

## Caracterización del comportamiento del carbono orgánico en tres sistemas agroforestales de cacao en el pacífico biogeográfico nariñense

Jesús Geovanny Solarte Guerrero<sup>1</sup>  

Jorge Fernando Navia Estrada<sup>2</sup>  

José Julián Apráez Muñoz<sup>3</sup>  

Recibido: 27/08/2025 Aceptado: 19/10/2025 Actualizado: 06/04/2026

DOI: 10.17151/luaz.2025.62.9

### Resumen

Esta investigación se desarrolló en el municipio de Tumaco, ubicado en el Pacífico Biogeográfico nariñense, al sur de Colombia, con el objetivo de caracterizar el comportamiento del carbono orgánico y el fraccionamiento de la materia orgánica en tres tipos de sistemas agroforestales de cacao (tradicional, semitecnificado y tecnificado). Para ello, se recolectaron muestras a una profundidad de 0 - 5 cm del suelo. Las variables analizadas fueron carbono total, C no extractable y extractable, ácidos húmicos y fúlvicos, y huminas. El análisis estadístico se basó en técnicas descriptivas y exploratorias. El sistema agroforestal semitecnificado de cacao mostró la mayor eficiencia en acumulación y estabilización del carbono del suelo, con el valor más alto de carbono orgánico total (5,95 %), equilibrio entre ácidos húmicos y fúlvicos (AH/AF  $\approx$  1) y mayor proporción de huminas (50,42 %). Este comportamiento se atribuye a la implementación de prácticas de manejo adecuadas y a una mayor diversidad vegetal. En contraste, los sistemas tradicional y tecnificado presentaron una menor eficiencia, con predominio de carbono más recalcitrante, atribuible a la ausencia de prácticas de manejo en el sistema tradicional y a un mayor laboreo en el sistema tecnificado, respectivamente. Estos resultados resaltan la importancia del manejo moderado para el secuestro de carbono en sistemas agroforestales.

**Palabras clave:** Cambio climático, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, huminas, agregados.

**Characterization of organic carbon behavior in three (3) cocoa agroforestry systems in the nariño biogeographic pacific region.**

### Abstract

This research was conducted in the municipality of Tumaco, located in the Nariño Biogeographic Pacific region of southern Colombia, with the objective of characterizing the behavior of organic carbon and the fractionation of organic matter in three types of cocoa agroforestry systems (traditional, semi-technified, and technified). To this end, samples were collected at a depth of 0–5 cm below the soil surface. The variables analyzed were total carbon, non-extractable and extractable carbon, humic and fulvic acids, and humins. Statistical analysis was based on descriptive and exploratory techniques. The semi-technified cocoa agroforestry system showed the highest efficiency in soil carbon accumulation and stabilization, with the highest total organic carbon

content (5.95%), a balance between humic and fulvic acids (HA/FA  $\approx$  1), and the highest proportion of humins (50.42%). This behavior is attributed to the implementation of appropriate management practices and greater plant diversity. In contrast, the traditional and technified systems showed lower efficiency, with a predominance of more recalcitrant carbon, attributable to the absence of management practices in the traditional system and greater tillage in the technified system, respectively. These results highlight the importance of moderate management for carbon sequestration in agroforestry systems.

**Keywords:** Climate change, humic acids, fulvic acids, humins, aggregates.

---

## Introducción

El carbono orgánico del suelo (COS) es esencial para la funcionalidad de los ecosistemas agrícolas, debido a que contribuye significativamente a mejorar la estructura edáfica, potencia la retención de agua, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y reduce los procesos de erosión (Page et al., 2020; Bi et al., 2023). El análisis del COS a través de su fraccionamiento en componentes lábiles y recalcitrantes como el carbono particulado, el carbono mineral asociado, así como los ácidos húmicos y fúlvicos permite comprender mejor su dinámica y estabilidad, aspectos fundamentales para la evaluación de la salud del suelo (Priyanka y Anshumali, 2016; Just et al., 2021). Dentro de estas fracciones, las sustancias húmicas como los ácidos húmicos y fúlvicos desempeñan un papel central como agentes estructurantes: mejoran la agregación y porosidad del suelo, incrementan la capacidad de intercambio catiónico facilitando la disponibilidad de nutrientes esenciales, aumentan la retención de agua y estimulan la actividad microbiana, factores que favorecen la eficiencia en la absorción de nutrientes (Malan, 2015; Wang et al., 2025).

Por esta razón, comprender el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo que descompone el carbono orgánico en carbono total, carbono extractable, carbono no extractable (huminas), así como ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF) permite evaluar componentes lábiles, intermedios y recalcitrantes, proporcionando una visión integrada del estado edáfico (Ukalska-Jaruga et al., 2021). De esta manera, las sustancias húmicas, que abarcan ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas, juegan un papel crucial en el secuestro y estabilización del carbono orgánico del suelo (SOC), siendo los AH y AF, mejoradores de la estructura del suelo, la capacidad de retención hídrica y la actividad microbiana, favoreciendo un entorno que contribuye indirectamente a la protección del carbono (Maffia, et al., 2025).

En ese sentido, las huminas, se asocian firmemente a los minerales del suelo, proporcionando una protección física duradera contra la degradación microbiana y las pérdidas de CO<sub>2</sub>, afirmándose cada vez más como la fracción principal responsable del almacenamiento de carbono a largo plazo (Tang et al., 2022; Maffia, et al., 2025). Por lo tanto, se deduce que las fracciones húmicas son útiles para evaluar la dinámica y calidad del carbono del suelo; mientras que, las huminas representan la fracción más duradera y estructuralmente integrada, fundamental para el secuestro de carbono a largo plazo.

Del mismo modo, la estabilización del carbono orgánico del suelo (COS) está altamente condicionada por las prácticas de manejo del suelo, es decir, en sistemas con labranza reducida o cero, se ha observado un aumento significativo en las fracciones húmicas, lo cual se atribuye a la

preservación de la estructura del suelo y la protección del carbono dentro de agregados estables (Kumar et al., 2025). Dichas prácticas de labranza reducida en fincas orgánicas aumentan la concentración y estabilidad de los ácidos húmicos al mantener intactos los agregados del suelo, reduciendo así las pérdidas de carbono por mineralización y erosión (Krauss et al., 2022). En contraste, los sistemas con manejo intensivo, que emplean rotaciones profundas y exceso de labranza, tienden a desintegrar los macroagregados y acelerar la descomposición microbiana del carbono, conllevando a la liberación de CO<sub>2</sub> y a una reducción significativa de las fracciones estables de carbono (Maffia, et al., 2025).

En el caso de los sistemas agroforestales perennes bajo sombra, como el cacao, estos son reconocidos por su capacidad para acumular cantidades elevadas de carbono orgánico del suelo (COS) gracias a la deposición continua de residuos vegetales (Chatterjee et al., 2020). Sin embargo, la eficiencia del secuestro de carbono depende en gran medida de la protección física del carbono dentro de los agregados del suelo, especialmente de los macroagregados que actúan como estructuras protectoras contra la mineralización y la pérdida de CO<sub>2</sub> (Macedo, et al., 2025). Por lo tanto, esta estabilización del carbono ocurre dentro de microagregados incluidos en macroagregados, posicionando a estas estructuras como el principal mecanismo de secuestro de carbono (Barman et al., 2025).

