concentración del carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0 y 0.3 m (kg kg⁻¹). **d)** Concentración del carbono orgánico del suelo a profundidades entre 0.3 y 1.0 m (kg kg⁻¹).

Nota: fuente propia de la investigación.



fue de 2.93 kg m⁻² y para profundidades entre 0.3 hasta 1.0 m correspondió a 2.17 kg m⁻². En inclinaciones mayores (de 16 a 45 %), ambos SCO disminuyeron a 2.14 y 1.46 kg m⁻², respectivamente. En los suelos con inclinaciones superiores a 45 %, el SCO en las dos profundidades de análisis decreció a magnitudes de 1.38 y 0.72 kg m⁻², respectivamente.

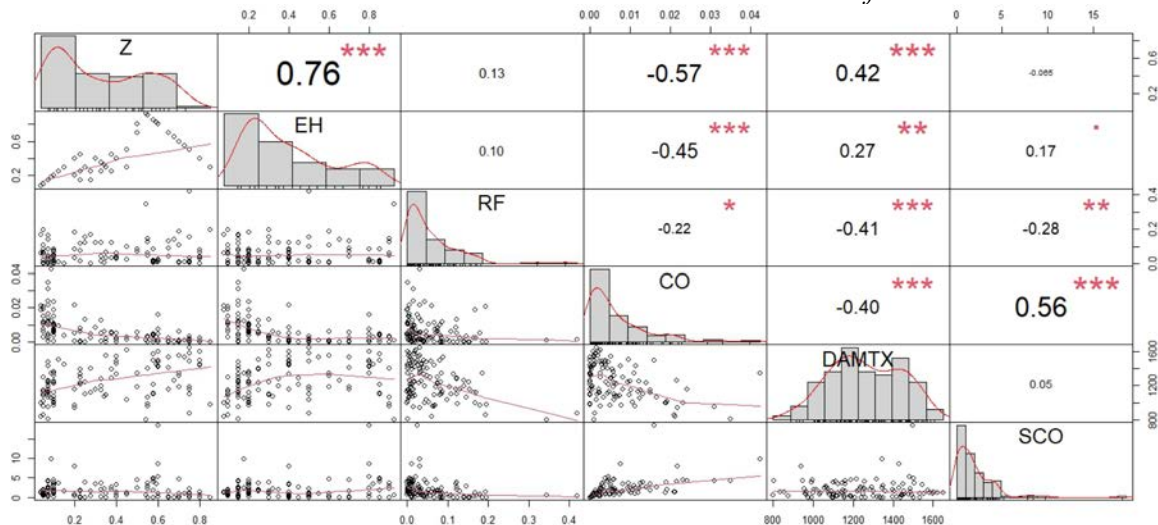
En total, se estima que los suelos estudiados de la microcuenca albergan 6736.3 Mg de CO en sus perfiles hasta 1 m de profundidad (SCO promedio de 16.13 t ha⁻¹).

Los resultados de las correlaciones obtenidas entre las variables edáficas se muestran en la Gráfica 1. La evidencia estadística obtenida a partir del correlograma indica una fuerte correlación positiva entre la profundidad de los horizontes del suelo y su espesor, lo cual sugiere que los horizontes situados a mayor profundidad tienden a ser más gruesos. Asimismo, se identifica una correlación positiva importante entre

la profundidad y la densidad aparente del suelo, lo cual indica que los horizontes más profundos presentan una mayor densidad.

De modo opuesto, se evidencia una correlación negativa importante entre la profundidad y la concentración de carbono orgánico, lo cual refleja que los horizontes superficiales son los que generalmente poseen mayores concentraciones de esta variable. La concentración de carbono orgánico se ve impactada negativamente por mayores valores de densidad aparente, el espesor del horizonte y, en menor medida, por la presencia de fragmentos de roca. Por otra parte, si bien se obtuvo una correlación positiva entre el espesor del horizonte y el valor de densidad aparente del suelo. Por último, el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo mostró una tendencia decreciente con el aumento en los valores del contenido de fragmentos de roca, debido posiblemente a la disminución del volumen efectivo de matriz de suelo disponible para el almacenamiento de carbono.

Gráfica 1. Correlaciones obtenidas entre las variables edáficas estudiadas



Z: marca de clase de la profundidad del horizonte (m); **EH:** espesor del horizonte (m); **RF:** contenido volumétrico de fragmentos de roca; **CO:** concentración de carbono orgánico del suelo (kg kg⁻¹); **DAMTX:** densidad aparente de la matriz de suelo (kg m⁻³); **SCO:** almacenamiento de carbono orgánico del suelo (kg m⁻²).

