

Del stock de carbono orgánico del suelo a indicadores compatibles con MRV en plantaciones forestales tropicales

From soil organic carbon stocks to MRV-compatible indicators: a methodological pathway for tropical forest plantations

Víctor Meza-Picado¹, Froylan Arguedas-García², Edwin Esquivel-Segura³, German Obando-Vargas⁴, Diego Barrantes Salas⁵, Arturo Ureña-Sánchez⁶

[Recibido: 6 de octubre de 2025; Aceptado: 18 de noviembre de 2025; Corregido: 4 de junio de 2026; Publicado: 21 de julio de 2026]

Resumen

[Introducción]: El carbono orgánico del suelo (COS) está débilmente integrado en los esquemas de compensación forestal, debido a que sus cambios son espacialmente variables, lentos de detectar y metodológicamente exigentes de verificar. **[Objetivo]:** Examinar la variación del stock de COS en una cronosecuencia operacional de turno corto y desarrollar una ruta metodológica preliminar para la contabilidad edáfica orientada a monitoreo, reporte y verificación (MRV). **[Metodología]:** Se utilizaron plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. en el norte de Costa Rica como caso empírico. La concentración de C se determinó a 0–30 cm en plantaciones de 0, 3 y 6 años; posteriormente, el stock de COS se calculó integrando concentración de C %, densidad aparente (DA), profundidad de muestreo y fragmentos gruesos. **[Resultados]:** Los cambios de stock se anualizaron y se convirtieron a equivalencias potenciales en CO₂e mediante el factor estequiométrico 44/12. Las reservas promedio de COS aumentaron de 72.8 t C ha⁻¹ en la línea base a 83.4 t C ha⁻¹ en plantaciones de seis años bajo manejo de rebrote, lo que correspondió a tasas aparentes de 1.73 a 1.77 t C ha⁻¹ año⁻¹ y a equivalencias potenciales de 6.4 a 6.5 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. Dado el diseño exploratorio, la comparación por cronosecuencia y el número limitado de repeticiones independientes, estos valores no deben interpretarse como remociones verificadas ni como créditos comercializables. **[Conclusiones]:** La contribución principal del artículo es una ruta MRV conservadora que distingue concentración de C, stock de COS, cambio aparente de stock, tasa anual, equivalencia potencial en CO₂e y crédito de carbono verificable. Este marco puede orientar pilotos futuros que busquen integrar suelos forestales en sistemas de contabilidad climática bajo requisitos más robustos de línea base, incertidumbre, adicionalidad, permanencia, control de fugas y verificación independiente.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo; MRV; *Gmelina arborea*; CO₂ equivalente; integridad ambiental; créditos de carbono.

- 1 Docente e investigador del Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional (UNA), Heredia, Costa Rica. victor.meza.picado@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-8223-4761>
- 2 Ingeniero forestal, estudiante de licenciatura de la Universidad Nacional (UNA), Alajuela, Costa Rica. froylanarguedasgarcia@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-0363-2192>
- 3 Docente e investigador de la Escuela de Ingeniería en Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, Costa Rica. eesquivel@itcr.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0001-9553-060X>
- 4 Consultor independiente, Cartago, Costa Rica; gobando67@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4450-7038>
- 5 Ingeniero forestal, maderas cultivadas de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica. ldbarrantes@maderascultivadas.com; <https://orcid.org/0009-0005-0443-5663>
- 6 Ingeniero forestal, coordinador técnico - Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture (SCALA) FAO, Heredia, Costa Rica. geiner.urenasanchez@fao.org; <https://orcid.org/0009-0002-8774-9884>



Abstract

[Introduction]: Soil organic carbon (SOC) remains weakly integrated into forest carbon offset schemes because SOC changes are spatially variable, slow to detect and methodologically demanding to verify. **[Objective]:** To examine SOC stock variation across a short-rotation operational chronosequence and to develop a preliminary methodological pathway for MRV-oriented forest soil carbon accounting. **[Methodology]:** This study used *Gmelina arborea* Roxb. plantations in northern Costa Rica as an empirical case. Carbon concentration was determined at 0–30 cm depth in plantations aged 0, 3 and 6 years; SOC stocks were then calculated by integrating C concentration, bulk density, sampling depth and coarse fragments. Stock changes were annualized and converted into potential CO₂e equivalences using the 44/12 stoichiometric factor. **[Results]:** Mean SOC stocks increased from 72.8 t C ha⁻¹ at baseline to 83.4 t C ha⁻¹ in six-year-old coppice-managed plantations, corresponding to apparent annual rates of 1.73–1.77 t C ha⁻¹ yr⁻¹ and potential CO₂e equivalences of 6.4–6.5 t CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹. Given the exploratory design, chronosequence comparison and limited independent replication, these estimates should not be interpreted as verified removals or marketable credits. **[Conclusions]:** The main contribution of this article is a conservative MRV pathway that distinguishes C concentration, SOC stock, apparent stock change, annualized rate, potential CO₂e equivalence and verifiable carbon credits. This framework can guide future pilots seeking to integrate forest soils into carbon accounting systems under stronger baseline, uncertainty, additionality, permanence, leakage and independent verification requirements.

Keywords: soil organic carbon; MRV; *Gmelina arborea*; CO₂ equivalent; environmental integrity; carbon credits.

1. Introducción

El carbono del suelo constituye uno de los reservorios terrestres más relevantes para la regulación climática, la fertilidad, la estructura edáfica y la estabilidad funcional de los ecosistemas. En el contexto de la mitigación del cambio climático, su incorporación en estrategias de contabilidad de carbono ha adquirido creciente interés, debido a que los cambios en los *stocks* edáficos pueden contribuir a la remoción o conservación de carbono atmosférico bajo determinadas condiciones de uso y manejo del suelo (Lal, 2004; Paustian *et al.*, 2016). Sin embargo, su integración en esquemas de compensación climática es limitada, principalmente porque los cambios del COS suelen ser lentos, espacialmente variables y metodológicamente exigentes de medir, reportar y verificar (Dynarski *et al.*, 2020).

En los sistemas forestales, la contabilidad de carbono se ha concentrado tradicionalmente en la biomasa aérea y subterránea, mientras que el componente edáfico recibe menor atención operativa. Esta baja presentación responde a desafíos técnicos asociados con la profundidad de muestreo, la DA, la fracción gruesa, la variabilidad espacial, la masa equivalente de suelo, la periodicidad del monitoreo y la necesidad de distinguir entre cambios reales de *stock* y variaciones atribuibles al método de medición (IPCC, 2006, 2019; Poeplau *et al.*, 2017). La literatura reciente enfatiza que los estudios orientados a MRV deben priorizar *stocks* de carbono expresados por unidad de área y tasas anualizadas, más que concentraciones aisladas de carbono (Fowler *et al.*, 2023; Le Noë *et al.*, 2023).



La evidencia sobre cambios de uso del suelo muestra que la respuesta del carbono edáfico depende del uso anterior y posterior, la textura, el clima, la profundidad evaluada, la historia de manejo y las condiciones locales del sitio. Guo y Gifford (2002) reportaron que varias transiciones de uso del suelo pueden generar pérdidas relevantes de carbono, especialmente cuando se pasa de coberturas menos perturbadas hacia usos agrícolas. En sistemas tropicales, Don *et al.* (2011) mostraron que la conversión de bosque primario a usos agropecuarios tiende a reducir los *stocks* de carbono del suelo, aunque algunas trayectorias de restauración o sistemas con mayor cobertura pueden recuperar parcialmente dichas reservas. Por tanto, no puede asumirse que el establecimiento de plantaciones forestales incrementa automáticamente el carbono del suelo frente a otros usos, como pasturas, áreas agrícolas o bosques secundarios (Beillouin *et al.*, 2023).