En este contexto, el presente estudio caracterizó el comportamiento del carbono orgánico en tres sistemas agroforestales de cacao –tradicional, semitecnificado y tecnificado, mediante el análisis del fraccionamiento de la MOS, diferenciando entre carbono total, extractable, no extractable (huminas), ácidos húmicos y fúlvicos, con el fin de contribuir con información sobre la eficiencia del secuestro de carbono y la estabilidad del suelo, elementos esenciales para el diseño de prácticas agroforestales sostenibles con impacto climático positivo.

---

## **Materiales y método**

Esta investigación se realizó en el municipio de Tumaco (Nariño), el cual se encuentra ubicado en el Pacífico biogeográfico nariñense al sur de Colombia, con una altura entre 0 y 400 msnm, temperatura promedio de 26 °C, precipitación que oscila desde los 2500 a 3500 mm anuales, siendo los períodos de menor lluvia en los meses de agosto, septiembre y noviembre; y los más lluviosos entre abril, mayo y junio. La humedad relativa es del 87 % y el brillo solar es relativamente bajo, el cual no supera las 3,5 horas luz/día (Universidad Nacional de Colombia, 2015). Según Holdridge (1982), el sitio se encuentra en la zona de vida bosque húmedo tropical (bh-T) y muy húmedo tropical (bmh-T).

Se evaluaron tres sistemas agroforestales de cacao –tradicional, semitecnificado y tecnificado– con diferentes asociaciones, cada uno con una superficie aproximada de 1,2 ha, en concordancia con el promedio de la Unidad Productiva Agropecuaria (UPA) de la zona de estudio. La selección de estos sistemas se basó en la homogeneidad del orden de suelos (entisoles) y en una edad promedio de entre 9 y 12 años, rango en el cual el cultivo de cacao alcanza su máxima producción. Los sistemas se describen a continuación:

### **Sistema tradicional**

Este sistema presenta cacao de la variedad (ICS 95) asociado con cedro (*Cedrela Odorata*), el cacao está sembrado a una distancia que varía de 3 a 5 metros sin un orden ni diseño establecido, con una altura promedio de 1,85 a 2,5 m y con un dap 0,26 a su vez, el cedro estaba disperso, con una altura promedio de 21,01 m y un dap de 0,26. Como especie acompañante frutales se encontró Mango (*mangifera indica*), Guayaba arazá (*Eugenia stipitata*), Zapote (*Quararibea cordata*). Como especies acompañantes de estrato bajo se encontraron Lolot (*Piper sarmentosum*), Caliguante (*Heliconia latispatha Benth*), Azalea Amarilla (*Rhododendron Luteum Sweet*) y helechos (*Adiantum Hispidulum*). Este sistema se caracteriza por no poseer distancias definidas, tanto para el cacao como para los maderables y frutales. Además, no se realiza ningún tipo de práctica de manejo como: limpia, fertilización, podas, deschuponado, adecuación de drenajes, manejo de plagas y enfermedades, entre otros.

### **Sistema semitecnificado**

Este sistema se caracterizó por presentar cacao de la variedad ICS 95 asociado con cedro (*Cedrela Odorata*), a una distancia de 3,5 x 3,5 m entre el cacao, con una altura promedio de 1,75 m y un dap de 0,26. Por su parte, el cedro se encontraba establecido a 7 x 7 entre árboles, con una altura promedio de 24,03 m y un dap de 0,26. Como especies acompañantes de estrato bajo se encontraron kudzú (*Pueraria Phaseoloides*), platanillo (*Heliconia tortuosa*) y helechos (*Adiantum Hispidulum*). Se caracteriza por tener distancias definidas para el cacao y los maderables; sin embargo, se realiza algún tipo de manejo como limpia, fertilización, drenajes y podas.

### **Sistema tecnificado**

Este sistema se caracterizó por presentar cacao de la variedad ICS 95 asociado a especies como Tangare (*Carapa Guianensis*) y Chontaduro (*Bactris Gasipaes*). El cacao se encuentra sembrado a 3,5 x 4 m, con una altura promedio de 1.75 m y un dap de 0.27. Por otra parte, el Tangare está a una disposición de 7,50 x 7,50, con una altura promedio de 24,09 m su dap es de 0,24. La palma de chontaduro 27 m. Como especies acompañantes de estrato bajo se encontraron helechos (*Adiantum Hispidulum*), Santa María (*Piper peltatum L.*), Matico (*Piper aduncum L.*) y Campanillas (*Ipomoea obscura*). Este tipo de sistema se destaca por poseer distancias definidas para el cacao y las especies asociadas, donde se realiza todas las actividades de limpia, fertilización, podas, deschuponado, drenajes, manejo de plagas y enfermedades, entre otros.

Para la determinación del carbono orgánico y el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo, se recolectaron múltiples submuestras en cada sistema agroforestal de cacao –tradicional, semitecnificado y tecnificado–, presentando una distribución representativa del área de estudio. Estas submuestras fueron homogeneizadas para conformar una muestra compuesta, la cual se obtuvo a una profundidad de 0 - 5 cm, dado que esta capa superficial concentra la mayor actividad biológica y dinámica de la materia orgánica. Posteriormente, las muestras fueron enviadas al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), donde se realizaron los análisis fisicoquímicos pertinentes siguiendo metodologías estandarizadas para la cuantificación del carbono orgánico y la caracterización de las fracciones de la materia orgánica del suelo.

El fraccionamiento de humus es una herramienta esencial para caracterizar la materia orgánica del suelo (MOS) en términos de su calidad, estabilidad y funcionalidad ecológica, debido a que permite

valorar mejoras en propiedades físicas, como la estructura y resistencia a la erosión, así como en la bioactividad del suelo (Piccolo y Drosos, 2025). En este estudio se empleó el protocolo Q-26 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el cual permite cuantificar las principales fracciones del carbono orgánico del suelo: carbono total, carbono extractable, carbono no extractable, ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (IGAC, 2006). La determinación del carbono total se realizó mediante el método de oxidación húmeda modificado de Walkley-Black, adaptado para muestras de suelos tropicales, el cual permite estimar el contenido total de carbono orgánico en la fracción fina del suelo (< 2 mm). Posteriormente, se extrajo la fracción coloidal (< 50  $\mu\text{m}$ ) para aislar la materia orgánica más funcionalmente activa, asociada a los minerales del suelo (Nelson y Sommers, 1982).

Las fracciones húmicas se obtuvieron mediante una extracción secuencial de la fracción fina del suelo utilizando soluciones alcalinas y organocomplejantes: primero tetraborato de sodio 0,05 M; seguido de, pirofosfato de sodio 0,025 M y finalmente hidróxido de sodio 0,1 M. Estas soluciones permiten disolver gradualmente las fracciones húmicas en función de su grado de complejidad y asociación con la fase mineral (Schnitzer y Khan, 1978; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2006). Una vez obtenida la mezcla húmica, se procedió a la separación de ácidos húmicos y fúlvicos mediante precipitación diferencial ajustando el pH a 1,0 con ácido clorhídrico. Los AH precipitados se aislaron por centrifugación y lavados sucesivos; mientras que, los AF permanecieron en la fase soluble. La purificación de los AF se realizó por adsorción en resina XAD-16, seguida de elución con NaOH 0,7 M y posterior paso por columna catiónica R-101 en forma  $\text{H}^+$ , con el fin de eliminar interferencias iónicas y conservar la integridad estructural de la fracción (Stevenson, 1994; IGAC, 2006).