*: significancia estadística al 10 %; **: significancia estadística al 5 %; ***: significancia estadística al 1 %.

Nota: fuente propia de la investigación.



Discusión

Rodrigues *et al.* (2023) señalan que un factor importante que contribuye al agotamiento del almacenamiento de carbono en los suelos se debe al uso intensivo del recurso, pues los suelos cultivados a menudo experimentan pérdidas de CO por diversas razones, siendo factores clave la erosión, la reducción de los aportes de carbono al suelo y la descomposición de la materia orgánica; así mismo, los estudios mencionados comentan que la erosión, impulsada por las prácticas agresivas de labranza y arado, comunes en la agricultura intensiva, resulta en la pérdida de la capa superficial del suelo rica en carbono orgánico, fenómeno que acelera el agotamiento de las reservas de CO, altera el ciclo del carbono y afecta de forma negativa la fertilidad del suelo.

Debido a que la gran mayoría de los suelos encontrados en la microcuenca Zanja Honda son relativamente jóvenes (entisoles e inceptisoles), en el área no se reportó presencia de horizontes orgánicos y las concentraciones de CO de la matriz de suelo (CO promedio 0.67 %) fueron muy similares a las que reportó el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) para los mismos tipos de suelos; dado el valor promedio de concentración obtenido puede considerarse “bajo” (Gilbert De Brito *et al.*, 2015). Autores como Yost y Hartemink (2019), Weil y Brady (2017) y López-Hernández *et al.* (2014) coinciden en que los entisoles, inceptisoles, ultisoles y oxisoles presentan, generalmente, bajas concentraciones de carbono orgánico. Los valores promedio obtenidos en esta investigación concuerdan con los rangos reportados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) para entisoles (0.54 % a 1.06 %) e inceptisoles (0.45 %) descritos en el área de estudio, así

como con los datos de López-Hernández *et al.* (2014) para entisoles en la cuenca del Orinoco (CO 0.5 %).

La densidad aparente de los suelos es uno de los factores más importantes en la estimación del SCO y es una de las principales fuentes de variación en los resultados de esta variable; sin embargo, esta propiedad física es una de los parámetros menos valorados en los estudios de suelos y sus criterios de medición a veces son poco detallados (FAO, 2017). La variación de las magnitudes de la densidad aparente del suelo afecta notoriamente la estimación del SCO del suelo, en especial si este presenta altos valores de CO (Hiederer y Köchy, 2011).

En el presente estudio, no se evidenciaron pruebas suficientes para establecer una relación estadísticamente importante entre los valores de SCO y densidad aparente del suelo; sin embargo, esta variable mostró una relación directa e inversa con el CO del suelo, como generalmente se reporta en la literatura (Jobbágy y Jackson, 2000; Shukla, 2013; Weil y Brady, 2017).

Los horizontes superficiales de los suelos analizados exhiben altos niveles de carbono orgánico (CO) y densidades aparentes bajas. La acumulación de CO promueve la agregación de partículas del suelo y la formación de macroporos, lo cual resulta en una disminución de la densidad aparente (Weil y Brady, 2017). Por otra parte, los horizontes subsuperficiales (generalmente horizontes C) presentaron las menores concentraciones de carbono orgánico y los mayores valores de densidad aparente (horizontes masivos); este patrón de decrecimiento del contenido de carbono orgánico del suelo con el aumento de la profundidad del perfil edáfico ha sido descrito por diversos autores como Jobbágy y Jackson (2000), Andretta *et al.* (2023), Weil y



Brady (2017), Montes-Pulido *et al.* (2017), entre otros. De modo similar, se evidenció que los horizontes de suelo con mayor espesor exhibieron concentraciones de carbono orgánico (CO) reducidas. Esta disminución podría explicarse por la presencia de horizontes masivos sin estructura, comunes a profundidades de alrededor de 0.5 m, y que también se asociaron con una mayor densidad aparente.

