

Potencial de remociones de carbono en suelos de plantaciones forestales de *Gmelina arborea*, Costa Rica

Carbon removal potential in *Gmelina arborea* forest plantation soils, Costa Rica

Froylan Arguedas García¹, Víctor Meza Picado², Edwin Esquivel Segura³, German Oando Vargas⁴, Diego Barrantes Salas⁵, Arturo Ureña Sanchez⁶

Resumen

[Introducción]: Las plantaciones forestales se consideran sumideros de carbono esenciales para estabilizar los gases de efecto invernadero, destacando su importancia para mitigar el cambio climático, no obstante, existe cierta incertidumbre en relación con el carbono orgánico del suelo presente en estos ecosistemas. **[Objetivo]:** Este estudio busca analizar la acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) en plantaciones de *Gmelina arborea* a diferentes edades, evaluando su potencial para generar créditos de carbono. **[Metodología]:** Se realizó una cuantificación del carbono orgánico del suelo en plantaciones forestales de turno reducido establecidas con *G. arborea*, abarcando muestreos para sitios con edades de 0, 3 y 6 años. **[Resultados]:** Estos muestran un aumento en el COS con la edad de la plantación, pasando de 72.8 t C ha⁻¹ en la línea base a 83.4 t C ha⁻¹ en el turno de corta (6 años), lo que coincide con estudios previos que evidencian la adicionalidad del carbono en suelos forestales con el paso del tiempo. Este incremento subraya el impacto positivo que tiene el manejo forestal y la edad de las plantaciones en la captura de carbono. **[Conclusiones]:** El carbono orgánico del suelo se presenta como un recurso clave en la captura de CO₂ atmosférico, y su adecuado manejo puede generar créditos de carbono que incentiven prácticas de manejo sostenible. El manejo adecuado de las plantaciones de *G. arborea* en Costa Rica es una estrategia viable para fortalecer los sumideros de carbono y contribuir a los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

Palabras claves: adicionalidad; cambio climático; carbono orgánico; manejo forestal; sumidero.

Abstract

[Introduction]: Forest plantations are considered essential carbon sinks for stabilizing greenhouse gases, highlighting their importance in mitigating climate change. However, some uncertainty remains regarding soil organic carbon (SOC) dynamics in these ecosystems. **[Objective]:** This study aims to analyze soil organic carbon accumulation in *Gmelina arborea* plantations at different ages, evaluating their potential for generating carbon credits. **[Methodology]:** SOC quantification

¹ ingeniero forestal, estudiante de licenciatura de la UNA, Alajuela, Costa Rica. froylanarguedasgarcia@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0363-2192>

² docente e investigador del Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. victor.meza.picado@una.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0002-8223-4761>

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 cultivas de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica; ldbarrantes@maderascultivadas.com, <https://doi.org/0009-0005-0443-5663>

⁶ ingeniero forestal, Coordinador Técnico - Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture (SCALA) FAO, Geiner.UrenaSanchez@fao.org, <https://doi.org/10.5281/zenodo.14968730>

was conducted in short-rotation forest plantations of *G. arborea*, with soil sampling at sites aged 0, 3, and 6 years. [Results]: The findings indicate an increase in SOC with plantation age, rising from 72.8 t C ha⁻¹ at baseline to 83.4 t C ha⁻¹ at the final harvest (6 years). These results align with previous studies demonstrating the additionality of soil carbon in forest plantations over time. This increase underscores the positive impact of forest management and plantation age on carbon sequestration. [Conclusions]: Soil organic carbon is a key resource in atmospheric CO₂ capture, and its proper management can generate carbon credits that promote sustainable land-use practices. Properly managed *G. arborea* plantations in Costa Rica represent a viable strategy to enhance soil carbon sinks and contribute to climate change mitigation efforts.

Keywords: additionality; climate change; soil organic carbon; forest management; carbon sink.

1. Introducción

Actualmente, el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) producido por las actividades humanas constituye una gran amenaza al bienestar de la tierra y de los seres vivos (Alley *et al.*, 2018). Ante esta amenaza, a nivel mundial se han realizado importantes iniciativas para reducir las emisiones de GEI, entre ellas se encuentran la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) realizada en 1992, el Protocolo de Kioto (PK) adoptado en 1997 pero que entró en vigencia hasta el año 2005, instrumento que impulsó a los gobiernos que lo ratificaron a adoptar políticas para reducir los GEI y en la actualidad, el Acuerdo de París, instrumento que entró en vigor el 4 de noviembre del 2016 y que sustituyó al PK una vez que finalizó su segundo período (UNFCCC, 2022).

Además de los gobiernos, Amador (2017) menciona que otros actores voluntariamente se han comprometido a reducir sus emisiones de GEI, con la finalidad de reducir la huella de carbono de emisiones individuales, de las empresas, de acontecimientos e incluso de productos de gran consumo. De esta forma, que estas iniciativas han dado pie a la necesidad de compensar emisiones por medio de la compra de créditos de carbono, lo cual ha dado apertura al mercado regulado y voluntario de créditos de carbono. Dicho mercado actúa como un sistema de comercio en el cual se demandan y ofertan emisiones de GEI reducidas o secuestradas mediante proyectos, y las cuales son compensadas monetariamente por un demandante que decide neutralizar una parte o la totalidad de sus emisiones.

Por su parte, según Samayoa (2011) los proyectos basados en el secuestro de carbono se fundamentan en gran medida en proyectos forestales, específicamente proyectos de reforestación y forestación (A/R). Esta situación se da porque los árboles se consideran sumideros esenciales en el ciclo de carbono de la tierra, dado que almacenan CO₂ en troncos, ramas y hojas a través del proceso de fotosíntesis, sin dejar de lado que la descomposición de los materiales orgánicos de los árboles aumenta la proporción de carbono almacenando en el suelo (Prado, 2015). En este sentido, FONAFIFO (2021) sugiere que el establecimiento de plantaciones forestales influye en la cantidad de carbono almacenado en el ecosistema, de manera que tiende a ser mejor que el existente en otros usos del suelo como ganadería y cultivos. Por consiguiente, las plantaciones forestales se consideran reservorios de carbono primordiales para la mitigación de GEI, ya que logran secuestrar carbono en la biomasa y suelo, y por estas facultades estos proyectos pueden inscribirse dentro de los mecanismos para la generación de créditos de carbono (Chenost *et al.*, 2021).

En la mayoría de los proyectos forestales no se contabilizan ni se comercializan los cambios positivos del carbono en el suelo (Samayoa, 2011). Debido a que “los cambios del carbono del

suelo generalmente ocurren lentamente y a menudo es difícil medir pequeños cambios en un contexto relativamente grande de carbono del suelo” (DPIRD, 2022); así como a la incertidumbre que se ha generado para estimar estos cambios (Dynarski *et al.*, 2020). Esto, según Chenost *et al.*, (2011) reduce la diversificación de ingresos y que los créditos de carbono puedan actuar como un incentivo para las inversiones esenciales de los proyectos forestales. En este contexto, en Costa Rica, los créditos de carbono que actualmente se pueden generar a partir de las plantaciones forestales consideran solamente el carbono almacenado en la biomasa viva (área y subterránea), lo cual deja de lado el depósito de carbono del suelo de las plantaciones forestales a pesar de que la normativa lo permite (FONAFIFO, 2021).

No obstante, es necesario recordar que el carbono orgánico en el suelo desempeña un papel fundamental en la estabilidad de los ecosistemas y en la mitigación del cambio climático, ya que actúa como un sumidero natural de CO₂ atmosférico (Lal, 2004; Paustian *et al.*, 2016). La capacidad de almacenamiento de carbono en los suelos, según Bradford *et al.*, (2013) depende de múltiples factores, incluyendo el tipo de vegetación, el manejo del suelo y las condiciones climáticas; siguiendo esta línea las plantaciones forestales han demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la calidad del suelo y aumentar su capacidad de secuestro de carbono (Post & Kwon, 2000; Nair *et al.*, 2009).