En plantaciones forestales tropicales de turno corto, la dinámica del carbono del suelo puede estar influida por la edad del rodal, el método de establecimiento, el manejo de rebrotes, la preparación mecánica del terreno, la cosecha, el manejo de residuos, la cobertura vegetal y los ciclos productivos previos. Estos factores interactúan con procesos de estabilización física y química del carbono, actividad microbiana, textura, contenido de arcilla, pH y clima (Bradford *et al.*, 2013; Six *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2024). Estas condiciones hacen necesario interpretar los cambios de *stock* con cautela, particularmente cuando se trabaja con cronosecuencias operacionales y no con parcelas permanentes monitoreadas longitudinalmente.

Las pasturas y sistemas de pastoreo constituyen un referente comparativo necesario para estudios de carbono del suelo en plantaciones tropicales. Estos sistemas pueden acumular carbono mediante producción continua de biomasa radical y reciclaje de tejidos subterráneos, aunque su efecto depende de la intensidad de pastoreo, carga animal, fertilización, humedad, clima y manejo. Lai y Kumar (2020) mostraron que el pastoreo intenso puede reducir el carbono del suelo y aumentar la compactación, mientras que regímenes menos intensivos pueden favorecer el carbono superficial bajo ciertas condiciones. En Costa Rica, la comparación entre pastos y plantaciones forestales jóvenes en la Región Huetar Norte refuerza la necesidad de incorporar usos alternativos como líneas base para evaluar adicionalidad (Cortés Cortés, 2024).

Desde una perspectiva de mercados de carbono, es indispensable diferenciar entre cambio de *stock* de carbono del suelo, equivalencia potencial en CO₂e y crédito verificable. Un incremento aparente de *stock* puede expresarse contablemente como CO₂e mediante el factor estequiométrico 44/12, pero ello no implica automáticamente una remoción neta verificada ni una unidad comercializable. Para avanzar hacia esquemas robustos se requiere demostrar la línea base, adicionalidad, permanencia, control de fugas, cuantificación de incertidumbre y verificación independiente, principios consistentes con las directrices del IPCC y con marcos técnicos orientados a carbono del suelo y MRV (FAO & ITPS, 2020; IPCC, 2006 y 2019).

En Costa Rica, las plantaciones forestales han sido reconocidas como sistemas con potencial para incrementar el carbono almacenado en el ecosistema, particularmente frente a usos del suelo con mayor perturbación (FONAFIFO, 2021). No obstante, la eventual incorporación del carbono del suelo en esquemas de compensación climática requiere metodologías conservadoras,



datos locales, trazabilidad operativa y criterios de integridad ambiental. Las plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. ofrecen un caso relevante para explorar esta aproximación, debido a su importancia comercial y a su presencia en sistemas de reforestación tropical de turno corto.

Esta investigación responde a tres vacíos complementarios. Primero, existe limitada evidencia empírica sobre la variación del COS en plantaciones forestales tropicales de rápido crecimiento bajo condiciones productivas reales. Segundo, se requiere una secuencia metodológica explícita que transforme mediciones edáficas en concentración de C, *stock* de COS, tasas anuales aparentes y equivalencias climáticas potenciales. Tercero, persiste una brecha conceptual entre los cambios aparentes de *stock* y las remociones verificables que podrían sustentar futuros créditos de carbono. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la variación del *stock* de COS en plantaciones de *Gmelina arborea* de diferentes edades en Los Chiles, Costa Rica, estimar tasas anuales aparentes de cambio y proponer una ruta metodológica preliminar orientada a MRV.

La contribución del estudio es doble: empíricamente, aporta evidencia preliminar sobre el comportamiento del COS en una cronosecuencia operacional de *G. arborea*; metodológicamente, propone una ruta conservadora para diferenciar entre concentración de C, *stock* de COS, cambio aparente de *stock*, tasa anual, equivalencia potencial en CO₂e y eventual crédito verificable. El estudio no busca certificar remociones ni generar créditos comercializables, sino establecer una base técnica para avanzar desde mediciones edáficas exploratorias hacia indicadores climáticos verificables en futuros pilotos MRV.

2. Metodología

2.1 Enfoque del estudio y área de estudio

El estudio se planteó como un caso metodológico orientado a integrar datos de COS en una aproximación MRV. No se diseñó como un experimento confirmatorio ni como un sistema de certificación de remociones, sino como una evaluación de factibilidad técnica basada en una cronosecuencia operacional de plantaciones forestales. Las cronosecuencias son útiles cuando no existen mediciones repetidas; sin embargo, deben interpretarse como aproximaciones con supuestos fuertes, dado que no reemplazan el seguimiento longitudinal de las mismas parcelas (Le Noë *et al.*, 2023).

El estudio se realizó en el cantón de Los Chiles, en los distritos de San Jorge y Los Chiles, provincia de Alajuela, Costa Rica (**Figura 1**). Los terrenos pertenecen a la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica S. A. Según Ortiz (2008), el área corresponde a Bosque Húmedo Tropical Basal, con temperatura promedio anual entre 27 °C y 32 °C y precipitación promedio anual cercana a 3 500 mm. En el área predominan suelos altamente meteorizados propios de la región norte de Costa Rica, condición que debe considerarse al interpretar la dinámica del COS y la DA.



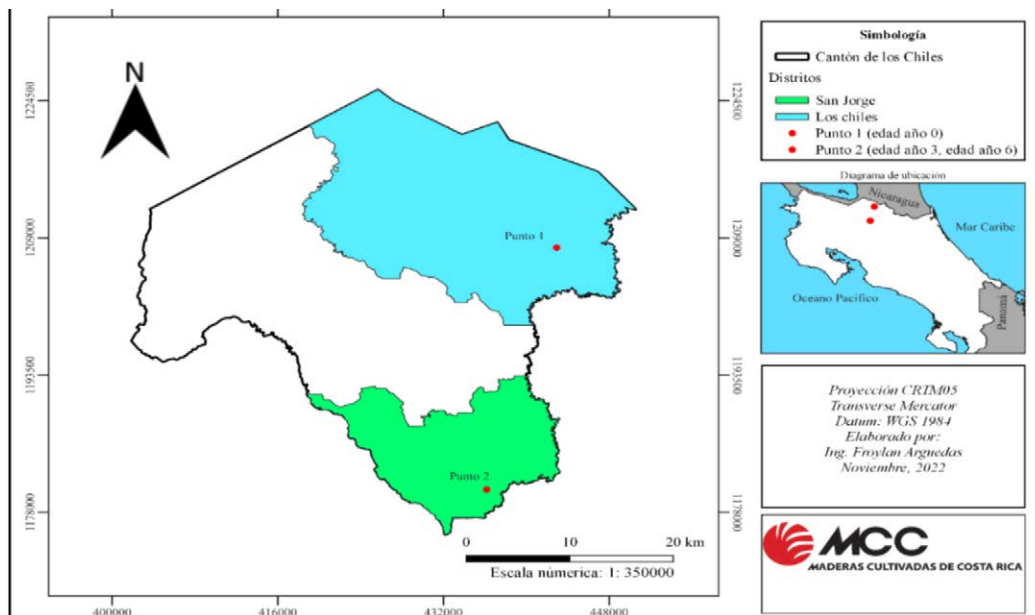


Figura 1. Ubicación geográfica de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreadas en Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.
Figure 1. Geographic location of the *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.

2.2 Diseño de muestreo y selección de sitios

Se aplicó un diseño de muestreo sistemático con selección aleatoria de la unidad inicial. Cada unidad circular tuvo un radio aproximado de 20 m, equivalente a 1 256 m² (**Figura 2**). Se establecieron tres unidades circulares de muestreo por cada condición evaluada: línea base de 0 años, plantación de 3 años, plantación de 6 años establecida mediante material vegetativo (T1) y plantación de 6 años bajo manejo de rebrotes o regeneración de tocones después de la primera cosecha (T2). En total, el diseño incluyó 12 unidades circulares de muestreo.