Es importante señalar que los resultados obtenidos permitieron obtener evidencias estadísticas de una relación inversa entre los contenidos volumétricos de fragmentos de roca en el suelo y el SCO, relación que ya ha sido corroborada por otras investigaciones (Beem-Miller *et al.*, 2016; Ferrara *et al.*, 2012; Lai *et al.*, 2022). Sin embargo, debido a que en esta investigación no se determinó el CO que pudiese haber tenido la fracción fragmental de los suelos, pues el tipo de muestra empleada limitó la inclusión de fragmentos de roca de mayor tamaño en los análisis, se requieren mayores esfuerzos investigativos que determinen estos datos para establecer el posible impacto de los fragmentos en el SCO de estos suelos.

Se logró evidenciar que, en general, las zonas bajas de la cuenca poseen un mayor SCO, por lo cual es posible inferir que el factor topográfico puede ejercer algún tipo de influencia sobre las cantidades de CO en el suelo (especialmente en la superficie); lo anterior, puede sustentarse en el hecho de que la topografía influye de forma directa sobre los procesos ecológicos y subsecuentemente sobre el CO del suelo (Bronick y Lal, 2005). De igual forma, tanto la ubicación geográfica, la altitud y los aspectos relacionados con la pendiente han servido como variables definitorias que influyen en el crecimiento de la vegetación y los procesos erosivos, que a su vez afectan de manera

significativa el almacenamiento de carbono del suelo (Grimm *et al.*, 2008). En las pendientes más pronunciadas a menudo ocurre mayor escorrentía, lo cual lleva a tasas más altas de erosión del suelo, que no solo elimina físicamente el suelo, sino que apunta a partículas ligeras y de baja densidad que a menudo son ricas en arcilla y carbono. De igual manera, las características topográficas también pueden controlar la dinámica del flujo de agua, que son determinantes cruciales del contenido de agua en el suelo, el cual regula la productividad de las plantas y la actividad microbiana (Mohanty y Skaggs, 2001).

El análisis del carbono orgánico del suelo (SCO) promedio, en dos profundidades y tres rangos de pendiente (0-16 %, 16-45 % y >45 %), respalda la tendencia observada. Se encontró que el COS promedio fue mayor en las pendientes más bajas, disminuyendo de forma progresiva con el aumento de la inclinación. Sin embargo, no se detectaron correlaciones estadísticamente significativas entre la mediana del SCO y las medianas de la pendiente o la elevación en los puntos de muestreo, con coeficientes de correlación que oscilaron entre -0.11 y 0.027 para la elevación, y entre -0.31 y -0.16 para la pendiente.

En términos generales, se considera que las zonas con coberturas de bosques y áreas naturales tienden a presentar mayores valores de concentración de CO y de SCO. Sin embargo, al analizar los valores de CO promediados por perfiles de suelo según la cobertura dominante en cada URH, se evidenció un comportamiento diferente: los bosques y áreas naturales registraron, en promedio, los menores valores de SCO, tanto en la profundidad de 0 a 0.3 m como en la de 0.3 a 1.0 m. Este fenómeno podría explicarse por la combinación de varios factores presentes



en la cuenca, entre los cuales se destacan las fuertes pendientes características de estas coberturas naturales o boscosas, el escaso espesor de los horizontes superficiales o el limitado desarrollo del perfil edáfico en dichas zonas naturales, así como la presencia de texturas gruesas (FA o AF), asociadas a materiales parentales de origen granítico.

Se observó que la concentración de CO en los suelos de la microcuenca está influenciada de forma negativa por la profundidad del horizonte, el espesor del horizonte, la densidad aparente del suelo y la presencia de fragmentos de roca. Esta tendencia puede deberse a que la mayor parte de la materia orgánica se incorpora y descompone en los horizontes superficiales, lo cual genera concentraciones más elevadas de CO en estas capas. Aunque los fragmentos de roca (RF) mostraron una correlación negativa con la concentración de CO, esta fue débil, quizás porque no se consideró el contenido de carbono presente en los fragmentos o porque los suelos analizados presentan contenidos no tal elevados de RF.

De manera similar, el SCO presenta una relación inversa con el contenido de fragmentos de roca (RF) en el suelo. Esto se debe a que, a medida que aumenta la proporción de fragmentos, se reduce el volumen de la matriz fina del suelo, que es la fracción responsable del almacenamiento de carbono (Beem-Miller *et al.*, 2016).