Finalmente, el contenido de huminas se determinó por diferencia entre el carbono total de la fracción fina y la suma de los contenidos de carbono en AH y AF. Esta fracción, insoluble en medios alcalinos y ácidos, representa el componente más recalcitrante de la MOS, íntimamente ligado a la matriz mineral y con tiempos de residencia prolongados en el suelo (Piccolo, 2002; Lehmann y Kleber, 2015).

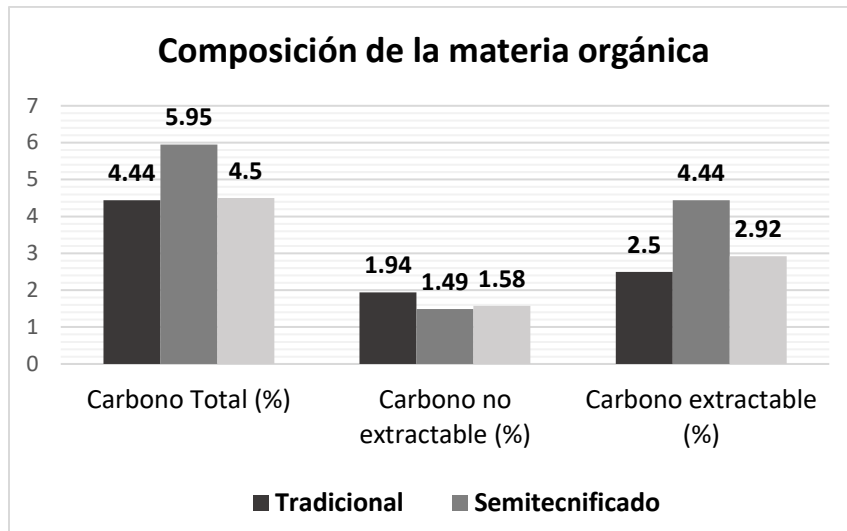
El análisis estadístico se enfocó en técnicas descriptivas y exploratorias no inferenciales (Triola, 2018), donde se realizó una comparación directa de los valores del carbono orgánico total y de sus fracciones –carbono extractable, carbono no extractable, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas–, con el fin de identificar diferencias entre los sistemas agroforestales evaluados.

---

## Resultados y discusión

### ***Análisis de la materia orgánica en los tres sistemas agroforestales de cacao (Carbono total, C no extractable y extractable)***

El análisis de la materia orgánica en los tres sistemas agroforestales de cacao permitió entender el aporte de cada sistema agroforestal a la acumulación de carbono y su papel en la sostenibilidad y conservación de la calidad del suelo ([Figura 1](#)).

**Figura 1.** Análisis de la materia orgánica en los tres sistemas agroforestales de cacao

Fuente: elaboración propia.

#### Carbono total

Los sistemas agroforestales de cacao mostraron diferencias en el carbono orgánico total (COT) según el nivel de tecnificación y manejo. El sistema semitecnificado presentó el valor más alto de COT (5,95 %), superando tanto al sistema tradicional (4,44 %) como al tecnificado (4,50 %). Esta concentración superior del sistema semitecnificado evidencia que un manejo intermedio, que combina prácticas mejoradas con asociaciones agroforestales como el cedro, puede favorecer la acumulación de materia orgánica en el suelo; sin embargo, la baja acumulación de C del sistema tradicional puede deberse a la baja sombra nativa que presentaba el sistema y la baja densidad de árboles de cacao sin ningún tipo de manejo, que limitan el aporte de hojarasca y materia orgánica, permitiendo que el suelo haya llegado a un equilibrio en COT; mientras que, el sistema tecnificado con mayor densidad de cacao, sombra intermedia y mayores prácticas agronómicas, podría tener más aportes de residuos orgánicos, pero una mayor perturbación del suelo.

En ese sentido, el sistema semitecnificado probablemente integrado por árboles de sombra manejados como *Cedrela Odorata* y con abundantes especies de porte bajo como kudzú (*Pueraria Phaseoloides*), platanillo (*Heliconia tortuosa*) y helechos (*Adiantum Hispidulum*), incrementan los retornos de hojarasca y raíces al suelo, explicando sus mayores niveles de COT. Estos resultados concuerdan con la idea de que una sombra moderada y prácticas sostenibles pueden optimizar la productividad del cacao mejorando el contenido de carbono del suelo, tal y como resaltan Asigbaase et al. (2020) quienes afirman que los sistemas manejados orgánicamente –con cobertura vegetal y sombra– presentaron hasta un 35 % más de carbono orgánico del suelo (COS) comparado con sistemas convencionales, reflejando tanto mayor cobertura como prácticas de manejo más sostenibles.

Otra consideración es la dinámica de descomposición y retención de carbono. Marques et al. (2016) resaltan que, en sistemas con más cobertura arbórea, el microclima más fresco y húmedo del sotobosque puede reducir la mineralización rápida de la materia orgánica, promoviendo la

formación de humus estable y que la presencia de árboles aportan materiales orgánicos de distinta calidad que pueden integrarse eficientemente al suelo. Este es el caso del sistema semitecnificado donde se practican podas regulares de sombra y del cacao, dejando que estos residuos se incorporen al suelo, aumentando el COT. Por el contrario, en el sistema tecnificado, el desyerbe intenso, la aplicación de herbicidas y la remoción de restos de cosecha o plantas enfermas, reducen la materia orgánica retornada al suelo.

Esto concuerda con Cuervo et al., (2016), quienes afirman que en suelos nativos existe una pérdida de carbono orgánico, en la medida en que la materia orgánica previamente protegida, se pierde por efectos de remoción de la capa del suelo, favoreciendo los procesos de oxidación. Estas diferencias concuerdan con lo observado, donde el sistema con manejo intermedio retiene más carbono; mientras que, el tradicional con cacaotales viejos y sombra dispersa, y el tecnificado con una intensidad alta de manejo presentan COT superficiales más bajos.

Estudios previos indican que los sistemas con mayor diversidad de árboles suelen almacenar más carbono orgánico en el suelo. Hernández et al. (2021) reportaron que los agroecosistemas cacaoteros con mayor riqueza de especies arbóreas acumulan cantidades significativamente mayores de carbono en el suelo, gracias al constante aporte de biomasa. Por su parte, el contenido de C en el sistema tecnificado fue similar al tradicional, lo cual podría atribuirse a prácticas de manejo (fertilización química o alteraciones) que limitan las pérdidas de carbono, pero tampoco contribuye a su aumento. No obstante, en términos generales, el rango de carbono total observado (4–6 %) en los tres sistemas agroforestales de cacao refleja niveles de materia orgánica de moderados a altos para suelos tropicales. Este resultado respalda la importancia de la asociación del cacao con cobertura arbórea como estrategia fundamental para promover la sostenibilidad y la salud del suelo en sistemas productivos de regiones tropicales.