En cada unidad se recolectaron cinco submuestras para estimar el COS y tres muestras para determinar la DA. Las cinco submuestras destinadas al análisis de carbono se homogeneizaron para conformar una muestra compuesta por unidad circular, mientras que las muestras de DA se procesaron de forma independiente. En consecuencia, el diseño generó 12 muestras compuestas para el cálculo de COS y 36 muestras para DA. La unidad de análisis fue la unidad circular de muestreo y no cada submuestra individual. Las unidades de muestreo y las submuestras fueron georreferenciadas.

Las áreas evaluadas correspondieron a un lote de una hectárea recientemente cosechado y preparado para establecimiento (línea base, 0 años), un lote de 1.6 ha con árboles de tres años y un lote de una hectárea con árboles de seis años bajo dos condiciones de establecimiento. Todas las áreas formaban parte de un sistema comercial de reforestación con *G. arborea* bajo un paquete silvicultural estandarizado.



La propiedad tenía aproximadamente 20 años de uso forestal orientado a la reforestación comercial con melina y, al momento del estudio, los lotes evaluados se encontraban en su tercer turno productivo. La línea base correspondió a un área recientemente cosechada, desprovista de vegetación arbórea y preparada mecánicamente para el nuevo establecimiento. Este contexto operativo permite analizar el COS bajo condiciones reales de manejo forestal comercial; sin embargo, también introduce una restricción inferencial, ya que los *stocks* observados pueden reflejar tanto la edad actual del rodal como el historial acumulado de manejo, cosecha, preparación del sitio y uso forestal previo.

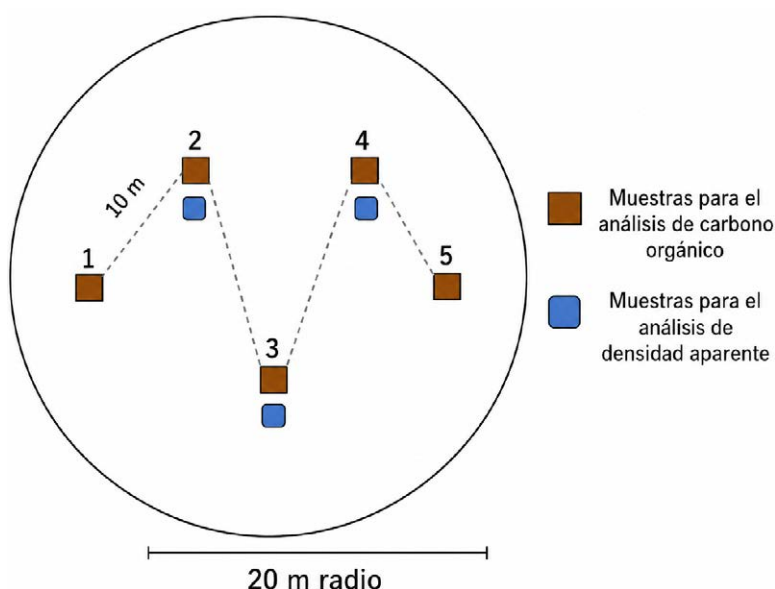


Figura 2. Diseño de parcela utilizado para la obtención de muestras de suelo.
Figure 2. Plot design used for soil sample collection.

2.3 Determinación del carbono orgánico del suelo

Las muestras para determinar la concentración de carbono del suelo se recolectaron a una profundidad de 0–30 cm, profundidad ampliamente utilizada en inventarios y marcos metodológicos para suelos minerales, aunque estudios recientes recomiendan ampliar el perfil cuando se pretende estimar cambios de *stock* total o evaluar señales en subsuelo (Don *et al.*, 2011; FAO & ITPS, 2020; IPCC, 2019). En cada unidad de muestreo se utilizó un barreno tipo holandés y se obtuvieron cinco submuestras equidistantes, separadas aproximadamente 10 m entre sí. Las submuestras fueron homogeneizadas para conformar una muestra compuesta de aproximadamente 500 g por unidad de muestreo. Las muestras se rotularon y trasladaron al Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.



En laboratorio, las muestras destinadas al análisis de carbono se secaron a 35 °C en estufa de aire forzado durante 72 h. La concentración de carbono se determinó mediante combustión seca, de acuerdo con el procedimiento analítico aplicado por el Laboratorio de Suelos y Foliaves del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica y con la lógica analítica descrita para la determinación de carbono total y orgánico por combustión seca ([International Organization for Standardization, 1995](#)).

Dado que la combustión seca cuantifica el carbono presente en la muestra, su interpretación como carbono orgánico del suelo requiere considerar la posible presencia de carbono inorgánico. En el presente estudio, los suelos evaluados corresponden a ambientes tropicales húmedos y altamente meteorizados, por lo que los valores de C se asumieron operativamente como carbono orgánico del suelo para efectos del cálculo de *stock*. No obstante, futuros estudios deberían verificar explícitamente la presencia de carbonatos o carbono inorgánico cuando las condiciones edáficas lo justifiquen.

El *stock* de carbono orgánico del suelo se calculó integrando la concentración de C (%), la DA, la profundidad de muestreo y la fracción volumétrica de fragmentos gruesos. La reserva de COS se expresó en toneladas de carbono por hectárea (t C ha⁻¹), siguiendo la estructura general propuesta en las directrices del IPCC y las recomendaciones metodológicas sobre el uso correcto de DA y fragmentos gruesos ([IPCC, 2006, 2019](#); [Poeplau et al., 2017](#)). Debido a que el muestreo se realizó a profundidad fija, futuros monitoreos deberían aplicar masa equivalente de suelo cuando existan diferencias relevantes en DA entre edades o tratamientos ([Fowler et al., 2023](#)).

2.4 DA y fragmentos gruesos

La DA se determinó mediante el método del cilindro de volumen conocido ([Blake & Hartge, 1986](#)). Se tomaron tres muestras por unidad de muestreo en el estrato superficial de 0–15 cm. El cilindro utilizado tuvo 5 cm de diámetro y 5 cm de profundidad, para un volumen aproximado de 100.14 cm³. Las muestras se secaron a 105 °C durante 24 h o hasta alcanzar peso constante.

La estimación de fragmentos gruesos se realizó mediante tamizado con malla de 2.0 mm. Cuando se identificaron fragmentos gruesos, se ajustó la masa seca correspondiente. Este procedimiento es relevante porque el uso inadecuado de DA o fragmentos gruesos puede sobreestimar las reservas de COS, especialmente en suelos con proporciones relevantes de material grueso o con cambios de estructura asociados al manejo ([Poeplau et al., 2017](#)).

La reserva de COS para cada unidad de muestreo se calculó mediante la **Ecuación 1**.

$$SOCS_{i,j,k} = SOC_{i,j,k} \times BD_{i,j,k} \times D_j \times (1 - S_{i,j,k}) \text{ (Ecuación 1)}$$



Donde:

Variable	Definición y unidad
$SOCS_{i,j,k}$	Reserva de carbono orgánico del suelo para el estrato o condición i, la profundidad j y la unidad de muestreo k. Se expresa en $Mg\ C\ ha^{-1}$ o $t\ C\ ha^{-1}$.
$SOC_{i,j,k}$	Concentración de carbono orgánico del suelo para el estrato o condición i, la profundidad j y la unidad de muestreo k. Se expresa como porcentaje o $g\ C\ 100\ g^{-1}$ de suelo seco.
$BD_{i,j,k}$	DA del suelo para el estrato o condición i, la profundidad j y la unidad de muestreo k. Se expresa en $Mg\ m^{-3}$.
D_j	Espesor de la capa de suelo evaluada. En este estudio corresponde a 30 cm.
$S_{i,j,k}$	Fracción volumétrica de fragmentos gruesos o pedregosidad mayor a 2 mm para el estrato o condición i, la profundidad j y la unidad de muestreo k. Se expresa como fracción decimal.