En consecuencia, es necesario aprovechar el potencial de la generación de créditos de carbono en el suelo, lo que requiere la atención necesaria para la identificación de las barreras que han limitado la generación de créditos aptos para la comercialización o para la reducción de GEI. Esto debido a que las empresas que buscan la certificación carbono neutro a través del Programa País Carbono Neutralidad de Costa Rica (PPCN) requieren reducir y/o compensar las emisiones (DCC, 2022). De esta manera, con el reconocimiento de las remociones del carbono en el suelo, se podrían utilizar para contribuir a demostrar la carbono neutralidad, sin dejar de lado que el PPCN reconoce como un mecanismo de compensación a las Unidades Costarricenses de Compensación (UCC) del FONAFIFO (Rona, 2019); por lo tanto la apertura de los créditos de carbono en suelos forestales permitiría aumentar las UCC disponibles y por ende contribuir al objetivo de carbono neutralidad del país.

Adicionalmente, “el carbono orgánico del suelo (COS) está ganando relevancia en el ámbito internacional y la gestión sostenible de los suelos está siendo reconocida como una solución viable para secuestrar carbono atmosférico y otros GEI” (FAO, 2022). Al respecto, se han desarrollado iniciativas para preservar y aumentar el COS en actividades agrícolas; por lo tanto, la FAO ha creado el programa RECSOIL como un instrumento para emplear el manejo sostenible del suelo (MSS) con énfasis en el COS en suelos agrícolas, a través de la generación de créditos voluntarios de carbono del suelo. De esta forma, la recarbonización de los suelos forestales también debería formar parte de estos programas y por ende debe atenderse con brevedad.

Finalmente, el objetivo de este estudio fue estimar el carbono fijado en el suelo de plantaciones de *Gmelina arborea* a diferentes edades, así como proyectar los posibles cambios en el tiempo. Esta situación tiene como propósito generar insumos científicos para que la comercialización de créditos de carbono sea una realidad y contribuir al diseño de estrategias de manejo forestal sostenibles. La información generada permitirá mejorar la comprensión del papel de estas plantaciones forestales en la conservación de los suelos y la mitigación del cambio climático, con un énfasis principal en *G. arborea* ya que en el caso particular de Costa Rica constituye la segunda especie más plantada y la que cuenta con más volumen de madera autorizado en el año 2024 (Sistema de Información

de los Recursos Forestales de Costa Rica [SIREFOR], 2025; Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica [INEC], 2024).

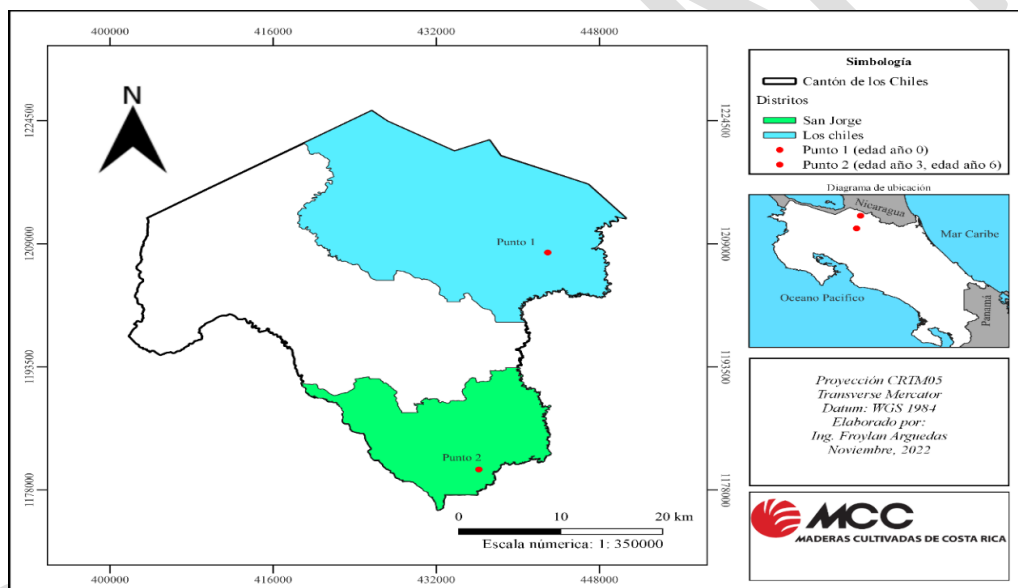
2. Metodología

2.1 Área de estudio

La investigación se realizó en el cantón de Los Chiles, específicamente en los distritos de San Jorge y Los Chiles (**Figura 1**). Los terrenos pertenecen a la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A. Según el Atlas digital de Costa Rica Ortiz (2008), el sitio corresponde un Bosque Húmedo Tropical Basal, posee una temperatura promedio anual que varía entre 27 °C y 32 °C y una precipitación promedio anual de 3 500 mm, en relación con los suelos predomina el orden de los Ultisoles y Entisoles.

Figura 1. Ubicación geográfica de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica.

Figure 1. Geographic location of *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.

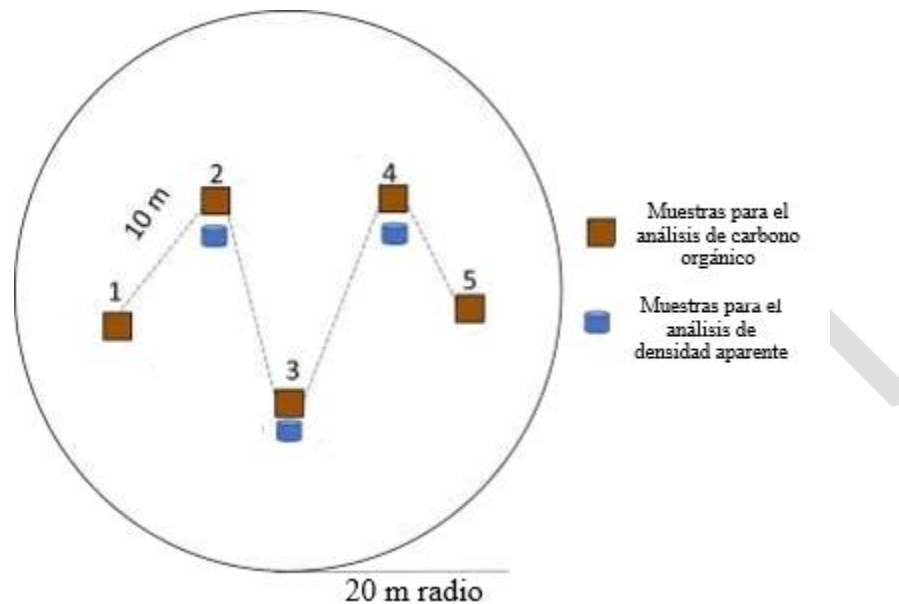


2.2 Diseño de muestreo

En cuanto al diseño, se realizó un muestreo sistemático, de modo que la unidad de muestreo inicial fue seleccionada de manera aleatoria. A partir de esta selección se identificaron sistemáticamente las demás unidades de muestreo y se realizaron unidades de muestreo circulares con un radio aproximado de 20 m, es decir de 1.256 m². Cabe mencionar que, en cada unidad de muestreo, se extrajeron 8 muestras de suelo, de manera que 5 muestras fueron utilizadas para la estimación carbono orgánico total del suelo y 3 muestras para estimar la densidad aparente (**Figura 2**).

Figura 2. Diseño de la parcela utilizada para obtener las muestras de suelos.

Figure 2. Design of the plot used to obtain soil samples



El muestreo se realizó en suelos de plantaciones establecidas con la especie *G. arborea*, con edades de 0, 3 y 6 años, para la edad de 6 años se muestrearon plantaciones con dos tratamientos, estos tratamientos consistieron en muestrear plantaciones establecidas a través de la utilización de material vegetativo (T1) y el otro tratamiento en plantaciones establecidas por medio del manejo de rebrotes o regeneración natural de los tocones de *G. arborea* después de la primera cosecha (T2). Se establecieron 3 unidades de muestreo y se muestreo 1 hectárea en las plantaciones con una edad de 6 años con manejo de rebrote y sin manejo de rebrote (T1 y T2), 1.6 hectáreas en las plantaciones con una edad 3 años y 3 hectáreas en los suelos de edad de 0 años o línea base; cabe mencionar que las 4 plantaciones analizadas poseen un mismo manejo silvicultural, la empresa cuenta con un paquete silvicultural estandarizado que aplican en todas las plantaciones, además que el año 0 o línea base son terrenos desprovistos de vegetación, en los cuales ya se realizaron los trabajos de mecanización correspondientes para iniciar la siembra de los árboles de *G. arborea*. Es importante indicar que en estos sitios el tipo de uso del suelo desde hace 20 años es dirigido a la reforestación comercial de la especie, para todas las edades evaluadas este era el tercer turno. La intensidad de muestreo fue de 37 %, 23 % y 12 % en las plantaciones con una edad de 6, 3 y 0 años respectivamente, adicionalmente se georreferenciaron las parcelas y las submuestras de estas.