De acuerdo con las estimaciones del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2017), para el área de estudio (80 % del área de la cuenca) los suelos en la microcuenca almacenan (hasta 1 m de profundidad) en promedio 38.9 t ha⁻¹ (equivalente a 7207 Mg de CO). Por otra parte, la FAO (2023), en su actualización del mapa mundial de carbono orgánico del suelo, estima para la misma zona e igual profundidad, un

promedio en almacenamiento de 53.8 t ha⁻¹ (equivalente a 9966 Mg de CO). En ambos casos, los valores estimados por estas organizaciones resultan ser muy superiores al valor de 6736.3 Mg de CO (SCO promedio de 16.13 t ha⁻¹) obtenido en este estudio; no obstante, se aprecia que los valores tienden a tener mayor similitud con los resultados ofrecidos por la fuente nacional.

La discrepancia entre la estimación del carbono almacenado en los suelos de la microcuenca y los valores proyectados por modelos internacionales puede atribuirse a la naturaleza generalizada de estos modelos, los cuales no siempre se ajustan a las condiciones locales ni consideran la variabilidad edafoclimática y geomorfológica del territorio. Además, suelen emplear datos de libre acceso de distintas fechas, que, si bien son útiles a gran escala, no incorporan estudios detallados a nivel de microcuenca, lo cual puede derivar en subestimaciones o sobreestimaciones del carbono en zonas con alta heterogeneidad ambiental. Por su parte, el modelo nacional se basa en datos regionales y locales, generalmente a escala 1:100.000, e incluye variables como el contenido de fragmentos de roca, lo que mejora la precisión en la estimación. No obstante, aún presenta limitaciones para capturar la variabilidad del suelo a escala fina, además de emplear información secundaria elaborada hace ya varios años atrás.

Los resultados de este estudio evidencian la importancia de incorporar la fracción de fragmentos de roca en la estimación del carbono orgánico del suelo, especialmente en zonas montañosas. Esta información permite una caracterización más precisa del recurso edáfico y es clave para diseñar estrategias de manejo sostenible, restauración de suelos y programas de servicios ambientales. Asimismo, los datos generados pueden



servir como línea base para la mejora de modelos nacionales o globales y como referencia útil para investigaciones en regiones con condiciones similares

Conclusiones

La metodología empleada permitió determinar el SCO en los suelos de la microcuenca y, al mismo tiempo, se pudo establecer que el uso de las unidades de respuesta hidrológica como parte de la estrategia de muestreo facilitó la espacialización y cartografía de las variables edáficas. Los resultados obtenidos permitieron observar que los perfiles de suelos de la cuenca poseen, en promedio, una concentración baja de CO y un limitado SCO, mostrando variabilidad espacial de las magnitudes en dichas variables a lo largo del área hidrográfica.

Espacialmente, en la zona baja del área de estudio se presentan mayores concentraciones de CO y SCO, mientras que en las zonas de laderas de la parte media-alta circundantes al cauce principal, las magnitudes de estas variables son inferiores. El análisis conjunto de la concentración de CO frente a variables morfológicas y físicas de los suelos permite establecer que las concentraciones de CO decrecen con el aumento de la profundidad en los perfiles de suelo y con el aumento en las magnitudes de la densidad aparente, contenidos de fragmentos de roca y espesor de los horizontes de suelo. De igual forma, cabe señalar que los rangos de pendiente aparentan tener una relación con SCO, sin embargo, no se logró una correlación fuerte mediante los análisis realizados.

Además, las áreas de la microcuenca en las cuales se presentan coberturas de bosques son las que por lo general contienen menores valores de CO y SCO en sus

perfiles, debido a que se asocian a altas pendientes, suelos de textura gruesa y con poco desarrollo edafológico. Se logró determinar que el SCO para el área de estudio fue de 6736.3 Mg de CO (SCO promedio de 16.13 t ha⁻¹), siendo este valor inferior al estimado por otras fuentes de orden nacional e internacional. Este estudio aporta evidencia sobre el efecto de los RF en el CO y SCO, sirviendo como insumo clave para la gestión sostenible del recurso.

Financiamiento

Convocatoria 755/2016 del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia (Minciencias) y la Gobernación del Departamento del Tolima.

Agradecimiento

Las personas autoras agradecen a la población de la microcuenca Zanja Honda por facilitar la toma de muestras de suelo en sus predios, e igualmente expresan su agradecimiento al Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Tolima por facilitar sus instalaciones para la ejecución de las pruebas de laboratorio.