La **Ecuación 1** asume que la concentración de carbono se expresa como porcentaje y que la profundidad se formula en centímetros; bajo esta convención, el resultado se obtiene directamente en $Mg\ C\ ha^{-1}$, equivalente a $t\ C\ ha^{-1}$. Si la concentración de carbono se expresa como fracción decimal ($g\ C\ g^{-1}$), debe incorporarse el factor de conversión correspondiente (**Ecuación 2**).

$$SOCS_{i,j,k} = SOC_{i,j,k} \times BD_{i,j,k} \times D_j \times (1 - S_{i,j,k}) \times 100 \text{ (Ecuación 2)}$$

En la Ecuación 2, $SOC_{i,j,k}$ corresponde a la concentración de carbono expresada como fracción decimal. En este estudio se utilizó la forma basada en porcentaje de C, debido a que los resultados analíticos fueron reportados como concentración porcentual de carbono.

2.5 Procesamiento, análisis de datos y ruta de cálculo MRV

La información se procesó mediante hojas de cálculo. Para cada condición evaluada se estimaron promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación de la DA, la concentración de C y las reservas de COS, expresadas en $t\ C\ ha^{-1}$. Debido al carácter exploratorio del diseño, a la comparación por cronosecuencia operacional y al número limitado de unidades circulares independientes por edad o tratamiento, el análisis se trató como descriptivo y no inferencial. En consecuencia, los resultados se interpretan como tendencias aparentes y no como diferencias estadísticamente concluyentes entre edades o tratamientos.

El cambio acumulado aparente del *stock* de COS se calculó como la diferencia entre el *stock* promedio de la condición evaluada y el *stock* promedio de la condición de referencia, de acuerdo con la **Ecuación 3**.

$$\Delta COS_{a-b} = SOCS_b - SOCS_a \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde ΔCOS_{a-b} es el cambio acumulado aparente del *stock* de COS entre la condición inicial o de referencia a y la condición evaluada b, expresado en $t\ C\ ha^{-1}$; $SOCS_a$ es el *stock* promedio de COS de la condición de referencia; y $SOCS_b$ es el *stock* promedio de COS de la condición evaluada.



La tasa anual aparente de cambio del COS se calculó dividiendo el cambio acumulado entre la duración del periodo evaluado, según la **Ecuación 4**.

$$T_{\Delta\text{COS}} = \Delta\text{COS}_{a-b} / t \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde $T_{\Delta\text{COS}}$ es la tasa anual aparente de cambio del COS, expresada en $\text{t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y t corresponde al número de años del periodo comparado. Esta tasa representa una anualización contable derivada de la cronosecuencia operacional, no una medición longitudinal directa en las mismas unidades de muestreo.

Finalmente, la tasa anual aparente de ΔCOS se convirtió a equivalencia potencial anual en CO_2e mediante la relación estequiométrica entre la masa molecular del CO_2 y la masa atómica del C, según la **Ecuación 5**.

$$\text{CO}_2\text{e}_{\text{pot}} = T_{\Delta\text{COS}} \times (44 / 12) \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde $\text{CO}_2\text{e}_{\text{pot}}$ es la equivalencia potencial anual en CO_2e , expresada en $\text{t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; $T_{\Delta\text{COS}}$ es la tasa anual aparente de cambio del COS; 44 corresponde a la masa molecular del CO_2 ; y 12 corresponde a la masa atómica del C. Esta conversión permite expresar el incremento aparente del *stock* de COS en una unidad climática comparable, pero no constituye por sí misma una remoción verificada ni un crédito de carbono comercializable.

En términos de MRV, la secuencia de cálculo utilizada en este estudio fue: (i) estimación del *stock* de COS por unidad de muestreo; (ii) cálculo del *stock* promedio por edad o tratamiento; (iii) estimación del incremento acumulado aparente del *stock* de COS (ΔCOS); (iv) anualización del ΔCOS para obtener tasas aparentes de cambio; y (v) conversión estequiométrica a equivalencias potenciales en CO_2e . Para que estos valores puedan reconocerse como remociones verificables bajo un estándar de mercado, sería necesario validar una línea base, demostrar adicionalidad, cuantificar incertidumbre, evaluar permanencia, controlar fugas, considerar posibles emisiones no- CO_2 e implementar verificación independiente.

2.6 Tratamiento de la incertidumbre y límites de inferencia

Dado que el diseño incluyó tres unidades circulares independientes por condición evaluada, no se realizaron pruebas inferenciales ni estimaciones formales de incertidumbre asociadas con la conversión de ΔCOS a CO_2e . En consecuencia, los valores reportados se interpretan como estimaciones aparentes y preliminares. Para evitar sobreinterpretación, el análisis se restringió a estadística descriptiva, anualización contable y conversión estequiométrica.

La incertidumbre metodológica se abordó de forma cualitativa mediante la identificación de fuentes potenciales de error, incluyendo variabilidad espacial del suelo, diferencias entre sitios, uso de cronosecuencia en lugar de monitoreo longitudinal, DA, fragmentos gruesos, profundidad fija y ausencia de verificación independiente. Esta delimitación es consistente con el objetivo de construir una ruta MRV preliminar y no de certificar remociones netas. La literatura metodológica reciente advierte que los modelos y proyecciones



de COS requieren validación con series temporales independientes para aumentar su confiabilidad predictiva (Le Noë *et al.*, 2023).

Adicionalmente, debido a que este estudio estimó únicamente el componente de COS, una evaluación climática completa debería considerar posibles flujos de GEI no-CO₂, especialmente N₂O y CH₄, cuando las prácticas de manejo impliquen fertilización, residuos, humedad elevada o cambios en el manejo del nitrógeno. Esta cautela es necesaria porque aumentos de COS pueden coexistir con compensaciones o efectos contrapuestos de GEI que modifiquen el balance climático neto (Kelley *et al.*, 2024).

3. Resultados

3.1 DA y concentración de C

La DA presentó valores similares entre edades y tratamientos, con un rango de 1.07 a 1.13 Mg m⁻³ y tres unidades de muestreo por condición evaluada. El valor más bajo se registró en la línea base (0 años), mientras que el más alto correspondió al tratamiento de seis años bajo manejo de rebrote (T2) (**Cuadro 1**). Esta variación moderada sugiere condiciones relativamente estables de estructura del suelo, aunque debe interpretarse con cautela por las diferencias entre sitios, la preparación mecánica de la línea base y el número limitado de repeticiones independientes.

La concentración de C mostró una tendencia leve de aumento desde la línea base hasta las plantaciones de seis años. Los valores medios fueron 2.28 % en la línea base, 2.36 % a los tres años, 2.53 % en seis años T1 y 2.45 % en seis años T2. Aunque la tendencia es positiva, las diferencias son moderadas y no deben interpretarse como evidencia concluyente de cambios estadísticamente significativos.

La lectura conjunta de la DA y de la concentración de C indica que las categorías de edad y tratamiento presentan rangos parcialmente superpuestos. Esta superposición refuerza la necesidad de interpretar los resultados como tendencias descriptivas. La variabilidad observada, especialmente en la línea base y en el tratamiento de rebrote, es consistente con la heterogeneidad espacial esperada en suelos tropicales bajo manejo forestal operativo.