2.3 Análisis químicos

Para los análisis químicos del suelo, se extrajeron muestras a una profundidad de 0-30 cm. La muestra se extrajo por medio de la utilización de un cilindro metálico con volumen conocido, en este caso con ayuda de un barreno, seguidamente las cinco muestras colectadas se mezclaron de manera homogénea en un mismo recipiente, con la finalidad de obtener para cada unidad de muestreo una muestra representativa relativa a 500 g; posteriormente esta fue depositada en una bolsa de plástico para ser llevada al Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones

Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR) donde se realizaron los análisis. Adicionalmente, en el análisis químico para estimar el carbono orgánico del suelo, se secaron las muestras en una estufa a 35 °C hasta alcanzar un peso constante, seguidamente se realizó el método de combustión seca para determinar el porcentaje de carbono total de cada muestra. Finalmente, la cuantificación de carbono del suelo se realizó por medio de la **Ecuación 1** propuesta por el (IPCC, 2006), es relevante indicar que esta fórmula es ampliamente utilizada en los estándares que generan créditos de carbono, la fórmula del IPCC se presenta a continuación:

La reserva de COS depende de: concentración de carbono orgánico (CO), densidad aparente (BD) y pedregosidad (S), se calculará según profundidad (Poeplau et al., 2017). La reserva de COS se calcula según la ecuación (1) (IPCC, 2016):

$$SOCS_{ijk} = SOC_{ijk} \times BD_{ijk} \times D(1 - S_{ijk}) \quad (E.1)$$

Donde:

$SOCS_{ijk}$ es la reserva de COS para cada estrato “i” y profundidad de suelo “j”, y la observación o muestra pareada “k”.

SOC_{ij} es el porcentaje de concentración de carbono orgánico en el suelo ($g\ 100g^{-1}$) para cada estrato “i” y profundidad de suelo “j”, y la observación o muestra pareada “k”.

BD es la densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) para cada estrato “i” y profundidad de suelo “j”, y la observación o muestra pareada “k”.

D : es el espesor de la capa (30 cm), y S es la proporción de la fracción volumétrica de pedregosidad ($g\ g^{-1}$) para cada estrato “i” y profundidad de suelo “j”, y la observación o muestra pareada “k”.

2.4 Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente, se realizó por medio del método del “cilindro de volumen conocido”, haciendo uso de un cilindro metálico de 5 cm de diámetro y 5 cm de profundidad, con un volumen de 100 ml (Penman *et al.*, 2018). El cilindro se introdujo en el suelo de manera vertical a una profundidad de 0-15 cm, posteriormente cada muestra fue extraída y depositada en una bolsa independiente representativa a cada una de las submuestras de cada parcela, de manera que se obtuvieron 3 muestras por parcela, seguidamente estas se llevaron al laboratorio del CIA para que las muestras de suelo se sequen en un horno a 105 °C por 24 horas y finalmente, se proceda a pesar cada muestra obteniendo así el peso seco en gramos.

La densidad aparente del suelo se estimó mediante la **Ecuación 2** de la siguiente manera:

$$Da = Ms/Vc \quad (E. 2)$$

Donde:

Da : densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$)

Ms : masa del suelo seco (g)

Vc : volumen del cilindro (cm^3)

2.5 Fragmentos gruesos

La estimación de los fragmentos gruesos se llevó a cabo por medio de la utilización de un tamiz de 2.0 mm (mesh ASTM N° 10). De esta forma, las muestras se tamizaron al momento de realizar el análisis de textura. En este sentido, al material que no pasó el tamiz, es decir que se ubique sobre el tamiz, se le determinó el volumen porcentual de fragmentos gruesos presentes.

2.6 Procesamiento y análisis de los resultados

El procesamiento de la información se realizó por medio del programa estadístico Excel, en el cual se recopiló la información de los componentes necesarios que fueron medidos para estimar el contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo expresado en toneladas de carbono por hectárea ($t\ COS\ ha^{-1}$) de cada una de las parcelas, según la edad de la plantación. Posteriormente, se procedió a cuantificar las $t\ COS\ ha^{-1}$, luego se estimaron los cambios en el carbono fijado (remociones) de las plantaciones antes de su establecimiento, denominado año 0 o línea base hasta las plantaciones al año 6 según tratamiento y la relación del carbono del suelo con los indicadores obtenidos de los análisis químicos y de densidad aparente. Posteriormente, se realizaron gráficos y cuadros para una comprensión más adecuada de la información presentada.

3. Resultados

3.1 Densidad aparente ($D\ Mg\ m^{-3}$) y porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS%)

a) Densidad aparente ($D\ Mg\ m^{-3}$)

En total, se recolectaron 27 muestras de suelo para determinar la densidad aparente en las distintas edades de las plantaciones forestales de *G. arborea* muestreadas, según se muestra en el **Cuadro 1**. Existe una variación de 1.07 a $1.13\ Mg\ m^{-3}$, siendo el sitio de año 0 o línea base el que posee una menor densidad aparente con un valor de $1.07\ Mg\ m^{-3}$, mientras que las plantaciones con una edad de 3 años presentan $1.11\ Mg\ m^{-3}$ y las plantaciones al año 6 con el tratamiento 1 (T1) presentaron un $1.10\ Mg\ m^{-3}$, y el año 6 con tratamiento 2 (T2) un valor de $1.13\ Mg\ m^{-3}$.

Por su parte, la densidad aparente muestra un ligero aumento a medida que la plantación envejece, pasando de $1.07\ Mg\ m^{-3}$ en el año 0 a $1.13\ Mg\ m^{-3}$ para el T2 (6 años). La densidad aparente puede ser afectada por factores como la cantidad de materia orgánica y la actividad microbiana, ya que una mayor cantidad de materia orgánica generalmente reduce la densidad al mejorar la estructura del suelo. En general, los valores de densidad aparente son similares entre las plantaciones de 0, 3 y 6 años, sugiriendo una estabilidad en la estructura del suelo.

b) Porcentaje del Contenido de carbono orgánico en suelos (COS%)

El COS en el suelo fluctúa en función de la edad de la plantación y el tratamiento. El valor más bajo de COS se observa a los 0 años con un 2.28 %. Sin embargo, este valor crece en los primeros tres años (0 a 3 años). En los tratamientos de 6 años (T1 y T2), el COS sigue una tendencia variable. El tratamiento T1 muestra un COS de 2.53 %, que es más alto que el de los primeros tres años, sugiriendo que el crecimiento de los árboles y las prácticas del establecimiento (a través de material vegetativo) podría estar favoreciendo el secuestro de carbono. En cuanto a, el tratamiento T2, este muestra un valor menor de 2.45 %, lo que podría reflejar diferencias en el tipo del establecimiento (a través del manejo de la regeneración de rebrotes) o en las condiciones específicas de ese tratamiento, como la disponibilidad de nutrientes o la competencia entre plantas. Es relevante observar que, en general, los valores de COS están por encima del 2 %, que es un indicador positivo del secuestro de carbono en el suelo, un factor clave en la mitigación del cambio climático.

Cuadro 1. Densidad aparente expresada en miligramos por metro cúbico ($D \text{ Mg m}^{-3}$), desviación estándar (S), coeficiente de variación ($CV \%$) y porcentaje de carbono orgánico del suelo promedio ($COS \%$) según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Table 1. Bulk density expressed in milligrams per cubic meter ($D \text{ Mg m}^{-3}$), standard deviation (S), coefficient of variation ($\%CV$) and percentage of average soil organic carbon ($SOC \%$) according to the age of the *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).