Conflicto de intereses

Las personas autoras declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de las personas autora

Todas las personas autoras afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

Los roles de las personas autoras según CRediT fue: J. L. V.: conceptualización,



curación de datos, investigación, metodología, análisis formal, redacción del borrador original. E. A. A. P.: conceptualización, metodología, redacción-revisión y edición. D. L. L.: conceptualización, curación de datos, metodología, redacción - revisión y edición. J. C. R. B.: análisis formal, redacción-revisión y edición.

El porcentaje total de contribución de este artículo fue el siguiente: J. L. V. 40 %, E. A. A. P. 15 %, D. L. L. 25 % y J. C. R. B. 20 %.

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por la persona autora correspondiente [J. L. V.], previa solicitud razonable.

Preprint

Una versión *preprint* de este artículo fue depositada en: <https://zenodo.org/records/13259647>

Referencias

- Abril-Herrera, D. A., Mora-Delgado, J. R. y Martínez-Restrepo, G. L. (2023). Almacenamiento de carbono en suelos bajo pasturas de sistemas productivos lecheros altoandinos. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 70(3), e106045. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v70n3.106045>
- Agnelli, A., Trumbore, S. E., Corti, G. y Ugolini, F. C. (2002). The dynamics of organic matter in rock fragments in soil investigated by ¹⁴C dating and measurements of ¹³C. *European Journal of Soil Science*, 53(1), 147-159. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00432.x>
- Andrade Castañeda, H. J., Alvarado, J. y Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) En el municipio del Libano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21. <https://doi.org/10.14483/udis-trital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
- Andrade, H. J., Segura, M. A. y Canal-Daza, D. S. (2022). Conservation of soil organic carbon in the National Park Santuario de Fauna y Flora Iguaque, Boyacá-Colombia. *Forests*, 13(8), 1275. <https://doi.org/10.3390/f13081275>
- Andreotta, A., Chelli, S., Bonifacio, E., Canullo, R., Cecchini, G. y Carnicelli, S. (2023). Environmental and pedological factors influencing organic carbon storage in Italian forest soils. *Geoderma Regional*, 32, e00605. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00605>
- Bautista, F., Palacio, J. L. y Delfín, H. (Eds.). (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baveye, P. C., Schnee, L. S., Boivin, P., Laba, M. y Radulovich, R. (2020). Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 579904. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>
- Beem-Miller, J. P., Kong, A. Y. Y., Ogle, S. y Wolfe, D. (2016). Sampling for soil carbon stock assessment in rocky agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1411-1423. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0405>
- Beillouin, D., Corbeels, M., Demenois, J., Berre, D., Boyer, A., Fallot, A., Feder, F. y Cardinael, R. (2023). A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nature Communications*, 14(1), 3700. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39338-z>
- Blake, G. R. y Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1—physical and mineralogical methods*. SSSA Book Ser. 5.1. (pp. 363-375). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bolívar Gamboa, A., Camacho Hilarión, C. A., Ordóñez Delgado, N., Gutiérrez Díaz, J., Álvarez Lucero, G., Guevara Santamaría, M., Olivera, C., Olmedo, G., Bunning, S. y Vargas, R. (2021). Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. *Ecosistemas*, 30(1), 2019. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>