Cuadro 1. Densidad aparente, desviación estándar, coeficiente de variación y concentración de C según edad de plantación de *Gmelina arborea* en Los Chiles, Costa Rica.

Table 1. Bulk density, standard deviation, coefficient of variation, and C concentration by plantation age of *Gmelina arborea* in Los Chiles, Costa Rica.

Edad de la plantación	DA (Mg m ⁻³)	S	CV (%)	C (%)	S	CV (%)
0 años	1.07	0.0707	6.63	2.28	0.278	12.18
3 años	1.11	0.0782	7.04	2.36	0.117	4.94
6 años (T1)	1.10	0.0707	6.43	2.53	0.252	9.94
6 años (T2)	1.13	0.0500	4.41	2.45	0.173	7.06



3.2 Reservas de carbono orgánico del suelo

Las reservas promedio de COS aumentaron de 72.8 t C ha⁻¹ en la línea base a 78.7 t C ha⁻¹ en plantaciones de tres años. En las plantaciones de seis años, los valores fueron 83.2 t C ha⁻¹ para T1 y 83.4 t C ha⁻¹ para T2. En términos descriptivos, estos valores sugieren un incremento gradual del *stock* de COS con la edad de la plantación (**Cuadro 2**).

Los coeficientes de variación fueron inferiores a 12 %, lo que sugiere una dispersión moderada de los valores dentro de cada edad. Sin embargo, estos indicadores descriptivos no sustituyen pruebas inferenciales ni eliminan la incertidumbre asociada con la variabilidad espacial del suelo. La magnitud del cambio debe leerse como señal preliminar y no como prueba causal del efecto de la edad del rodal.

Cuadro 2. Stock promedio de carbono orgánico del suelo, desviación estándar y coeficiente de variación según edad de plantación de *Gmelina arborea* en Los Chiles, Costa Rica.

Table 2. Mean soil organic carbon stock, standard deviation, and coefficient of variation by plantation age of *Gmelina arborea* in Los Chiles, Costa Rica.

Edad de la plantación	COS (t C ha ⁻¹)	S	CV (%)
0 años	72.8	8.25	11.34
3 años	78.7	7.25	9.21
6 años (T1)	83.2	6.39	7.68
6 años (T2)	83.4	8.40	10.06

La variabilidad descriptiva se resume en la **Figura 3** mediante valores promedio y desviaciones estándar para DA, concentración de C y *stock* de COS. Esta representación evita tratar la cronosecuencia como una serie temporal continua y permite visualizar simultáneamente la tendencia central y la dispersión de los datos disponibles. En ausencia de un número suficiente de lotes independientes para un análisis inferencial robusto, esta presentación resulta coherente con el carácter exploratorio del estudio.

3.3 Incremento acumulado estimado del *stock* de COS

La diferencia aparente entre la línea base y las plantaciones de tres años fue de 5.9 t C ha⁻¹. Entre la línea base y las plantaciones de seis años, los incrementos aparentes fueron de 10.4 t C ha⁻¹ para T1 y de 10.6 t C ha⁻¹ para T2 (**Figura 4**). Estos valores representan diferencias acumuladas del *stock* de COS entre condiciones de una cronosecuencia operacional y no deben interpretarse como remociones netas verificadas de CO₂.

La magnitud del incremento fue mayor en las comparaciones línea base–seis años que en la comparación línea base–tres años. Las diferencias entre los tratamientos de seis años fueron reducidas, lo que sugiere *stocks* edáficos comparables entre el establecimiento mediante material vegetativo y el manejo de rebrote bajo las condiciones evaluadas. No obstante, debido al carácter exploratorio del diseño y a la ausencia de monitoreo longitudinal, estos resultados deben interpretarse como señales descriptivas y no como evidencia causal del efecto de la edad o del tratamiento.



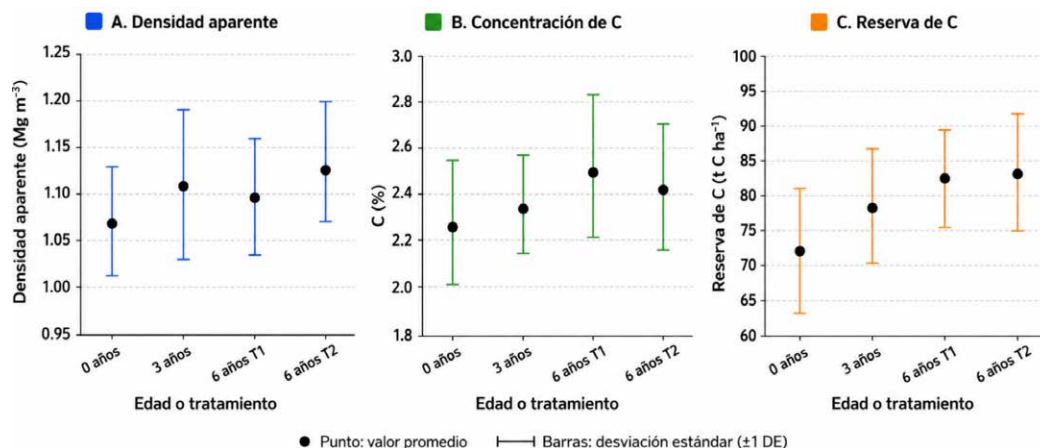


Figura 3. Variabilidad descriptiva de la densidad aparente, concentración de carbono (C) y stock de carbono orgánico del suelo (COS) a 0–30 cm según edad o tratamiento de plantación de *Gmelina arborea*. Los puntos representan valores promedio y las barras corresponden a una desviación estándar. La figura resume la dispersión observada sin asumir que la cronosecuencia corresponde a mediciones longitudinales en las mismas parcelas.

Figure 3. Descriptive variability of bulk density, carbon concentration (C), and soil organic carbon stock (SOC) at 0–30 cm depth according to plantation age or treatment in *Gmelina arborea*. Points represent mean values, and bars represent one standard deviation. The figure summarizes the observed dispersion without assuming that the chronosequence corresponds to longitudinal measurements in the same plots.

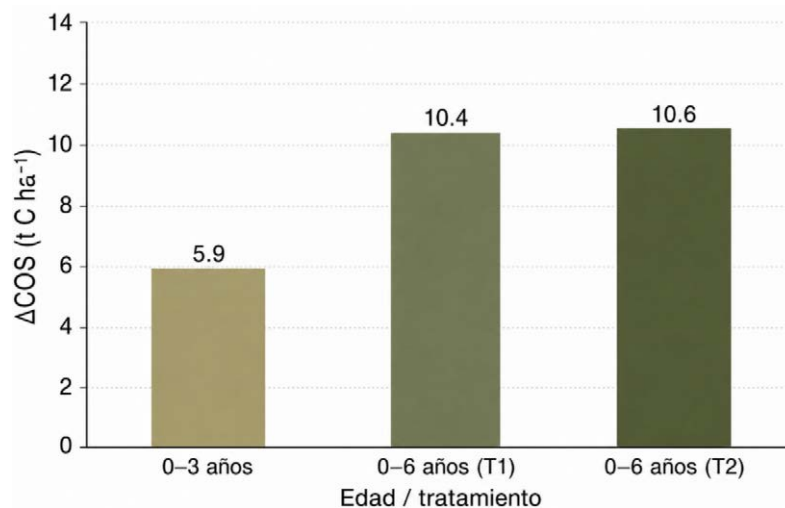


Figura 4. Incremento acumulado aparente del stock de carbono orgánico del suelo (ΔCOS , t C ha^{-1}) en plantaciones de *Gmelina arborea* con respecto a la línea base y entre condiciones de edad o tratamiento. Los valores representan diferencias aparentes de stock entre condiciones comparadas.