Edad de la plantación	$D \text{ Mg m}^{-3}$	S	$CV \%$	$COS \%$	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

Las desviaciones estándar (S) muestran la variabilidad de las mediciones de COS y densidad aparente en las diferentes edades de plantación. En términos generales, la desviación estándar es baja, lo que indica que las mediciones son relativamente consistentes dentro de cada grupo de edad. El coeficiente de variación ($CV\%$) es bajo, con los valores más bajos observados en los primeros tres años, lo que podría indicar que el sistema está todavía en proceso de estabilización. Los valores más altos de $CV\%$, observados en las plantaciones más antiguas, reflejan una mayor heterogeneidad en la distribución de carbono en el suelo, lo que podría ser el resultado de un mayor número de variables involucradas, tales como el crecimiento de las plantas, densidad de árboles por hectárea y condiciones edáficas específicas del sitio.

c) Distribución de la densidad aparente del suelo ($D \text{ Mg m}^{-3}$) en función de la edad de la plantación

La **Figura 3** presenta la variación de la $D \text{ Mg m}^{-3}$ en función de la edad de la plantación, expresada en años, la cual es un indicador clave de la compactación y de la disponibilidad de poros para el agua y los nutrientes; para la estimación del COS . El análisis muestra tres grupos según la edad de las plantaciones: 0, 3 y 6 años, con dos subcategorías dentro del grupo de 6 años (T1 y T2). Cada grupo presenta un diagrama de cajas y bigotes (*boxplot*), lo que permite observar la distribución de los datos, la mediana, los cuartiles y los valores atípicos, ofreciendo una visión completa de las tendencias de densidad del suelo a lo largo del tiempo.

Grupo de 0 años (plantación recién establecida): La densidad del suelo en este grupo muestra una distribución más dispersa, con valores que oscilan alrededor de 1.0 Mg m^{-3} . Este comportamiento podría estar relacionado con la estructura inicial del suelo antes de la intervención de la plantación, que tiende a ser más variable debido a la falta de procesos de compactación. Además, la variabilidad observada podría reflejar la heterogeneidad inherente a los suelos antes de su manejo.

Grupo de 3 años: A medida que las plantaciones avanzan en su desarrollo, la densidad del suelo muestra una ligera estabilización en comparación con el grupo anterior. La mediana de densidad

se encuentra alrededor de 1.1 Mg m^{-3} , con una menor dispersión en los datos. Esto sugiere que, a medida que las raíces de las plantas comienzan a expandirse, podrían estar reduciendo la compactación. Sin embargo, aún se observa variabilidad en la densidad, lo que podría estar asociado con la heterogeneidad en las condiciones edáficas locales del sitio de plantación, como el tipo de suelo.

Grupo de 6 años (T1 y T2): En las plantaciones de 6 años, se observa una diferencia notable entre las subcategorías T1 y T2. En el caso de T1, la densidad del suelo se mantiene cercana a los 1.1 Mg m^{-3} . Sin embargo, en el grupo T2, la variabilidad es considerablemente mayor, lo que sugiere la existencia de factores adicionales que afectan la densidad del suelo, como diferencias en el método de establecimiento de la plantación o la presencia de actividades de compactación o erosión en algunas parcelas.

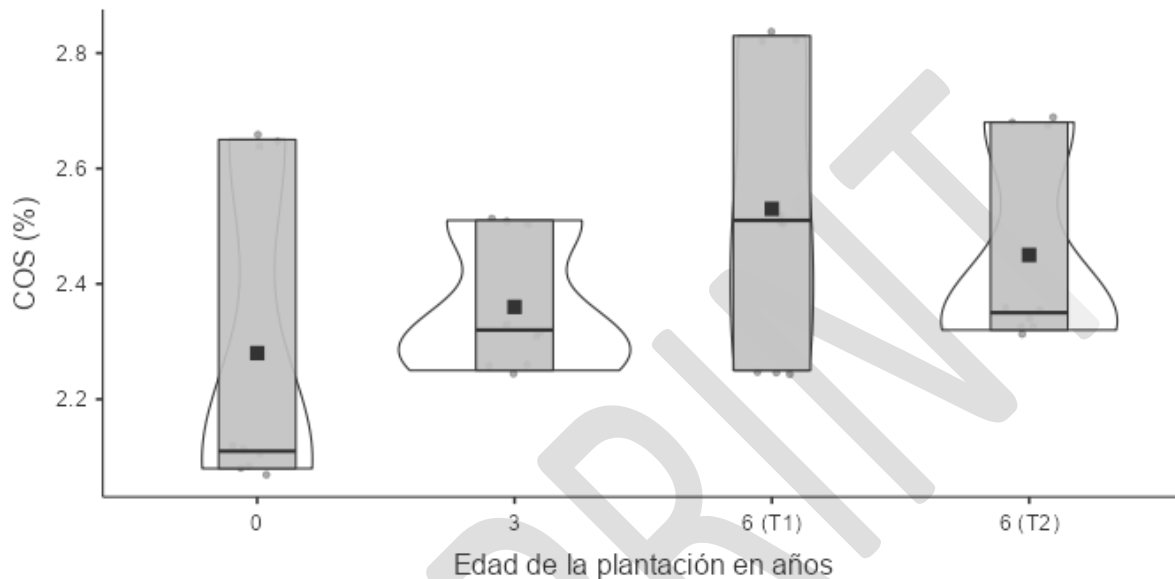
Figura 3. Distribución de la densidad aparente del suelo expresada en miligramos por metro cúbico (D Mg m^{-3}) a una profundidad de 0-15 cm, según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Figure 3. Distribution of soil bulk density expressed in milligrams per cubic meter (D Mg m^{-3}) at a depth of 0-15 cm, according to the age of the *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).



Figura 4. Distribución del porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS%) a una profundidad de 0-30 cm, según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Figure 4. Distribution of the percentage of soil organic carbon (SOC%) at a depth of 0-30 cm, according to the age of *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).



3.2 Contenido de carbono orgánico del suelo según la edad y el tratamiento

a) Variación de contenido de carbono orgánico del suelo

Se presenta un análisis detallado de las toneladas de carbono orgánico del suelo ($t \text{ COS ha}^{-1}$) a distintas edades de las plantaciones de *G. arborea*, observando una tendencia creciente en el contenido de carbono a medida que las plantaciones maduran. Según los datos del **Cuadro 2**, los suelos en la línea base (0 años) presentaron un contenido de $72.8 t \text{ C ha}^{-1}$, aumentando a $78.7 t \text{ C ha}^{-1}$ en las plantaciones de 3 años. Las plantaciones de 6 años mostraron un valor de $83.2 t \text{ C ha}^{-1}$ en T1 y $83.4 t \text{ C ha}^{-1}$ en T2, indicando un leve aumento en el contenido de carbono orgánico del suelo con la edad de las plantaciones.

Este comportamiento sugiere que el establecimiento de las plantaciones de *G. arborea* contribuye de manera gradual al aumento del carbono orgánico en el suelo, posiblemente debido al desarrollo de las raíces y la acumulación de materia orgánica derivada de la biomasa vegetal. Aunque los valores observados son bastante similares entre los tratamientos de 6 años, la ligera diferencia entre T1 y T2 podría indicar que factores específicos del manejo, como el tipo de intervención en cada tratamiento, tienen un impacto en la acumulación de carbono.

En cuanto a la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV%), los resultados muestran valores inferiores al 12 %, lo que sugiere que la variabilidad en los datos es aceptable. Los coeficientes de variación, relativamente bajos, indican que la dispersión de los valores está dentro de un rango controlado, lo que es positivo desde el punto de vista estadístico. Sin embargo, la

desviación estándar más alta en algunas edades (particularmente en el grupo de 6 años, T2) indica que, aunque los datos son generalmente consistentes, existen diferencias significativas en la distribución de los valores en algunas parcelas o tratamientos. Estas diferencias podrían ser atribuibles a factores como heterogeneidad en el tipo de suelo, manejo agrícola o condiciones ambientales específicas de cada parcela, lo que puede estar influyendo en los resultados observados.

Cuadro 2. Toneladas de carbono orgánico del suelo promedio por hectárea (t COS ha⁻¹), desviación estándar (S) y coeficiente de variación (%CV), según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Table 2. Tons of average soil organic carbon per hectare (t SOC ha⁻¹), standard deviation (S) and coefficient of variation (%CV), according to the age of *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).