Por otro lado, Chiquito et al. (2019) comparó varios sistemas de uso de la tierra y encontró que la vegetación nativa y los pastos a largo plazo tenían los niveles más altos de carbono orgánico total y carbono orgánico particulado, seguidos por los sistemas de árboles de caucho. Esto evidencia, que los tres sistemas a través del tiempo han acumulado cantidades considerables de carbono y que la presencia de especies acompañantes han contribuido a su acumulación. Asase y Tetteh (2016) consideran que los sistemas agroforestales, especialmente los dominados por cacao, conservan importantes reservas de carbono y que su manejo sostenible puede contribuir a la mitigación del cambio climático y a la conservación de servicios ecosistémicos.

#### *Carbono no extractable (carbono estable)*

El carbono no extractable (CNE), también llamado carbono recalcitrante, constituye la fracción más estable de la materia orgánica del suelo por su resistencia a la degradación y su fuerte asociación con minerales, lo que lo convierte en un componente clave para el secuestro de carbono a largo plazo (Rodrigues Mikhael et al., 2024) y en el principal indicador de acumulación y estabilidad del carbono en el perfil edáfico (Shi et al., 2023).

El sistema tradicional presentó el mayor contenido de carbono estable (1,94 %), seguido por el tecnificado (1,58 %) y el semitecnificado (1,49 %). A pesar de tener menos carbono total, el suelo del sistema tradicional retiene más carbono en forma persistente. Este mayor porcentaje de carbono recalcitrante en el sistema tradicional sugiere una MO más humificada, resultado de

décadas de acumulación lenta bajo bosque de sombra con alta diversidad y mínima perturbación, donde la presencia de árboles de sombra de diferentes especies no solo aporta más biomasa, sino que también promueve condiciones microclimáticas que favorecen la formación de humus resistente. Salvador et al. (2019) encontraron que los cacaotales con mayor diversidad y edad presentan mayores reservas de carbono almacenado en biomasa leñosa y en el suelo, apoyando la idea de que los sistemas tradicionales viejos secuestran carbono más estable a largo plazo. Además, estudios en cacaotales amazónicos indican que la longevidad del sistema y la mínima alteración del perfil edáfico favorecen la humificación profunda de la materia orgánica (Rodríguez et al., 2021). A su vez Oliveira et al. (2018) sostiene que el carbono resistente o no lábil tiende a aumentar con la profundidad y a ser más prevalente en sistemas de larga duración.

Por su parte, en los sistemas tecnificado y semitecnificado, los niveles más bajos de carbono no extractable podrían estar vinculados a prácticas agronómicas, como la limpia y el uso de fertilizantes químicos; tal y como lo señala Lal (2015) quien manifiesta que los sistemas asociados a prácticas de manejo suelen tener dificultad para mantener el carbono del suelo debido a la intensificación y manejo como labranza, menos cobertura, fertilización química, lo cual puede ayudar a estimular la oxidación de la MO activa y reducir las reservas estables. De igual manera, Aravena et al. (2025) afirman que los sistemas con labranza convencional y prácticas de manejo presentan menor almacenamiento de carbono orgánico, una menor estabilidad estructural del suelo, lo que indica una pérdida de carbono resistente. Por lo tanto, aunque estos sistemas aportan residuos orgánicos, la falta de estabilidad estructural del suelo debido a limpiezas, disturbios físicos y manejo pueden impedir que el carbono se estabilice en formas recalcitrantes.

En términos generales, los sistemas agroforestales de cacao favorecen la acumulación de carbono recalcitrante, fracción clave para la estabilidad del carbono del suelo a largo plazo. Esto es corroborado por Sirimalle et al. (2025) quienes evidenciaron que, tras 37 años, un sistema agroforestal incrementó significativamente estas fracciones frente a tierras en descanso, mejorando la estabilidad del carbono en perfiles edáficos profundos. De forma complementaria, Sari et al. (2025) reportaron que los sistemas agroforestales complejos concentran gran parte de la materia orgánica en la fracción densa, indicativa de carbono más persistente; mientras que, Gama et al. (2010) demostraron que en suelos de cacao este carbono se encuentra mayoritariamente protegido en macroagregados, reduciendo su vulnerabilidad a la mineralización.

En un contexto más amplio, Pan et al. (2024) y Amoakwah et al. (2022) coincidieron en que la conversión de tierras agrícolas a bosques o pastizales incrementa la formación de agregados estables y el contenido de carbono duradero, resaltando el papel de la restauración y el cambio de uso del suelo en la retención de carbono. En conjunto, estas evidencias subrayan que los SAF, especialmente bajo prácticas conservacionistas y con mínima perturbación física como es el caso de los sistemas tradicionales, constituyen estrategias efectivas para estabilizar carbono recalcitrante en el suelo.

### ***Fracción extractable (carbono lábil)***

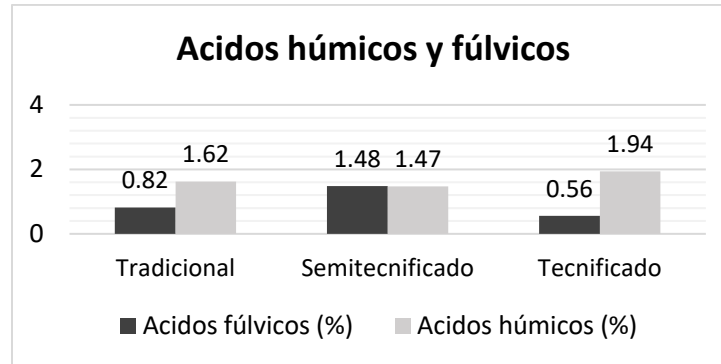
La fracción extractable de carbono comprende compuestos fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos y fragmentos de celulosa no protegida, y su rápida respuesta a cambios en el manejo del suelo, siendo un indicador sensible de la dinámica del carbono edáfico (Ortner et al., 2022; Cheng et al., 2025).

El sistema semitecnificado presentó el mayor contenido de carbono lábil (4,44 %), superando al tecnificado (2,92 %) y al tradicional (2,50 %). Esto evidenció una mayor disponibilidad de materia orgánica de fácil descomposición en el sistema semitecnificado, atribuida a los aportes continuos de hojarasca de cedro, restos de podas del cacao y biomasa de las especies de estrato bajo, aún no estabilizadas; por lo tanto, prácticas como la poda regular de cacao, la autopoda del cedro y el manejo de cobertura vegetal favorecen esta fracción activa del carbono; coherente con lo reportado por Wieder et al. (2019), quienes mencionan que sistemas agroforestales, bien manejados con mayor cobertura vegetal y aportes constantes de residuos resultan en mayor contenido de carbono fácilmente oxidable, indicador de suelos biológicamente activos. Investigaciones en agroforestería tropical muestran que sistemas con algún manejo orgánico aumentan sustancialmente los niveles de carbono lábil, en comparación con sistemas convencionales, un reflejo de suelos más activos biológicamente (Agbotui et al., 2024; Nahon et al., 2024), como es el caso del sistema semitecnificado, donde se realizan algunas actividades de manejo regulares como la poda que contribuyen al aporte constante de biomasa.