Figure 4. Apparent cumulative increase in soil organic carbon stock (ΔSOC , t C ha^{-1}) in *Gmelina arborea* plantations relative to the baseline and across age or treatment conditions. Values represent apparent stock differences between compared conditions and do not correspond to verified net CO_2 removals or carbon credits.



3.4 Tasas anuales aparentes y equivalencia potencial en CO₂e bajo enfoque MRV

Para facilitar la interpretación climática preliminar de los resultados, los incrementos acumulados del *stock* de COS fueron expresados como tasas anuales aparentes y posteriormente convertidos a equivalencias potenciales en CO₂e mediante la relación estequiométrica 44/12. Esta conversión no modifica la naturaleza del dato original, que corresponde a un cambio aparente de *stock* edáfico entre condiciones evaluadas, sino que permite expresar su equivalencia climática potencial en una unidad común de contabilidad de gases de efecto invernadero.

Al considerar el periodo completo entre la línea base y las plantaciones de seis años, las tasas anuales aparentes fueron de 1.73 t C ha⁻¹ año⁻¹ para T1 y de 1.77 t C ha⁻¹ año⁻¹ para T2. Estas tasas equivalen, de forma potencial y preliminar, a 6.4 y 6.5 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Para el periodo entre la línea base y las plantaciones de tres años, la tasa anual aparente fue de 1.97 t C ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a 7.2 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. En las comparaciones entre tres y seis años, las tasas fueron de 1.50 t C ha⁻¹ año⁻¹ para T1 y de 1.57 t C ha⁻¹ año⁻¹ para T2, equivalentes a 5.5 y 5.7 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (**Cuadro 3**).

Estos valores deben interpretarse como equivalencias contables preliminares y no como remociones verificadas. En sentido estricto, una remoción neta de CO₂ requiere demostrar absorción atmosférica atribuible al proyecto mediante una línea base validada, monitoreo temporal, cuantificación de incertidumbre, adicionalidad, permanencia, control de fugas y verificación independiente. Por tanto, la conversión a CO₂e es útil para orientar una aproximación MRV futura, pero no constituye por sí misma evidencia suficiente para generar créditos de carbono.

Cuadro 3. Tasas anuales aparentes del incremento acumulado del stock de COS y su equivalencia potencial en CO₂e bajo un enfoque MRV.

Table 3. Apparent annual rates of cumulative SOC stock increase and their potential CO₂e equivalence under an MRV approach.

Periodo / tratamiento	ΔCOS acumulado (t C ha ⁻¹)	Duración (años)	Tasa anual ΔCOS (t C ha ⁻¹ año ⁻¹)	CO ₂ e potencial anual (t CO ₂ e ha ⁻¹ año ⁻¹)
Línea base-3 años	5.9	3	1.97	7.2
3-6 años (T1)	4.5	3	1.50	5.5
3-6 años (T2)	4.7	3	1.57	5.7
Línea base-6 años (T1)	10.4	6	1.73	6.4
Línea base-6 años (T2)	10.6	6	1.77	6.5

4. Discusión

4.1 Tendencias de COS en plantaciones tropicales de turno corto

La tendencia ascendente observada en las reservas de COS es coherente con la hipótesis de que el establecimiento y desarrollo de plantaciones forestales puede aumentar los aportes de materia orgánica al suelo mediante raíces, hojarasca, residuos de manejo y cobertura vegetal. La acumulación de COS depende de la cantidad y calidad de los residuos orgánicos, la actividad microbiana y las condiciones edafoclimáticas locales (Bradford *et al.*, 2013; Lal, 2004; Six



et al., 2002). Sin embargo, la evidencia muestra que la respuesta del COS a la restauración o al establecimiento de árboles es altamente contextual, y que edad del rodal, contenido de arcilla y condiciones del sitio son controladores relevantes de la recuperación del carbono edáfico (Xu *et al.*, 2024).

Los valores de DA obtenidos se ubicaron dentro de rangos reportados para órdenes de suelo presentes en Costa Rica (Alvarado & Forsythe, 2005). La DA es crítica para convertir concentraciones de carbono en reservas por unidad de área; por ello, en estudios orientados a MRV debe medirse con rigurosidad y, cuando existan diferencias relevantes entre tratamientos, debe considerarse el uso de masa equivalente de suelo (Fowler *et al.*, 2023; Poeplau *et al.*, 2017).

4.2 De Δ COS a CO₂e: valor contable y límites de interpretación

La conversión de Δ COS a CO₂e tiene valor contable porque permite expresar el cambio aparente del *stock* edáfico en una unidad climática comparable con otros componentes de mitigación. Sin embargo, esta conversión no transforma automáticamente una diferencia de *stock* en una remoción verificable. La trazabilidad metodológica exige reportar primero el *stock* de COS, luego el cambio de *stock*, posteriormente la tasa anual aparente y solo después la equivalencia potencial en CO₂e. Esta secuencia reduce el riesgo de sobreinterpretación y fortalece la transparencia de futuros sistemas MRV.

En el presente estudio, las equivalencias potenciales en CO₂e deben entenderse como indicadores contables preliminares derivados de una cronosecuencia operacional. Para ser elegibles en esquemas de mercado, estos valores deberían someterse a validación longitudinal, estimación formal de incertidumbre, evaluación de adicionalidad, permanencia, riesgo de reversión y control de fugas. Además, una evaluación climática neta debería considerar posibles emisiones no-CO₂, especialmente cuando el manejo del suelo modifique flujos de N₂O o CH₄ (Kelley *et al.*, 2024).

4.3 Líneas base, adicionalidad y comparación con usos alternativos

Las pasturas constituyen un referente comparativo indispensable para la construcción de líneas base en estudios de COS, debido a su alta producción de biomasa radical y a la sensibilidad de sus *stocks* edáficos frente a la intensidad de manejo. Estos sistemas pueden acumular cantidades importantes de carbono debido a la producción continua de biomasa radical y al reciclaje de tejidos subterráneos; sin embargo, su efecto depende de intensidad de pastoreo, carga animal, fertilización, humedad, clima y manejo.

Lai y Kumar (2020) muestran que el pastoreo intenso puede reducir el COS y aumentar la compactación, mientras que regímenes más ligeros pueden favorecer el COS superficial bajo ciertas condiciones. En el contexto costarricense, la evidencia local sobre COS en pastos y plantaciones forestales jóvenes (Cortés Cortés, 2024) ofrece un punto de partida para diseñar líneas base comparativas más realistas.



No debe asumirse automáticamente que la conversión hacia plantaciones forestales aumenta el COS en todos los casos. Los metaanálisis sobre cambio de uso del suelo indican que algunas transiciones hacia plantaciones pueden reducir *stocks* de COS respecto a bosques nativos o pasturas, mientras que otras trayectorias de restauración o abandono agrícola pueden recuperar parcialmente carbono perdido (Beillouin *et al.*, 2023; Don *et al.*, 2011; Guo & Gifford, 2002). Por ello, la comparación con pasturas, áreas agrícolas y otros sistemas forestales debe incorporarse en futuros diseños para evaluar adicionalidad y definir líneas base realistas.

Las áreas evaluadas formaban parte de un sistema de reforestación comercial con manejo estandarizado y antecedentes de uso forestal. Por tanto, cualquier propuesta de créditos deberá construir un escenario contrafactual que permita distinguir entre cambios atribuibles al manejo ordinario y cambios atribuibles a prácticas adicionales. Esta distinción es esencial para evitar sobreestimaciones y garantizar integridad ambiental.