Edad de la plantación	t COS 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

b) Distribución del contenido de carbono orgánico del suelo en toneladas por ha

La **Figura 5** ilustra la distribución del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en toneladas por hectárea (t ha⁻¹) a diferentes edades de las plantaciones de *G. arborea*. Los grupos representados corresponden a las edades de las plantaciones: 0, 3, y 6 años, con dos tratamientos dentro del grupo de 6 años (T1 y T2).

Grupo de 0 años (línea base): La distribución del COS en el grupo de 0 años muestra una variabilidad moderada, con una mediana cercana a 72.8 t C ha⁻¹. Esto sugiere que, en la fase inicial de las plantaciones, el contenido de carbono orgánico del suelo es relativamente bajo, lo cual es esperado debido a la falta de biomasa significativa generada por las raíces y la vegetación. Además, los valores atípicos podrían reflejar variabilidad en las condiciones iniciales del sitio, como el tipo de suelo o la cobertura vegetal previa a la plantación.

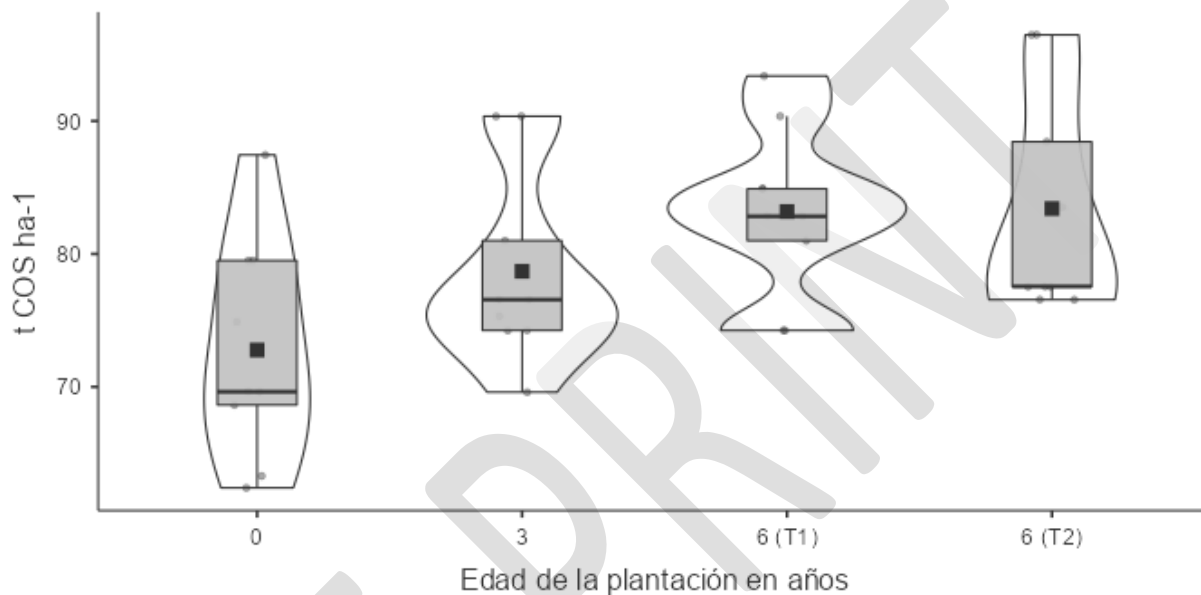
Grupo de 3 años: En las plantaciones de 3 años, el contenido de COS presenta una mediana alrededor de 78.7 t C ha⁻¹, con una ligera mejora respecto a la línea base. Esta tendencia al aumento podría estar relacionada con el crecimiento de las plantas y el aumento en la acumulación de materia orgánica proveniente de la actividad radicular y los primeros aportes de hojas y ramas. Sin embargo, la dispersión de los datos sigue siendo considerable, lo que indica que aún hay factores que contribuyen a la variabilidad, como las condiciones edáficas o las prácticas de manejo.

Grupo de 6 años (T1 y T2): Para las plantaciones de 6 años, la mediana se mantiene en torno a 83 t C ha⁻¹ en ambos tratamientos (T1 y T2). Si bien los valores de COS para ambos tratamientos son muy similares, se observa una mayor dispersión en el grupo T2, lo que sugiere que, aunque ambos tratamientos presentan un aumento en el contenido de carbono, factores específicos del establecimiento del rodal o variaciones locales pueden influir en la distribución del COS. Este

comportamiento refleja el impacto del método de establecimiento y su relación con la acumulación de carbono en el suelo.

Figura 5. Distribución del carbono orgánico del suelo expresado en toneladas por hectárea ($t\ COS\ ha^{-1}$) a una profundidad de 0-30 cm, según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Figure 5. Distribution of soil organic carbon expressed in tons per hectare ($t\ SOC\ ha^{-1}$) at a depth of 0-30 cm, according to the age of *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).



3.3 Comportamiento de la acumulación y remoción de carbono orgánico

A continuación, se describe detalladamente el comportamiento del carbono orgánico del suelo en función de su acumulación y remoción a lo largo del tiempo en plantaciones de *G. arborea* de diferentes edades. Los resultados reflejan patrones importantes en cuanto a la dinámica de carbono en los suelos forestales, con implicaciones para la gestión de estos ecosistemas y el potencial de secuestro de carbono.

a) Acumulación de carbono orgánico del suelo

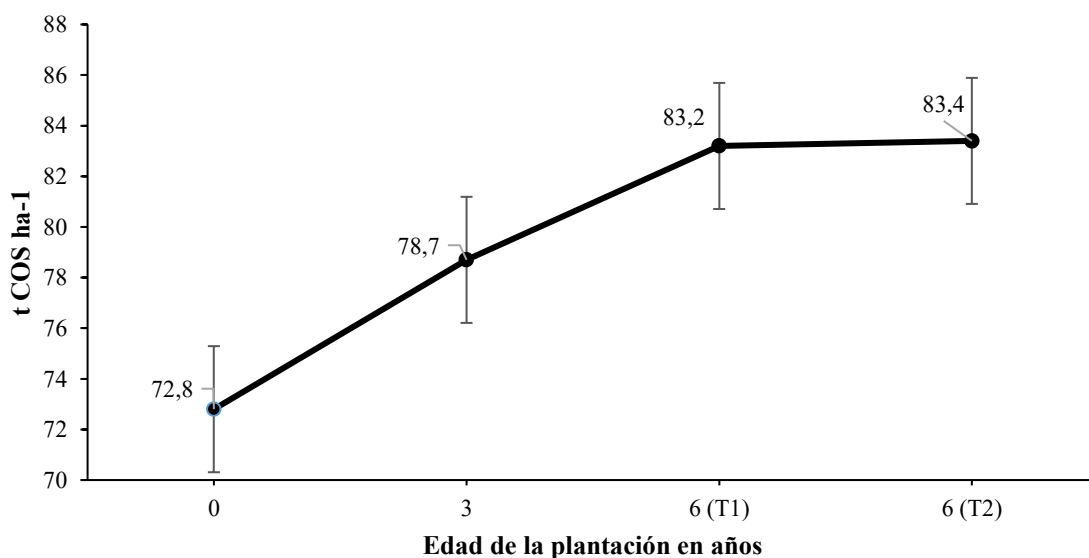
En relación con la distribución del carbono orgánico del suelo expresado en toneladas por hectárea ($t\ C\ ha^{-1}$), se observan diferencias notables en función de la edad de las plantaciones evaluadas. En la línea base (año 0), los suelos presentan los valores más bajos de carbono orgánico, con un contenido inferior a las $70\ t\ C\ ha^{-1}$. Los valores más altos de carbono se registraron en las plantaciones de 3 años, con una acumulación superior a $90\ t\ C\ ha^{-1}$. En las plantaciones de 6 años (T1 y T2), se mantienen niveles elevados de carbono, aunque con ligeras diferencias entre tratamientos, superando también las $90\ t\ C\ ha^{-1}$.