Por otro lado, Eduah et al. (2025), encontraron que la fertilización orgánica genera un incremento significativo del carbono activo en suelos cacaoteros; mientras que, la mineral tiende a estabilizar el carbono. Santos et al. (2024), en un estudio de sistemas agroforestales demostraron que las estrategias de manejo forestal progresivo aumentaron significativamente tanto el carbono lábil como el total en las primeras 10 cm del suelo, indicativo de suelos más activos y funcionales. Además, Panchal et al. (2022), sostienen que la actividad de raíces contribuye a aumentar la concentración del CO lábil, debido a que la presencia de leguminosas como el kudzú (*Pueraria Phaseoloides*), incrementan el carbono lábil por su intensa actividad radical y exudación, especie que solo se encontró en el sistema semitecnificado. Estos resultados enfatizan que, aunque el sistema tradicional y tecnificado aportan materia orgánica, solo aquellos que combinan cobertura viva (leguminosas) y manejo orgánico moderado como el semitecnificado, logran mantener altos niveles de carbono lábil, lo que puede mejorar la dinámica de nutrientes y la actividad microbiana.

### ***Ácidos húmicos y fúlvicos***

Los resultados muestran un marcado contraste en la relación AH/AF entre los sistemas evaluados, donde el sistema semitecnificado exhibió un balance entre ambas fracciones (AH = 1,47 %; AF = 1,48 %); mientras que, el tradicional tuvo una mayor proporción de AH (1,62 %) frente a AF (0,82 %), y el tecnificado presentó el contenido más alto de AH (1,94 %) junto al más bajo de AF (0,56 %) ([Figura 2](#)).

**Figura 2.** Porcentaje de ácidos húmicos y fúlvicos

Fuente: elaboración propia.

Los ácidos húmicos, son fundamentales para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como la estabilidad de agregados, la capacidad de retención de agua y la actividad enzimática, lo cual favorece el crecimiento vegetal (Ampong et al., 2022). Por otro lado, los ácidos fúlvicos son conocidos por su capacidad para mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, especialmente en suelos con texturas variables (por ejemplo, franco-arcillosas), gracias a su alta reactividad y movilidad (Sootahar et al., 2020). En este contexto, los sistemas tradicional y tecnificado, con alta acumulación de AH, indicarían suelos altamente humificados, caracterizados por una materia orgánica más recalcitrante. En el primer sistema, probablemente es producto de una baja incorporación de residuos lábiles; mientras que, en el tecnificado, prácticas intensivas de manejo podrían favorecer la acumulación de AH, pero no mantener AF.

En cambio, el sistema semitecnificado, con una relación AH/AF cercana a 1, revela una dinámica orgánica activa, donde los residuos vegetales se están transformando continuamente. Esto coincide con lo reportado por Santos et al. (2024), quienes sostienen que una relación cercana a 1 indica un estado de humificación dinámico y suelos biológicamente activos, donde los valores equilibrados de AH y AF suelen asociarse con sistemas que combinan cobertura vegetal, manejo moderado y alta interacción microbiana.

Estudios recientes han demostrado que el tipo y calidad de la materia orgánica aportada influye directamente en la relación entre fracciones húmicas. Zro et al. (2024) encontraron que en sistemas cacaoteros de África Occidental, la diversidad de especies arbóreas y la cobertura del sotobosque contribuyen significativamente a un mayor contenido de AF y a una humificación balanceada, mientras que sistemas con menor diversidad estructural tienden a acumular AH de forma dominante. Esto se evidencia en el sistema tradicional y semitecnificado, donde se presentó un equilibrio balanceado entre AH y AF; sin embargo, en el tecnificado la acumulación de AH fue mayor.

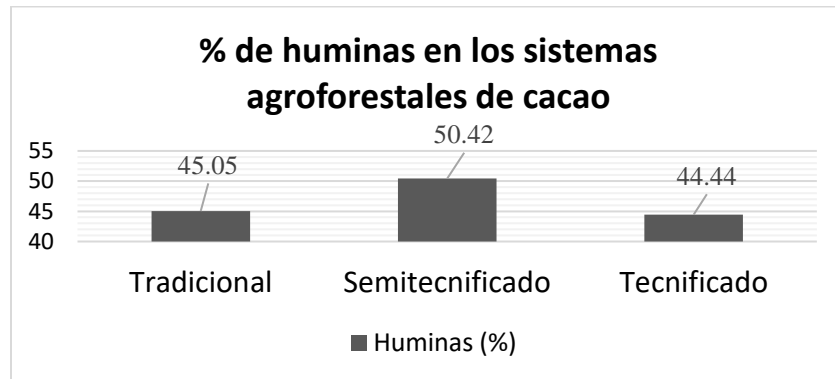
Por otra parte, el equilibrio de ambas fracciones presentado en el sistema semitecnificado evidencia una dinámica activa de transformación de la materia orgánica, asociada a un manejo intermedio y aportes constantes de residuos vegetales. Este comportamiento coincide con lo reportado en agroecosistemas de Brasil, donde una mayor diversidad estructural favorece la acumulación equilibrada de carbono húmico y fúlvico (Souza et al., 2023); además de, que los contenidos de ácido húmico y ácido fúlvico aumentan constantemente con la restauración y manejo de la vegetación (Yang et al., 2024).

En contraste, el sistema tradicional, con baja incorporación de biomasa fresca y ausencia de prácticas de manejo, mostró una predominancia de AH, indicador de materia orgánica humificada y baja actividad biológica, como también lo señalan Ohno et al. (2009) quienes manifiestan que en suelos agrícolas con labranza mínima muestran efectos similares, indicando que la dominancia de AH y la reducción de AF se aceleran en condiciones de baja renovación y perturbación limitada. Por su parte, el sistema tecnificado presentó un predominio marcado de AH, resultado de un manejo intensivo que acelera la descomposición inicial y favorece la estabilización rápida del carbono, limitando la presencia de AF. Este patrón ha sido descrito en sistemas de alta intervención, donde el exceso de perturbación altera el equilibrio natural de las fracciones húmicas (Zhou et al., 2025).

### **Huminas**

Las huminas son la fracción más estable de la materia orgánica del suelo por su insolubilidad en agua, soluciones alcalinas y ácidas debido a su alto peso molecular y fuerte unión a minerales lo que les permite permanecer por décadas o siglos cumpliendo un rol clave en el secuestro de carbono y la estabilidad estructural del suelo (Weber et al., 2024). La proporción de huminas en los tres sistemas agroforestales de cacao evaluados mostró diferencias marcadas, siendo más alta en el sistema semitecnificado (50,42 %), seguido por el tradicional (45,05 %) y el tecnificado (44,44 %) (Figura 3). Estas variaciones reflejan el efecto del tipo de manejo y la dinámica de la materia orgánica sobre la fracción más recalcitrante y estable del carbono en el suelo.

**Figura 3. Porcentaje de huminas en los sistemas agroforestales de cacao**



Fuente: elaboración propia.