La comparación entre T1 y T2 también ofrece una hipótesis de manejo que merece evaluación posterior. El tratamiento de rebrote presentó un *stock* de COS ligeramente mayor que el tratamiento establecido con material vegetativo, aunque la diferencia fue mínima y no permite inferir un efecto causal. No obstante, los sistemas de rebrote podrían conservar parte de la estructura radical y del carbono asociado al ciclo anterior, modificando la trayectoria de COS después de la cosecha. Esta hipótesis debería evaluarse mediante parcelas permanentes, mayor replicación y mediciones repetidas en el tiempo.

4.4 Hacia una ruta MRV para carbono edáfico forestal

Los resultados de este estudio permiten proponer una ruta inicial para avanzar hacia un sistema de monitoreo, reporte y verificación del COS en plantaciones forestales (**Figura 5**). Esta ruta no convierte automáticamente los incrementos de COS en créditos de carbono, sino que organiza los pasos necesarios para transformar evidencia exploratoria en información verificable y útil para futuros mecanismos de compensación climática. Este enfoque es consistente con lineamientos internacionales que enfatizan la necesidad de datos locales, monitoreo repetido y procedimientos de QA (Quality Assurance o Aseguramiento de Calidad) y QC (Quality Control o Control de Calidad para estimar potencial de secuestro de COS (FAO & ITPS, 2020).

El primer componente consiste en establecer una línea base robusta. En este estudio, la línea base correspondió al estadio de 0 años, con un *stock* promedio de 72.8 t C ha⁻¹. Para un esquema de créditos, esta línea base debería ampliarse mediante una caracterización de unidades homogéneas de paisaje, tipo de suelo, historia de uso, manejo previo y variabilidad espacial, incorporando múltiples lotes o fincas por condición de manejo.

El segundo componente corresponde a la estandarización del muestreo y del análisis de laboratorio. Un protocolo MRV debe definir profundidad de muestreo, número de submuestras, frecuencia de monitoreo, determinación de DA, tratamiento de fragmentos gruesos, método analítico para carbono, control de calidad de laboratorio y resguardo de datos georreferenciados. La literatura recomienda priorizar *stocks* y tasas anualizadas frente a concentraciones aisladas, así como evaluar masa equivalente cuando la DA cambia entre tratamientos (Fowler *et al.*, 2023; Poeplau *et al.*, 2017).



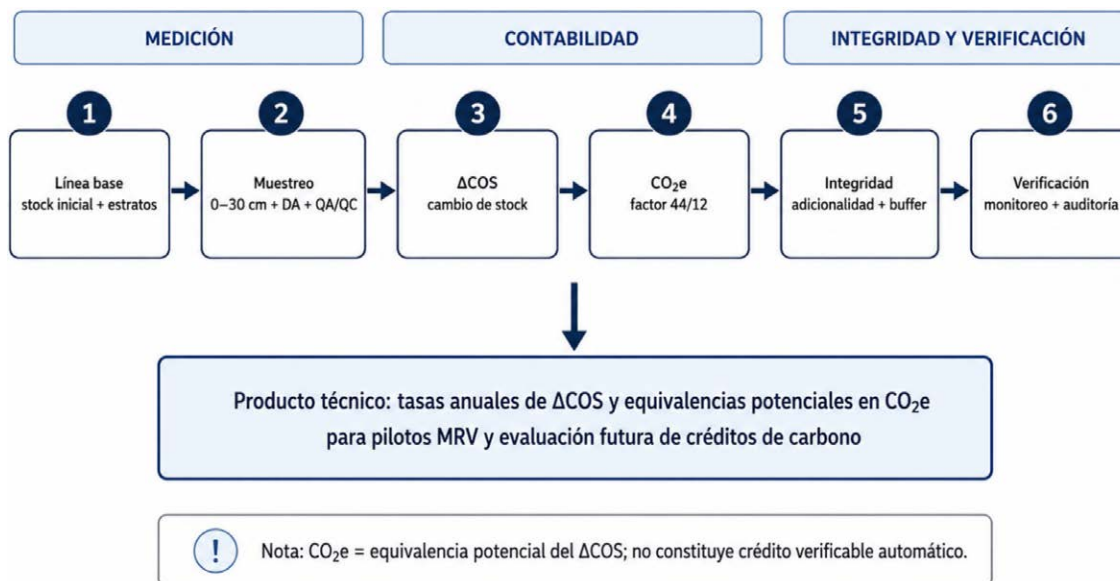


Figura 5. Ruta metodológica MRV para carbono orgánico del suelo en plantaciones forestales. Se sintetiza el tránsito desde la medición del *stock* inicial de COS hasta la generación de información verificable para futuros esquemas de créditos de carbono. La ruta distingue tres fases: medición, contabilidad e integridad/verificación.

Figure 5. MRV methodological pathway for soil organic carbon in forest plantations. The figure synthesizes the transition from the measurement of initial SOC stock to the generation of verifiable information for future carbon credit schemes. The pathway distinguishes three phases: measurement, accounting, and integrity/verification.

El tercer componente es el cálculo del cambio de *stock* de COS. El cambio debe reportarse primero como ΔCOS en t C ha⁻¹ y luego como tasa anual aparente en t C ha⁻¹ año⁻¹. Solo después de esta etapa puede convertirse a CO₂e mediante el factor 44/12. Esta secuencia mantiene la trazabilidad entre el dato edáfico original y su equivalencia climática.

El cuarto componente es la integridad ambiental: adicionalidad, permanencia, control de fugas e incertidumbre. En plantaciones ya establecidas o manejadas bajo buenas prácticas, puede ser difícil demostrar que el incremento de COS no habría ocurrido en ausencia del incentivo de carbono. Por ello, futuros esquemas deberían diferenciar entre pago por incremento adicional de COS, pago por conservación de *stocks* altos y pago por implementación verificable de prácticas de manejo sostenible.

Finalmente, la ruta debe culminar en mecanismos de reporte y verificación independiente. Esto implica protocolos auditables, bases de datos georreferenciadas, laboratorios con control de calidad, criterios de elegibilidad para productores y reportes periódicos. Antes de avanzar hacia créditos elegibles en mercados, será necesario validar la metodología mediante proyectos piloto con mayor número de repeticiones, seguimiento multianual y comparación con otros usos del suelo. Cuando se utilicen modelos o proyecciones, estos deberán validarse con series temporales independientes para evitar un exceso de sobreconfianza en estimaciones no observadas (Le Noë *et al.*, 2023).



4.5 Limitaciones y agenda de investigación

La principal limitación del estudio fue el bajo número de unidades independientes por edad o tratamiento. Esta condición reduce la capacidad para separar el efecto de la edad del rodal de otros factores asociados con la variabilidad espacial del suelo, como textura, drenaje, relieve, historia de uso y micrositio. Otra limitación relevante es que la comparación se realizó entre sitios de diferente edad en un momento determinado, y no mediante mediciones repetidas en las mismas parcelas a lo largo del tiempo.

Estas limitaciones no invalidan el estudio, pero delimitan su alcance. Los resultados son útiles como evidencia preliminar, como base para formular hipótesis y como insumo para diseñar investigaciones orientadas a MRV. Sin embargo, no deben utilizarse de manera directa para emitir créditos de carbono sin validación adicional, estimación formal de incertidumbre, línea base robusta, demostración de adicionalidad y verificación independiente.

La agenda de investigación debería priorizar parcelas permanentes, mayor número de lotes independientes, comparación con pasturas y otros usos del suelo, estimación formal de incertidumbre, uso de masa equivalente cuando corresponda y evaluación de prácticas de manejo que puedan considerarse adicionales. También se requiere registrar explícitamente operaciones de cosecha, arrastre, subsolado, preparación del terreno, manejo de residuos, control de arvenses y mantenimiento de cobertura vegetal, debido a que estas variables pueden modificar la DA, el COS y la interpretación de la adicionalidad.