En la **Figura 6** se muestra la acumulación de carbono orgánico en el suelo a lo largo del tiempo, evidenciando una tendencia ascendente en la acumulación de carbono conforme aumenta la edad

de la plantación. Es interesante destacar que la plantación de 6 años (T2) acumuló ligeramente más carbono que la de 6 años (T1), con una diferencia de 0.2 t C ha^{-1} ; Por lo tanto, esta diferencia puede deberse a las variaciones en los tratamientos aplicados (T1 vs T2), lo que resalta la influencia de los métodos de establecimiento sobre el secuestro de carbono en el suelo.

Figura 6. Acumulación de carbono orgánico del suelo expresado en toneladas por hectárea (t COS ha^{-1}) a una profundidad de 0-30 cm, según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Figure 6. Accumulation of soil organic carbon expressed in tons per hectare (t SOC ha^{-1}) at a depth of 0-30 cm, according to the age of *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).

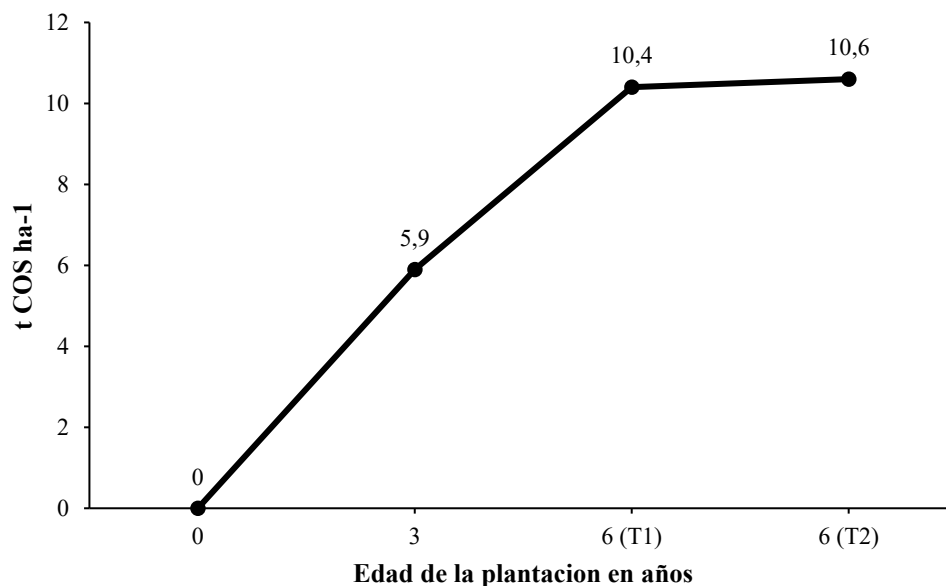


b) Remoción de carbono orgánico del suelo

En cuanto a la remoción de carbono, se observa un patrón consistente con la acumulación (**Figura 7**). En la línea base (año 0), se registra una remoción de 5.9 t C ha^{-1} desde los suelos iniciales hasta las plantaciones de 3 años. Este proceso de remoción está relacionado con la conversión de los suelos y la transición hacia una mayor captura de carbono por parte de la vegetación. De los 3 a los 6 años (T1 y T2), las remociones aumentan a 10.4 t C ha^{-1} y 10.6 t C ha^{-1} , lo que indica que, durante este periodo, la absorción neta de carbono fue de aproximadamente 1.7 t C ha^{-1} por año. Este valor positivo es una buena indicación del secuestro de carbono en el suelo y su potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático a largo plazo.

Figura 7. Remociones de carbono orgánico del suelo expresado en toneladas por hectárea (t COS ha⁻¹) a una profundidad de 0-30 cm, según la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* muestreada en los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2).

Figure 7. Soil organic carbon removals expressed in tons per hectare (t SOC ha⁻¹) at a depth of 0-30 cm, according to the age of the *Gmelina arborea* plantations sampled in Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (T1: Treatment 1, T2: Treatment 2).



4. Discusión

4.1 Densidad aparente del suelo y su importancia

Los suelos muestreados en las plantaciones al año 0 (línea base) presentaron una menor densidad aparente en promedio (**Cuadro 1**). Este sitio se caracteriza por la presencia de suelos del orden Inceptisol, los cuales, según Alvarado y Forsythe (2005), presentan en Costa Rica una densidad aparente que varía entre 0.67 y 1.71 Mg m⁻³, con un promedio de 1.21 Mg m⁻³, un valor cercano al obtenido en la línea base del presente estudio.

Los suelos muestreados en las plantaciones de mayor edad corresponden al orden Ultisol, cuya densidad aparente oscila entre 0.53 y 1.50 Mg m⁻³, con un promedio de 0.96 Mg m⁻³ (Alvarado y Forsythe, 2005). Los valores obtenidos en este estudio (**Cuadro 1**) concuerdan con los rangos reportados para este tipo de suelos, lo que sugiere que la variabilidad en la densidad aparente responde a las características intrínsecas de cada orden edáfico. Adicionalmente, Cortés (2024) reportó valores promedio de densidad aparente por sistema productivo de 1.12 Mg m⁻³ (CV = 8.3 %) en melina, 1.16 Mg m⁻³ (CV = 6 %) en pasto y 1.22 Mg m⁻³ (CV = 7.1 %) en teca, lo que aporta un punto de comparación con los resultados obtenidos en este estudio.

Los valores de densidad aparente obtenidos en el presente estudio se consideran bajos, en concordancia a lo mencionado por Rubio (2010) el cual menciona que valores de densidad aparente entre 1.00 y 1.30 Mg m⁻³ se consideran bajos y típicos de suelos finos arcillosos, propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y penetración de raíces, asimismo Klopp (2023) indica que los suelos arcillosos y con altos niveles de carbono orgánico tendrán valores más bajos de densidad aparente, lo cual podría explicar los resultados obtenidos en la **Figura 3**. Ya que cabe recordar que estos suelos se caracterizan por presentar altos niveles de arcilla, ya que pertenecen al orden Ultisol, sin dejar de lado que los valores de la densidad aparente dependen de diversos factores, incluyendo la textura del suelo, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, además del manejo de este.

Siguiendo esta línea se observa en la **Figura 3**. Que la densidad aparente de los suelos de las plantaciones al año 0 o línea base presentan los menores valores, esto puede estar relacionado a que estos suelos se encontraban subsolados y como indica Lineros *et al.*, (2023) el subsolado es una herramienta de preparación de suelo que cuando se realiza antes de la reforestación, tiene un efecto significativo en la disminución de la densidad aparente. La densidad aparente es altamente variable debido a variaciones en la calidad y cantidad del espacio poroso del suelo y por ende se considera un parámetro que contribuye de manera significativa a comprender la salud del suelo y a obtener datos precisos de los stocks de carbono almacenados en el suelo Klopp (2023).

Una consideración importante en relación con la estimación de la densidad aparente es el método utilizado para cuantificarla, debido a que el método comúnmente utilizado (método del volumen del cilindro conocido) puede alterar la muestra, esto debido a que no discrimina la presencia de piedras dentro del cilindro, por lo que es adecuado utilizarlo solamente en suelos poco pedregosos, además se puede compactar el suelo por la adherencia del mismo al deslizarse sobre las paredes del cilindro, no obstante Rubio (2010) menciona que este método es apropiado en suelos forestales ya que la edafología de estos ecosistemas es poco pedregosa. Complementariamente, Klopp (2023) indica que otro punto a tomar en consideración es que especialmente en las arcillas dependiendo de qué tan húmeda o seca se recolecta la muestra este valor puede cambiar, de modo que se deben buscar alternativas viables con el fin de obtener muestras con baja alteración e incertidumbre.

4.2 Dinámica del carbono orgánico del suelo

Los porcentajes de carbono orgánico del suelo que se muestran en el **Cuadro 1**. Evidencian que los suelos muestreados en el presente estudio poseen valores intermedios en relación con el porcentaje de carbono, ya que los valores promedio se encuentran de 2.28 a 2.53 % y según Núñez (2000) se consideran altos valores de porcentaje de carbono orgánico del suelo todos aquellos mayores a 2.5 %, intermedios si rondan entre 1 a 2.5 % y bajos si son menores a 1 %.