- Bornemann, L., Herbst, M., Welp, G., Vereecken, H. y Amelung, W. (2011). Rock Fragments Control Size and Saturation of Organic Carbon Pools in Agricultural Topsoil. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1898-1907. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0454>
- Bronick, C. J. y Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Carvajal-Agudelo, B. N., y Andrade, H. J. (2021). Organic carbon in soils with different systems of use in Tacarimena Yopal, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 24(1), 1921. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1921>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima. (2016). *Cartografía escala 1:25,000 microcuencas del departamento del Tolima*. Subdirección de Planeación y Gestión Tecnológica.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima, y Universidad de Ibagué. (2018). *Ajuste parcial a la zonificación ambiental del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del río Coello: Cartografía 1:25.000 de la Cobertura y Uso de la Tierra*.
- Departamento Nacional de Planeación. (2009). *Documento Conpes 3570: Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*. Consejo Nacional de Política Económica y Social.
- Don, A., Seidel, F., Leifeld, J., Kätterer, T., Martin, M., Pellerin, S., Emde, D., Seitz, D. y Chenu, C. (2024). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—Definitions and pitfalls. *Global Change Biology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/3/i6937es/i6937ES.pdf>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *Colombia: soil Organic carbon sequestration potential national map - National report*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/37103/Ver_Documento_37103.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *Global Soil Organic Carbon Map v1.5 (GSOC) (1.5)*. Global Soil Partnership. <https://data.apps.fao.org/glosis/?lang=en>
- Ferrara, G., Farrag, K. y Brunetti, G. (2012). The effects of rock fragmentation and / or deep tillage on soil skeletal material and chemical properties in a Mediterranean climate. *Soil Use and Management*, 28(3), 394-400. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00423.x>
- Flügel, W. A. (1997). Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrological response units (HRUs): An application from Germany. *Mathematics and Computers in Simulation*, 43(3-6), 297-304. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(97\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(97)00013-X)
- Gilabert De Brito, J., Arrieche, I. E., León, M. y López de Rojas, I. (2015). *Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Gobierno de Colombia. (2021). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París*. MinAmbiente, DNP, Cancillería, AFD, Expertise France, WRI. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/12/2.-Estrategia-Climatica-de-Largo-Plazo-de-Colombia-E2050.pdf>
- Grimm, R., Behrens, T., Märker, M. y Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado island - digital soil mapping using random forests analysis. *Geoderma*, 146(1-2), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.008>
- Gutiérrez Díaz, J. S., Ordoñez Delgado, N., Bolívar Gamboa, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C., Olmedo, G., Rodríguez, L. M., Sevilla, V. y Vargas, R. (2020). Estimation of organic carbon in paramo ecosystem soils in Colombia. *Ecosistemas*, 29(1), 1855. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
- Hiederer, R. y Köchy, M. (2011). *Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database*. Publications Office of the European Union (EUR 25225 EN - JRC68528). https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR25225.pdf
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Proyecto DHIME*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento del Tolima*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.



- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Mapa nacional de stock de carbono orgánico*. Subdirección de Agrología. <https://mapas.igac.gov.co/server/rest/services/agrologia/carbonoorganico/MapServer>
- Japan Aerospace Exploratory Agency y Ministry of Economy, Trade, and Industry (JAXA/METI). (2010). *ALPSRP245950030, ALOS-IPALSAR Radiometric High Resolution Terrain Corrected Image*. JAXA/METI. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TV-DOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TV-DOSO]2.0.CO;2)
- Lai, X., Zhu, Q., Castellano, M. J. y Liao, K. (2022). Soil rock fragments: Unquantified players in terrestrial carbon and nitrogen cycles. *Geoderma*, 406, 115530. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115530>
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285-3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Lal, R., Monger, C., Nave, L. y Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834), 20210084. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- Lal, R. y Shukla, M. (Eds.). (2004). Physical properties of gravelly soils. En *Principles of soil physics* (pp. 554-575). CRC Press.
- Leal Villamil, J., Ávila Pedraza, E. A., Lobo Luján, D. y Hernández Atencia, Y. (2021). *Los fragmentos de roca: origen e influencia en la infiltración y propiedades hidráulicas de los suelos*. Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. <https://doi.org/10.16925/9789587603439>
- López-Hernández, D., Mary Hernández-Hernández, R., Hernández-Valencia, I. y Toro, M. (2014). Nutritional stress in dystrophic savanna soils of the Orinoco basin. En *Emerging technologies and management of crop stress tolerance* (pp. 343-375). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800876-8.00015-1>
- Ma, Y., Woolf, D., Fan, M., Qiao, L., Li, R. y Lehmann, J. (2023). Global crop production increase by soil organic carbon. *Nature Geoscience*, 16(12), 1159-1165. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01302-3>
- Mohanty, B. y Skaggs, T. (2001). Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation. *Advances in Water Resources*, 24(9-10), 1051-1067. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00034-3)
- Montes-Pulido, C. R., Miras, J. J. R. y Wery, A. M. S. J. (2017). Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca-Colombia. *Acta Agronomica*, 66(1), 95-101. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.53171>
- Mosquera, L. (1986). *Clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica.
- Mosquera, L., Polo, M. y Carrera, E. (1973). *Clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica.
- Muñoz Ramos, J., Guío Duque, A. J., Andrade Castañeda, H. J., Segura Madrigal, M. A., Barrios Peña, M. I., Losada Prado, S., Mora Delgado, J. R. y Gómez Martínez, M. (2017). *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia). Diseño y revisión de condiciones para establecer el esquema en un sitio específico*. Universidad del Tolima.
- Núñez, A., Gómez, J. y Rodríguez, G. I. (2001). Vulcanismo básico al sureste de la ciudad de Ibagué, departamento del Tolima- Colombia. En *VIII Congreso Colombiano de Geología, I*, 1-12. Sociedad Colombiana de Geología. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2156.0409>
- Núñez Tello, A. y Murillo Rodríguez, Á. (1982). *Geología y prospección geoquímica de las planchas 244 Ibagué y 263 Ortega departamento del Tolima Colombia*. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- O'Brien, L., Malone, B., Hengl, T., Bishop, T., Rosser, D., Beaudette, D. y Brown, A. (2022). *Mpspline2: Mass-preserving spline functions for soil data* (0.1.6). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.mpspline2>
- Oldfield, E. E., Bradford, M. A., Augarten, A. J., Cooley, E. T., Radatz, A. M., Radatz, T. y Ruark, M. D. (2022). Positive associations of soil organic matter and crop yields across a regional network of working farms. *Soil Science Society of America Journal*, 86(2), 384-397. <https://doi.org/10.1002/saj2.20349>