El mayor contenido de huminas en el sistema semitecnificado refleja una mayor eficiencia en los procesos de estabilización del carbono, resultado de un equilibrio entre aportes orgánicos frecuentes (residuos de poda, hojarasca, raíces) y un manejo moderado, lo que favorece la formación de agregados estables y la protección física del carbono. Esto coincide con lo reportado por Weber et al. (2024), quienes demostraron que el uso de cultivos de cobertura y un manejo orgánico moderado incrementan la formación de huminas en los primeros 5 cm en suelos tropicales, promoviendo su asociación con la fracción mineral y su persistencia a largo plazo. De igual manera, un estudio desarrollado en sistemas agroforestales del nordeste de Brasil reportó que las huminas alcanzaron los valores más altos de carbono en áreas agroforestales, lo que resalta el potencial de estos sistemas para el secuestro de carbono a largo plazo (Crespo et al., 2024). Además, estudios realizados por Dos Santos et al. (2018) evidencian que la acumulación de huminas tiende a

concentrarse en las capas superficiales del suelo (5–10 cm) en sistemas sin labranza, especialmente cuando se combinan con especies de cobertura, promoviendo así procesos eficientes de humificación de la materia orgánica.

Asimismo, Salazar (2023) evidenció que, en cultivos con cobertura, el contenido de huminas aumentó significativamente en la capa superficial (0–5 cm). Estos hallazgos respaldan lo observado en el sistema semitecnificado, donde las prácticas de manejo moderadas y la presencia de especies del estrato bajo como *Pueraria phaseoloides* (kudzú), *Heliconia tortuosa* (platanillo) y *Adiantum hispidulum* (helechos) contribuyen activamente a la estabilización del carbono mediante la acumulación de huminas en el suelo.

Por otro lado, el sistema tradicional, aunque libre de perturbación, puede experimentar una acumulación lenta de huminas debido a la baja incorporación de residuos frescos provenientes de la poda del cacao y las especies asociadas. Esto coincide con investigaciones en suelos de mínima intervención, donde las huminas se forman gradualmente, pero sin alcanzar altos niveles de concentración a corto plazo (Ohno et al., 2009). De igual manera, Hayes y Swift (2017) señalan que la formación de huminas es un proceso acumulativo que ocurre lentamente, incluso en escenarios de mínima perturbación; y Piccolo y Drosos (2025) enfatiza que, sin aportes constantes de materia orgánica fresca, la humificación no alcanza altos niveles en el corto plazo.

En contraste, la menor proporción de huminas en el sistema tecnificado podría explicarse por prácticas de manejo como el deshierbe y la fertilización química, las cuales degradan la estructura del suelo y aceleran la mineralización del carbono, limitando así la formación de huminas. Yang et al. (2024) demostraron que la estabilidad de agregados estrechamente vinculada a la acumulación de huminas se incrementa con la restauración vegetal y disminuye bajo manejos que alteran la estructura edáfica. No obstante, Weber et al. (2024) indican que manejos que mantienen cobertura vegetal modifican y favorecen la estabilización de humina en los primeros centímetros del suelo.

Estos resultados respaldan la idea de que, las prácticas de manejo y la diversidad de especies en los sistemas agroforestales de cacao, tienen un efecto positivo sobre la estabilidad del carbono en el suelo, lo que resulta clave para el desarrollo de sistemas de producción más sostenibles. En concordancia, Xianwei et al. (2025) señalan que la restauración de la vegetación incrementa de forma significativa la materia orgánica del suelo y sus fracciones lábiles; mientras que, Marinho et al. (2021) demostraron que las coberturas arbóreas favorecen la acumulación de humina; por lo tanto, mantener cobertura y diversidad vegetal promueve la formación de huminas y favorece el secuestro de carbono a largo plazo.

---

## Conclusiones

El sistema semitecnificado, promueve una mayor acumulación de carbono y actividad biológica del suelo, debido al manejo intermedio, por la incorporación constante de residuos orgánicos y la presencia de especies como leguminosas y coberturas vegetales que favorecen la activación de la materia orgánica, mejorando la dinámica de nutrientes y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema.

El sistema tradicional, retiene una mayor proporción de carbono estable, debido a su baja perturbación y a la diversidad arbórea que genera un microclima favorable para la humificación profunda; sin embargo, su aporte total de carbono es menor, contribuyendo al secuestro a largo plazo del carbono en formas resistentes a la descomposición.

La integración de la diversidad vegetal, manejo orgánico moderado y cobertura viva en sistemas agroforestales, como el tecnificado, favorece la acumulación como la estabilidad del carbono en el suelo, mejorando la calidad edáfica y favoreciendo los procesos ecológicos como estrategias clave para mitigar el cambio climático y conservar los servicios ecosistémicos.

La relación equilibrada entre ácidos húmicos y fúlvicos en el sistema tecnificado refleja el efecto del manejo sobre la dinámica del suelo, indicando una humificación activa; no obstante, la dominancia de ácidos húmicos en sistemas tradicional y tecnificado sugiere baja renovación, definiendo que las prácticas deficientes o intensivas limitan la transformación de la materia orgánica.

Los sistemas agroforestales, con manejo moderado y diversidad vegetal favorecen la acumulación de huminas, mejorando la estabilidad del carbono en el suelo y promoviendo su función como sumidero a largo plazo, alternativa para mitigar el cambio climático.

---

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones e Interacción Social de la Universidad de Nariño, quién financió este proyecto.

---

### Referencias bibliográficas

- Agbotui, D. K., Ingold, M., y Buerkert, A. (2024). Carbon and nutrient cycling in cocoa agroforests under organic and conventional management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 129, 7-20. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10349-6>
- Amoakwah, E., Lucas, S., Didenko, N., Rahman, M., y Islam, K. (2022). Impact of deforestation and temporal land-use change on soil organic carbon storage, quality, and lability. *PLoS One*, 17(8), e0263205. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263205>
- Ampong, K., Thilakaranthna, M.S., y Gorim, L.Y. (2022). Understanding the Role of Humic Acids on Crop Performance and Soil Health. *Frontiers*, 4. [doi.org/10.3389/fagro.2022.848621](https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621)
- Aravena, C., Valle, S., Vergara, R., González, M., Martínez, O., Clunes, J., y Asenjo, J. (2025). Effect of Agricultural Management Intensity on the Organic Carbon Fractions and Biological Properties of a Volcanic-Ash-Derived Soil. *Sustainability*, 17(6), 2704. <https://doi.org/10.3390/su17062704>
- Asase, A., y Tetteh, D. (2016). Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in southeast Ghana. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1), 96-113. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1110223>