La dinámica que se observa en el comportamiento del contenido del porcentaje de carbono orgánico en los suelos de las plantaciones del año 0 o línea base es de 2.28 % mientras que en el año 3 se obtiene un valor de 2.36 % y en el año 6 (T1 y T2) valores de 2.53 % y 2.45 %, no obstante, se puede observar en la **Figura 4**. Que los datos poseen una variación significativa a excepción de los datos obtenidos para los suelos muestreados en la plantación con 3 años, mientras que en la **Figura 5**. Se muestra que los datos obtenidos en relación con el contenido del carbono orgánico del suelo expresado en toneladas por hectárea son menos variables, a excepción de los datos obtenidos para el año 0 o línea base.

4.3 Contenido de carbono orgánico del suelo y su relación con las plantaciones forestales

Los resultados obtenidos **Figura 6**, reflejan que el contenido de carbono orgánico del suelo podría estar en aumento a medida que avanza la edad de la plantación. Se registraron valores promedio de 72.8 t C ha^{-1} en los suelos de la línea base o 0 años y de 83.4 t C ha^{-1} en los suelos de las plantaciones con una edad de 6 (T2). Este incremento es consistente con hallazgos previos en la región, como los reportados por Fonseca *et al.*, (2008), quienes documentaron aumentos en el contenido de carbono del suelo en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* y *Hieronyma alchorneoides* con edades de 0.5 a 14 años en la vertiente del Caribe de Costa Rica.

Los valores obtenidos en este estudio son inferiores a los reportados por Rosales (2018) para los suelos de Costa Rica en general, sin embargo, es importante recalcar que los datos reportados en el presente estudio se basan en un método de estimación para sitios más en específico. La tendencia observada, donde el carbono orgánico del suelo aumenta con la edad del rodal, puede atribuirse a la acumulación de materia orgánica proveniente del dosel arbóreo y la mayor estabilidad del ecosistema edáfico (Bradford *et al.*, 2013). Otros estudios han demostrado que la acumulación de carbono en el suelo depende de la calidad y cantidad de residuos orgánicos, así como de la actividad microbiana y las condiciones climáticas locales (Six *et al.*, 2002; Lal, 2004).

Las medidas de manejo del suelo se vuelven relevantes para el almacenamiento de carbono del suelo. Gould (2021) menciona que la labranza cero, la reducción del uso de herbicidas, así como realizar aplicaciones de enmiendas como la cal, con el fin de reducir la acidez del suelo y establecer o mantener diversas especies de pastos con el fin de mantener la cobertura del suelo son medidas que mejorarían enormemente las tasas de almacenamiento del porcentaje de carbono orgánico del suelo. Cabe recordar que las plantaciones del presente estudio son encaladas una única vez y que después del primer año no se realiza un manejo silvicultural de las especies arvenses, es decir estas se mantienen, debido a esto la superficie del suelo se mantiene cubierta la mayor parte del ciclo de vida del rodal. Además, que las actividades de labranza son mínimas, debido a esto se puede inducir que este tipo de uso del suelo (plantaciones forestales) con este mismo manejo silvicultural se proyecta como una actividad meta que puede brindar altas tasas en el porcentaje de almacenamiento de carbono del suelo y a su vez posicionarse como un sumidero de carbono estable, ya que se cuenta con la experiencia de una empresa que logró estandarizar este tipo de manejo silvicultura o estas prácticas que permiten promover la recarbonización de los suelos forestales.

4.4 Impacto del uso del suelo en el secuestro de carbono orgánico

Los resultados presentados en la **Figura 7** sugieren que tanto el establecimiento de plantaciones forestales con manejo tradicional como a través de la regeneración de rebrotes permitieron almacenar entre 10.4 y 10.6 t C ha^{-1} de carbono orgánico en el suelo (COS) durante un período de seis años. En ambos sistemas de manejo, se observa que los suelos tienden a recarbonizarse conforme aumenta la edad de la plantación, lo que indica que ambos tipos de establecimiento silvicultural pueden ser estrategias efectivas para la captura y el almacenamiento de carbono en suelos forestales.

Estudios previos en la vertiente del Caribe de Costa Rica, realizados por Fonseca *et al.*, (2012), evidencian una dinámica similar, con aumentos en los contenidos de carbono que oscilan entre 85.8

y 107 Mg ha⁻¹ en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* y entre 77.2 y 101.8 Mg ha⁻¹ en *Hieronyma alchorneoides*. Estos valores respaldan la hipótesis de que el manejo forestal contribuye a la recarbonización del suelo.

Por su parte, Cortés (2024) reporta que, a una profundidad de 0 a 30 cm, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de COS entre sistemas forestales (Promedio: 85.2 Mg ha⁻¹; DE: 17 Mg ha⁻¹) y sus áreas de pasto adyacentes (Promedio: 88.3 Mg ha⁻¹; DE: 13.8 Mg ha⁻¹). Estos resultados destacan la necesidad de evaluar a mayor profundidad y en diferentes contextos edafoclimáticos para comprender mejor la dinámica del carbono en suelos forestales bajo distintas estrategias de manejo.

Además, el secuestro de carbono en los suelos es un proceso influenciado por diversas variables, como el tipo de vegetación, la calidad del material orgánico y la actividad biológica del suelo. Los suelos bajo sucesión natural y manejo forestal presentan una mayor capacidad de retención de carbono en comparación con sistemas agropecuarios intensivos, donde la perturbación del suelo reduce los aportes de materia orgánica y acelera la descomposición (Paustian *et al.*, 2016). Adicionalmente, estudios (Post & Kwon, 2000; Nair *et al.*, 2009) han señalado que la retención de carbono en el suelo puede ser mejorada mediante la implementación de sistemas agroforestales y plantaciones forestales.

4.5 Generar créditos de carbono del suelo a través de plantaciones forestales

La dinámica de los resultados expuestos en la **Figura 7**, en relación a las remociones de carbono de los suelos permiten deducir que las plantaciones forestales de *G. arborea* muestreadas contribuyeron a un aumento en las tasas de recarbonización del suelo y por ende se comprueba uno de los principios con mayor incertidumbre en términos de estimación de carbono en suelo que es la adicionalidad, este principio de adicionalidad se está generando en gran medida por el tipo de uso del suelo (plantación forestal de árboles de *G. arborea*) como actividad principal, es importante demostrar este principio de adicionalidad para generar créditos de carbono verificables como medida de compensación en forma de un ingreso adicional para el agricultor por sus esfuerzos para aumentar el reservorio de carbono y la salud del suelo.

Es fundamental considerar las fugas de carbono del suelo hacia la atmósfera, especialmente en el contexto de distintos sistemas de uso del suelo. En el caso de las plantaciones forestales con ciclos de corta reducidos (≤ 6 años), las actividades de raleo y cosecha final suelen realizarse mediante tracción animal o, cuando la topografía lo permite, con maquinaria equipada para el arrastre de trozas a través de calles de arrastre establecidas. Este tipo de manejo genera una menor perturbación en la estructura del suelo en comparación con los cultivos perennes o anuales, donde las prácticas frecuentes de labranza alteran significativamente el suelo y favorecen la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.

Según Verhulst *et al.*, (2015), para mantener los niveles de carbono orgánico en el suelo, la labranza debe ser controlada, limitando la perturbación a un máximo del 20-25 % de la superficie del suelo. Esto resalta la importancia de aplicar metodologías como la diferencia entre reservas o el enfoque de ganancia-pérdida para evaluar las tasas de almacenamiento de carbono y las posibles fugas a lo largo del período de los créditos de carbono, garantizando así el cumplimiento del principio de adicionalidad.

4.6 Relevancia en el contexto de cambio climático

En términos generales, los datos sugieren que el suelo está experimentando un aumento gradual en la densidad aparente y una ligera fluctuación en el contenido de carbono orgánico a medida que la plantación envejece. La variabilidad en los valores de COS entre tratamientos sugiere que las prácticas de establecimiento silvicultural pueden tener un impacto significativo en la acumulación de carbono en el suelo y que podrían estar relacionadas al crecimiento y densidad de árboles por hectárea, lo que podría ser un aspecto importante para considerar en proyectos de reforestación y manejo sostenible del suelo.