- Olson, K. R., Al-Kaisi, M. M., Lal, R. y Lowery, B. (2014). Experimental Consideration, Treatments, and Methods in Determining Soil Organic Carbon Sequestration Rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 348-360. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.09.0412>
- Pravia, V., Quincke, A., Ciganda, V., Oyhantçabal, W. y Lattanzi, F. (2020). Secuestro de carbono en suelos de Uruguay. *Revista INIA*, 61(1), 103-107. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14506/1/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-103-107.pdf>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (4.3.1). <https://www.r-project.org/>
- Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M. y Nunes, L. J. R. (2023). Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. *Soil Systems*, 7(3), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>
- Rojas, A. S., Andrade, H. y Segura, M. (2018). Los suelos del paisaje Alto-Andino de Santa Isabel (Tolima, Colombia) ¿son sumideros de carbono orgánico? *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 21(1), 51-59. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.662>
- Schulte, E. E. y Hopkins, B. G. (1996). Estimation of Soil Organic Matter by Weight Loss-On-Ignition. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston y M. E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*. (pp. 21-31). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3>
- Shukla, M. (2013). *Soil physics: an introduction*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14926>
- Smith, P., Soussana, J., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., Batjes, N. H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J. E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A. y Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219-241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Storer, D. A. (1984). A simple high sample volume ashing procedure for determination of soil organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(7), 759-772. <https://doi.org/10.1080/00103628409367515>
- United Nations (UN). (2024). *The Sustainable Development Goals Report 2024*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/>
- United States Office of Environmental Protection Agency. (2002). *Guidance on choosing a sampling design for environmental data collection* (EPA/240/R-02/005; EPA QA/G-5S).
- Vendig, I., Guzman, A., De La Cerda, G., Esquivel, K., Mayer, A. C., Ponisio, L. y Bowles, T. M. (2023). Quantifying direct yield benefits of soil carbon increases from cover cropping. *Nature Sustainability*, 6(9), 1125-1134. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01131-7>
- Walkley, A. y Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Walteros Torres, I., Palacios-Pacheco, S., Cely, G. E., Serrano, P. A. y Moreno-Pérez, D. (2022). Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 25(2), e1846. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>
- Wang, M., Zhang, S., Guo, X., Xiao, L., Yang, Y., Luo, Y., Mishra, U. y Luo, Z. (2024). Responses of soil organic carbon to climate extremes under warming across global biomes. *Nature Climate Change*, 14(1), 98-105. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01874-3>
- Weil, R. y Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education Inc.
- Wiese, L. D., Alcántara-Shivapatham, V. y Wollenberg, L. (2019). *Enhancing nationally determined contribution (NDC) ambition for soil organic carbon protection and sequestration*. [https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/102435/Wiese Info Note July 2019.pdf](https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/102435/Wiese%20Info%20Note%20July%202019.pdf)
- Xu, B., Pan, Y., Johnson, A. H. y Plante, A. F. (2016). Method comparison for forest soil carbon and nitrogen estimates in the Delaware river basin. *Soil Science Society of America Journal*, 80(1), 227-237. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.04.0167>



Yost, J. L. y Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. En D. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Volume 158, pp. 217-310). Academic Press, Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004>



Almacenamiento de carbono orgánico en suelos con fragmentos de roca en una microcuenca andina (Julián Leal Villamil • Edgar Álvaro Ávila Pedraza • Juan Carlos Rey Brina • Deyanira Lobo Luján) [Uniciencia](#) is protected by [Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-NC-ND 3.0\)](#)