5. Conclusiones

Las plantaciones de *Gmelina arborea* evaluadas mostraron una tendencia descriptiva de incremento del stock de COS entre la línea base y las plantaciones de seis años. El stock promedio pasó de 72.8 t C ha⁻¹ en la línea base a 83.2–83.4 t C ha⁻¹ en las plantaciones de seis años, lo que sugiere una señal preliminar de acumulación edáfica bajo las condiciones de manejo analizadas. No obstante, debido al carácter exploratorio del diseño, la comparación por cronosecuencia y el número limitado de unidades independientes, estos resultados deben interpretarse como cambios aparentes de stock y no como evidencia causal concluyente del efecto de la edad del rodal.

Los incrementos acumulados observados fueron de 5.9 t C ha⁻¹ entre la línea base y las plantaciones de tres años, y de 10.4–10.6 t C ha⁻¹ entre la línea base y las plantaciones de seis años. Su anualización permitió estimar tasas aparentes de cambio y expresar su equivalencia potencial en CO₂e mediante el factor 44/12. Sin embargo, estas equivalencias tienen valor contable preliminar y no constituyen remociones verificadas ni créditos de carbono, dado que aún no incorporan validación de línea base, adicionalidad, permanencia, fugas, incertidumbre ni verificación independiente.

La principal contribución del estudio no radica en demostrar créditos de carbono en suelos forestales, sino en proponer una ruta metodológica conservadora para transformar mediciones exploratorias de COS en indicadores compatibles con MRV. Esta ruta permite diferenciar con mayor claridad entre concentración de C, stock de COS, cambio aparente de stock, tasa anual, equivalencia potencial en CO₂e y eventual crédito verificable.



El caso de estudio evidencia que la incorporación del COS en esquemas de mitigación forestal debe avanzar mediante pilotos metodológicamente robustos, con parcelas permanentes, mayor replicación espacial, comparación con usos alternativos del suelo y trazabilidad del manejo. Solo bajo estas condiciones será posible evaluar si los cambios observados pueden traducirse en beneficios climáticos verificables y ambientalmente íntegros.

6. Implicaciones para futuros pilotos MRV

Los futuros pilotos orientados al COS en plantaciones forestales deberían priorizar diseños longitudinales basados en parcelas permanentes, con mayor número de lotes independientes por edad, tratamiento y condición edáfica. Esta ampliación permitiría separar con mayor solidez el efecto de la edad del rodal, el manejo, la historia de uso y la variabilidad espacial del suelo.

La construcción de líneas base debe realizarse mediante estratificación por tipo de suelo, unidad de paisaje, historia de uso, manejo previo y comparación con usos alternativos, especialmente pasturas, áreas agrícolas y otros sistemas forestales. Esta comparación es indispensable para evaluar adicionalidad y evitar atribuir al proyecto cambios que podrían responder al manejo ordinario o a la trayectoria previa del sitio.

Desde el punto de vista metodológico, los futuros esquemas MRV deben reportar separadamente tres niveles de información: *stock* de COS, cambio de *stock* o Δ COS y equivalencia potencial en CO₂e. Esta distinción debe complementarse con estimación de incertidumbre, uso de masa equivalente cuando existan cambios relevantes en DA, control de calidad analítico, resguardo de datos georreferenciados y verificación independiente.

Finalmente, una evaluación climática integral debería considerar posibles flujos de GEI no CO₂, especialmente N₂O y CH₄, cuando las prácticas de manejo involucren fertilización, residuos, humedad elevada o cambios en el manejo del nitrógeno. La integración de estas variables permitirá evitar sobreestimaciones del beneficio climático neto y fortalecer la integridad ambiental de futuros esquemas de carbono edáfico.

7. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que el estudio se desarrolló conforme a los principios éticos aplicables a la investigación científica y al uso responsable de información de campo. Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A. facilitó el acceso a las plantaciones y brindó apoyo logístico para el levantamiento de información; además, una persona autora tiene afiliación laboral con dicha empresa. Este vínculo se declara de forma explícita por transparencia y no condicionó el procesamiento, análisis ni interpretación de los resultados. El apoyo económico para los análisis de laboratorio fue proporcionado por el proyecto *Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture* (SCALA) de la FAO. Las personas autoras declaran que no existen conflictos de intereses adicionales que comprometan la interpretación científica del manuscrito.



8. Agradecimientos

Se agradece a Maderas Cultivadas de Costa Rica S. A. por facilitar el acceso a sus plantaciones y brindar apoyo logístico para el desarrollo del trabajo de campo. Se agradece también a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, específicamente al proyecto Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture (SCALA), por el apoyo económico para los análisis de laboratorio.

9. Referencias

- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43629109.pdf>
- 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, 3700. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39338-z>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 363–375). American Society of Agronomy.
- Bradford, M. A., Keiser, A. D., Davies, C. A., Mersmann, C. A., & Strickland, M. S. (2013). Empirical evidence that soil carbon formation from plant inputs is positively related to microbial growth. *Biogeochemistry*, 113, 271–281. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9822-0>
- Cortés Cortés, M. (2024). *Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo cobertura de pastos y plantaciones forestales jóvenes de Tectona grandis L. F. y Gmelina arborea Roxb. en la Región Huetar Norte, Costa Rica* [Tesis de licenciatura] Universidad Nacional. <https://repositorio.una.ac.cr/bitstreams/e5ebe6d8-5230-4651-8084-e0a72b46fe44/download>
- Don, A., Schumacher, J. y Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Dynarski, K. A., Bossio, D. A. y Scow, K. M. (2020). Dynamic stability of soil carbon: Reassessing the permanence of soil carbon sequestration. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 514701. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.514701>
- FAO & ITPS. (2020). Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/a525f0c0-0c56-4311-a521-8e97640d255d/download>



- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). (2021). Proyectos Unidades Nacionales de Compensación de Emisiones de Gases Efecto Invernadero para el Mercado Doméstico de Carbono. Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales. <https://www.fonafifo.go.cr/media/3131/documento-1-general-proyectos-2021.pdf>
- Fowler, A. F., Basso, B., Millar, N. y Brinton, W. F. (2023). A simple soil mass correction for a more accurate determination of soil carbon stock changes. *Scientific Reports*, 13, 2242. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29289-2>
- Guo, L. B. y Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 8(4), 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC. (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>
- International Organization for Standardization. (1995). ISO 10694:1995 Soil quality — Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). ISO.
- Kelley, L. A., Zhang, Z., Tamagno, S., Lundy, M. E., Mitchell, J. P., Gaudin, A. C. M. y Pittelkow, C. M. (2024). Changes in soil N₂O emissions and nitrogen use efficiency following long-term soil carbon storage: Evidence from a mesocosm experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 367, 109054. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109054>
- Lai, L., & Kumar, S. (2020). A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties. *PLOS ONE*, 15(8), e0236638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236638>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Le Noë, J., Manzoni, S., Abramoff, R. Z., Bölscher, T., Bruni, E., Cardinael, R., Ciais, P., Chenu, C., Clivot, H., Derrien, D., Garnier, P., Goll, D., Lashermes, G., Martin, M., Rasse, D. P., Rees, F., Sainte-Marie, J., Salmon, E., Schiedung, M., ... Barré, P. (2023). Soil organic carbon models need independent time-series validation for reliable prediction. *Communications Earth & Environment*, 4, 158. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00830-5>
- Ortiz, E. (2008). Atlas digital de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P. y Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>





- Poeplau, C., Vos, C., & Don, A. (2017). Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *SOIL*, 3(1), 61–66. <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>
- Six, J., Conant, R. T. y Paul, E. A. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Xu, S., Chen, H. Y. H., Zhao, Y. y Wang, J. (2024). Drivers of soil organic carbon recovery under forest restoration: A global meta-analysis. *Carbon Research*, 3, 54. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00165-6>