- Asigbaase, M., Dawoe, E. L. K., Lomax, B. H., y Sjögersten, S. (2020). Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests in Ghana. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 295.
- Barman, S., Bhattacharyya, R., Singh, C., Rathore, A.C., Singhal, V., Muruganandan, M., y Kumar, S. N. (2025). Soil organic carbon stabilization inside microaggregates within macroaggregates is the major mechanism of carbon sequestration under a long-term agroforestry system in the foot hills of the Indian Himalayas. *Soil and Tillage Research*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106649>
- Bi, X., Chu, H., Fu, M., Xu, D., Zhao, W., Zhong, Y, y Zhang, Y. (2023). Distribution characteristics of organic carbon (nitrogen) content, cation exchange capacity, and specific surface area in different soil particle sizes. *Scientific Reports*, 13(1), 12242. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38646-0>
- Chatterjee, N., Nair, P, Nair, V., Viswanath, S., y Bhattacharjee, A. (2020). Depth-wise distribution of soil-carbon stock in aggregate-sized fractions under shaded-perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. *Agroforestry Systems*, 94, 341-358.
- Cheng, R., Du, L., Ye, S., y Wang, S. (2025). Soil Organic Carbon and Labile Organic Carbon Fractions Drive the Dynamics of Aggregate Composition and Stability in a Chronosequence of Tea Plantations. *Agronomy*, 15(2), 501. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020501>
- Chiquito Nanzer, M., Cândido Ensinas, S., Feliciani Barbosa, G., Vechetin Barreta, Pereira de Oliveira, T., Marques da Silva, J., y Albino Paulino, L. (2019). Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 136-145. [doi.org/10.5965/223811711812019136](https://doi.org/10.5965/223811711812019136)
- Crespo, C., Piscoya, V., Moraes, A., França, M., Fernandes, M., Cunha, M., y Araújo, R. (2024). Humic fractions of soil carbon under agroforestry system in altitude swamp Pernambucano. *Ciência Florestal*, 34. [doi.org/10.5902/1980509865061](https://doi.org/10.5902/1980509865061)
- Cuervo-Barahona, E.L., Cely-Reyes, G.E., y Moreno-Perez, D.F. (2016). Determinación de las fracciones de carbono orgánico en el suelo del páramo La Cortadera, Boyacá. *Ingenio Magno*, 7(2), 139-149. <https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1200>
- Dos Santos, L., Loss, A., Canton, L., Dos Santos, E., Kurtz, C., Brunetto, G., y Comin, J. (2018). Efecto del contenido de Carbono en sustancias húmicas en suelo en un cultivo de cebolla. *Idesia*, 36(1), 15-25. [doi.org/10.4067/S0718-34292018000100015](https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100015)
- Eduah, J., Arthur, A., Amoako, I., Manso, E., Quaye, A., Dogbatse, J., y Padi, F. (2025). Differential impacts of organic and chemical fertilization on soil organic carbon pools and stability, and soil quality in cacao agroforestry. *Soil y Environmental Health*, 3(3). [doi.org/10.1016/j.seh.2025.100147](https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100147)

- Gama, E., Ramachandran, P., Nair, V., Gama, A., Baligar, V., y Machado, R. (2010). Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental management*, 45(2), 274-283. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9420-7>
- Hayes, M., Mylotte, R., y Swift, R. (2017). Humin: its composition and importance in soil organic matter. *Advances in agronomy*, 143, 47-138. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.001>
- Hernández, H., Andrade, H., Suárez, J., Sánchez, J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, G., y Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Holdridge, L. (1982). *Ecología Basada en Zonas de Vida*. San José, 1a. ed. Costa Rica: IICA.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos* (6. a ed.). IGAC.
- Just, C., Poeplau, C., Don, A., Van Wesemael, B., Kögel, I., y Wiesmeier, M. (2021). A simple approach to isolate slow and fast cycling organic carbon fractions in central European soils— Importance of dispersion method. *Frontiers in Soil Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.692583>
- Krauss, M., Wiesmeier, M., Don, A., Cuperus, F., Gättinger, A., Gruber, S., y Steffens, M. (2022). Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105262>
- Kumar, A., Antoniella, G., Blasi, E., y Chiti, T. (2025). Recent advances in regenerative sustainable agricultural strategies for managing soil carbon and mitigating climate change consequences. *Catena*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109208>
- Kumar, M., Zeng, X., Wang, Y., Su, S., Soothar, P., Bai, L., y Ye, N. (2020). The Short-Term Effects of Mineral- and Plant-Derived Fulvic Acids on Some Selected Soil Properties: Improvement in the Growth, Yield, and Mineral Nutritional Status of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Soils of Contrasting Textures. *Plants*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/plants9020205>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lehmann, J. & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Macedo, R., Moro, L., Sousa, C., Carneiro, K., Dos Santos, R., Cavalcante, E., y Campos, M. (2025). Aggregate-Associated Organic Carbon Storage and Iron Oxides Respond to Land Use in Atlantic Forest Patches in Northeastern Brazil. *Eurasian Soil Science*, 58(17). <https://doi.org/10.1134/S1064229324600829>
- Maffia, A., Oliva, M., Marra, F., Mallamaci, C., Nardi, S., y Muscolo, A. (2025). Humic Substances: Bridging Ecology and Agriculture for a Greener Future. *Agronomy*, 15(2), 410. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020410>

- Malan, C. (2015). A Practical Approach Review of Humic and Fulvic acids. Disponible en: <https://www.fertasa.co.za/wp-content/uploads/2019/01/06-MALAN-Humic-Fulvic-acids..pdf>
- Marinho, J., Piscoya, V., Fernandes, M., Gonçalves, S., Holanda, F., Cunha, M., y Araújo Filho, R. (2021). Carbon dynamics in humic fractions of soil organic matter under different vegetation cover in southern Tocantins. *Floresta e Ambiente*, 28(2). <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0024>
- Marques Monroe, P., Gama, E., Gama, A., y Bonadie, J. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 221, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Nahon, S., Trindade, F., Yoshiura, C., Martins, G., Costa, I., Costa, P., y Valadares, R. (2024). Impact of Agroforestry Practices on Soil Microbial Diversity and Nutrient Cycling in Atlantic Rainforest Cocoa Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21). [doi.org/10.3390/ijms252111345](https://doi.org/10.3390/ijms252111345)
- Nelson, D., y Sommers, L. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En A. L. Page, R. H. Miller, y D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, (Agronomy Monographs 9, pp. 539–579). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Ohno, T., He, Z., Tazisong, I., y Senwo, Z. N. (2009). Influence of tillage, cropping, and nitrogen source on the chemical characteristics of humic acid, fulvic acid, and water-soluble soil organic matter fractions of a long-term cropping system study. *Soil Science*, 174(12), 652-660. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c30808>
- Oliveira, T., Ensinas, S., Barbosa, G., Nanzer, M., Barreta, P., Silva, M., y Do Prado, E. (2018). Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, 8(4).
- Ortner, M., Seidel, M., Semella, S., Udelhoven, T., Vohland, M., y Thiele, S. (2022). Content of soil organic carbon and labile fractions depend on local combinations of mineral-phase characteristics. *Soil*, 8(1), 113-131.
- Page, K., Dang, Y., y Dalal, R. (2020). The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in sustainable food systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>
- Pan, Z., Cai, X., Bo, Y., Guan, C., Cai, L., Haider, F., y Yu, H. (2024). Response of soil organic carbon and soil aggregate stability to changes in land use patterns on the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 14(1), 31775. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82300-2>
- Panchal, P., Preece, C., Peñuelas, J., y Giri, J. (2022). Soil carbon sequestration by root exudates. *Trends in Plant Science*, 27(8), 749-757.

- Piccolo, A. y Drosos, M. (2025). The essential role of humified organic matter in preserving soil health. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 12(21). <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00730-0>
- Piccolo, A. (2002). The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Advances in Agronomy*, 75, 57–134. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7)
- Priyanka, K., y Anshumali. (2016). Soil carbon: an overview on soil carbon function and its fractionation. *Current World Environment*, 11(1), 178. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.11.1.22>
- Rodrigues Mikhael, J.E., Ferraz Almeida, R., Oliveira Franco, F., Oliveira Camargo, R., y Wendling, B. (2019). Recalcitrant carbon and nitrogen in agriculture soils with residue accumulation and fertilization under tropical conditions. *Bioscience Journal*, 35(3), 732-740. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n3a2019-41859>
- Rodríguez, L., Suárez, J., Casanoves, F., y Ngo Bieng, M. A. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- Salazar Landea, M.P. (2023). *Cultivos de cobertura en suelos bajo siembra directa: Su efecto sobre las propiedades físicas y la materia orgánica del suelo* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de la Plata]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=337950>
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L. C., Martínez-Sánncnez, J., Sánchez-Hernández, R., y Valdés-Velaverde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Santos, J., Santos, A., Costa, C., Araujo, A., Leite, G., Coser, T., y Figueiredo, C. (2024). Fractions of organic matter and soil carbon balance in different phases of an agroforestry system in the Cerrado: A ten-year field assessment. *Soil Systems*, 8(2). [doi.org/10.3390/soilsystems8020044](https://doi.org/10.3390/soilsystems8020044)
- Sari, R., Sapulete, C., Saputra, D. y Hairiah, K. (2025). The Dynamics of Soil Organic Matter Fractions in Cacao-Based Agroforestry Systems. *Journal of tropical soils*, 30(2), 103-112. <https://doi.org/10.5400/jts.2025.v30i2.103-112>
- Schnitzer, M., y Khan, S. (1978). *Soil organic matter*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Shi, J., Song, M., Yang, L., Zhao, F., Wu, J., Li, J., y Deng, L. (2023). Recalcitrant organic carbon plays a key role in soil carbon sequestration along a long-term vegetation succession on the Loess Plateau. *Catena*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107528>
- Sirimalle, M., Kumawat, C., Jiménez, R., Meena, R., Sharma, K., Patra, A., y Kumawat, A. (2025). Impact of Long-Term Agroforestry Systems on Carbon Pools and Sequestration in Top and

- Deep Soil Layers of Semi-Arid Region of Western India. *Forests*, 16(6), 946. <https://doi.org/10.3390/f16060946>
- Sootahar, M., Zeng, X., Wang, Y., Su, S., Sootahar, P., Bai, L., Sootahar, M., Zhang, A Mustafa, A. y Ye N (2020). The short-term effects of mineral- and plant-derived fulvic acids on some selected soil properties: improvement in the growth, yield, and mineral nutritional status of wheat (*Triticum aestivum* L.) under soils of contrasting textures. *Plants* 9(2), 205. <https://doi.org/10.3390/plants9020205>.
- Souza, R., Silva, A., Lima, L. y Almeida, B. (2023). Humic fractions of soil carbon under agroforestry system in altitude Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47, e0230002. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230002>
- Stevenson, F. (1994). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions* (2a ed.). John Wiley Sons.
- Tang, C., Cheng, K., Liu, B.; Antonietti, M., y Yang, F. (2022). Artificial humic acid facilitates biological carbon sequestration under freezing-thawing conditions. *Science of The Total Environment*, 849, 157841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157841>
- Triola, M. F. (2018). *Estadística* (13.ª ed.). Pearson.
- Ukalska, A., Bejger, R., Debaene, G., y Smreczak, B. (2021). Characterization of soil organic matter individual fractions (fulvic acids, humic acids, and humins) by spectroscopic and electrochemical techniques in agricultural soils. *Agronomy*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy11061067>
- Universidad Nacional de Colombia - Tumaco. (2015). Plan de manejo ambiental. Disponible en: [http://www.unal.edu.co/contratacion/2016/IP\\_Obras\\_PreliminaresyPilotaaje\\_Tumaco\\_11102016/Anexo%208.%20Plan%20de%20Manejo%20Ambiental%20ORIO.pdf](http://www.unal.edu.co/contratacion/2016/IP_Obras_PreliminaresyPilotaaje_Tumaco_11102016/Anexo%208.%20Plan%20de%20Manejo%20Ambiental%20ORIO.pdf).
- Wang, C., Xu, C., Ma, R., Li, Q., Hu, F., Zhao, S., y Bol, R. (2025). Comparison for colloidal stability and aggregation behavior of fulvic and humic acids: effects of cations and pH. *Frontiers in Soil Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1452870>
- Weber, J., Jamroz, E., Mielnik, L., Spaccini, R., Kocowicz, A., Ćwieląg, I., y Dębicka, M. (2024). Changes in Soil Humin Macromolecular Structure Resulting from Long-Term Catch Cropping. *Molecules*, 29(21), 5049. [doi.org/10.3390/molecules29215049](https://doi.org/10.3390/molecules29215049)
- Wieder, W., Sulman, B., Hartman, M., Koven, C., y Bradford, M. (2019). Arctic soil governs whether climate change drives global losses or gains in soil carbon. *Geophysical Research Letters*, 46, 14486–14495. <https://doi.org/10.1029/2019GL085543>
- Yang, Y., Wei, H., Lin, L., Deng, Y., y Duan, X. (2024). Effect of vegetation restoration on soil humus and aggregate stability within the Karst Region of southwest China. *Forests*, 15(2), 292. <https://doi.org/10.3390/f15020292>
- Zro, F., Yeo, L., Toure, B., Guei, M., y Bakayoko, S. (2024). Evaluation of Soil Quality under Cocoa Trees in the Marahoué Region (Central-Western Côte d'Ivoire). *Open Journal of Soil Science*, 14(9), 537-553. <https://doi.org/10.4236/ojss.2024.149028>

---

1 Doctor en Ciencias Agrarias. Docente, Universidad de Nariño. Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: solarteg@hotmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0311-5853> – Google Scholar: [https://scholar.google.com/citations?user=Q\\_Q4SksAAAAJ&hl=es](https://scholar.google.com/citations?user=Q_Q4SksAAAAJ&hl=es)

2 Doctor en Ciencias Agropecuarias énfasis en suelos. Docente, Universidad de Nariño. Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: jornavia@gmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2441-2400> – Google Scholar: [https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=Q\\_Q4SksAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=Q_Q4SksAAAAJ)

3 Doctor en Genética y Biología Molecular. Docente, Universidad de Nariño. Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: apraez.julian@gmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7348-0912> – Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=1iTqbW4AAAAJ&hl=es>

---

**Para citar este artículo:** Solarte Guerrero, J.G., Navia Estrada, J.F., y Apráez Muñoz, J.J. (2026). Caracterización del comportamiento del carbono orgánico en tres sistemas agroforestales de cacao en el pacífico biogeográfico nariñense. *Revista Luna Azul*, (62), 151-169. DOI: <https://doi.org/10.17151/luaz.2026.62.9>

---

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Código QR del artículo