Las tasas de variación observadas también sugieren que el sistema está sujeto a una serie de factores complejos que afectan tanto la biomasa de las plantas como la dinámica del carbono en el suelo. El incremento del carbono orgánico en los suelos tiene implicaciones directas en la mitigación del cambio climático, dado su papel en la captura de CO₂ atmosférico. En este sentido, los sistemas de regeneración natural y el manejo forestal sostenible pueden contribuir a aumentar los reservorios de carbono en suelos tropicales, reduciendo la presión sobre los bosques primarios y promoviendo la estabilidad de los ecosistemas.

Los resultados de este estudio refuerzan la importancia de diseñar estrategias de conservación basadas en la naturaleza, priorizando prácticas de manejo que favorezcan la recarbonización de los suelos. Este enfoque no solo contribuiría a la mitigación del cambio climático, sino también a la restauración de los servicios ecosistémicos del suelo, tales como la fertilidad, la retención de agua y la biodiversidad edáfica. Investigaciones previas han demostrado que el carbono almacenado en el suelo puede permanecer en reservas estables a largo plazo si se aplican estrategias de manejo adecuadas, incluyendo la diversificación de cultivos y la reducción de labranza (Lal, 2004; Bradford *et al.*, 2013).

Adicionalmente, la comparación con estudios previos destaca la necesidad de continuar con monitoreos de largo plazo, a fin de evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo sobre el secuestro de carbono. Esto permitirá diseñar políticas más efectivas para la mitigación del cambio climático y la conservación de los recursos edáficos en el país. Futuras investigaciones pueden enfocarse en la aplicación de tecnologías de sensoramiento remoto para el monitoreo del carbono del suelo y la modelización de escenarios de almacenamiento bajo distintas condiciones de manejo (Paustian *et al.*, 2016; Nair *et al.*, 2009).

5. Conclusiones

Se evidencia el papel clave que las plantaciones pueden desempeñar en la mitigación del cambio climático. Se observó una tendencia ascendente en la acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) a lo largo del tiempo, pasando de 72.8 t C ha⁻¹ en la línea base a 83.4 t C ha⁻¹ en el estadio de rebrote, lo que confirma el efecto positivo de estas plantaciones en la recarbonización de los suelos. Además, el porcentaje de carbono orgánico en el suelo aumentó de 2.28 % en la línea base a 2.53 % a los 6 años, lo que refuerza la importancia del manejo forestal en la acumulación de COS.

La tasa promedio de remoción de carbono fue de 1.7 t C ha^{-1} por año, lo que respalda la idea de que estas plantaciones contribuyen de manera efectiva a la recarbonización de los suelos a largo plazo. Además, la persistencia del carbono orgánico en el suelo lo convierte en un sumidero de carbono más estable que el carbono almacenado en la biomasa aérea, con el potencial de permanecer en el suelo por siglos si se aplican prácticas de manejo adecuadas.

Estos hallazgos validan el principio de adicionalidad en las plantaciones de *G. arborea*, lo que las posiciona como candidatas viables para la generación de créditos de carbono verificables. La inclusión del almacenamiento de carbono en el suelo dentro de los mecanismos de compensación podría fortalecer iniciativas como el Programa País Carbono Neutralidad de Costa Rica, ofreciendo incentivos económicos para la conservación y expansión de estas plantaciones.

Las plantaciones de *G. arborea* representan una estrategia eficiente para la recarbonización en suelos forestales y agrícolas, reforzando su papel en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, es necesario continuar con el monitoreo de estos sistemas a largo plazo para optimizar las prácticas de manejo y maximizar su contribución a la conservación del carbono en el suelo, asegurando su sostenibilidad y eficiencia dentro de los esquemas de manejo forestal sostenible.

Recomendaciones

Para mejorar la precisión de las estimaciones de carbono en el suelo, es necesario explorar métodos más robustos para la medición y monitoreo de la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico, especialmente en suelos con alta arcilla. Además, se recomienda investigar los efectos de diferentes prácticas de manejo, de la textura del suelo, del rol de la materia orgánica en la acumulación de carbono y el efecto de la densidad y crecimiento de los árboles, lo cual podría ayudar a optimizar las estrategias de manejo forestal para maximizar la recarbonización de los suelos.

6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

7. Agradecimiento

A la empresa, Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A. por la oportunidad de realizar este trabajo en sus plantaciones y apoyarme en todo lo posible. 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) que apoyaron económicamente en los análisis de laboratorio.

8. Referencias

- Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J., . . . Taroh. (2018). *Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, pero no aprobado en detalles*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). [Archivo PDF]. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>
- 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/articulo.oa?id=43629109>
- Amador, B. M. (2017). *Negociación de servicios ambientales de pequeños agricultores de Nicaragua, Guatemala y Brasil en el mercado voluntario de carbono*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional]. <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14133/Tesis%20MDR%20-%20Manuel%20Amador%20Benavides.pdf?sequence=1>
- 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(1), 271–281. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9822-0>
- Chenost, C., Gardette, Y. M., Demenois, J., Grondard, N., Perrier, M., & Wemaëre, M. (2011). *Los mercados de carbono forestal. Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente*. [Archivo PDF]. https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/unep99_spn_0.pdf
- Cortes, M. (2024). *Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo cobertura de pastos y plantaciones forestales jóvenes de Tectona grandis l.fy Gmelina arborea robx. en la Región Huetar Norte, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional]. repositorio.una.ac.cr/items/2ca77824-06b1-4f45-bc45-6a68b8221835
- Dirección de Cambio Climático (DCC). (2022). *Programa País Carbono Neutralidad*. <https://cambioclimatico.go.cr/programa-pais-carbono-neutralidad/#:~:text=El%20Programa%20Pa%C3%ADs%20de%20Carbono,reducci%C3%B3n%20de%20remoci%C3%B3n%20y%20compensaci%C3%B3n%20de>

- Dynarski, K. A., Bossio, D. A., & 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>
- 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. Departamento de Proyectos. [Archivo PDF]. <https://www.fonafifo.go.cr/media/3131/documento-1-general-proyectos-2021.pdf>
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey-Benayas, J. M. (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197–211. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9>
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H., & Leblanc, H. (2008). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5742/Acumulacion_de_biomasa_y_carbono.pdf?sequence=1
- Gould, T. (2021). 6 Great ways to improve your soil carbon levels. <https://www.ryzo.earth/blog/great-ways-to-improve-your-soil-carbon-levels>
<https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/4408/56985.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2024). *Costa Rica: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal 2023*. [Archivo PDF]. <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2024-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2023-01.pdf.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- IPCC. (2016). Anexo 2. Resumen de ecuaciones. *Directrices del IPCC de 2006 para los*

inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, 4, 1-36.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv10rr9hn.14>

Klopp, H. (2023). *La densidad aparente es un indicador de la salud del suelo*.
<https://extension.sdstate.edu/bulk-density-indicator-soil-health>

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Líneros, M., Espinosa, M., Acuña, E., & García, J. (2003). *Efecto del subsolado sobre el crecimiento inicial de plantas de pinus radiata D. Don en áreas alteradas por skidder*.
<https://www.fao.org/4/xii/0543-b4.htm#fn1>

Nair, P.K.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10-23.
doi:10.1002/jpln.200800030.

Núñez, J. (2000). Fundamentos de edafología. San José, CR. EUNED. 185p.

Ortiz, E. (2008). *Atlas digital de Costa Rica*. [Informa final de proyecto, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
[chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3140/infor_proyecto_atlas2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3140/infor_proyecto_atlas2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, GP., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., & Kruger, D. (2018). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). [Archivo PDF].
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_Sp.pdf

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>

- Post, W.M.M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3): 317–27. https://www.researchgate.net/publication/227602504_Soil_Carbon_Sequestration_and_Land-Use_Change_Processes_and_Potential
- Rona, L. N. (2019). *Costa Rica: Programa País de Carbono Neutralidad 2.0 - Categoría Organizacional*. Ministerio de Ambiente y Energía. [Archivo PDF]. https://ledslac.org/wp-content/uploads/2020/05/EdC-Carbono-Neutralidad-Costa-Rica-ene20_mod.pdf
- Rosales, I. A. (2018). *Mapa de Carbono Orgánico del Suelo de Costa Rica*. San José, Costa Rica. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). [Archivo PDF]. http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2018/Mapa-de-Carbono-Orgnico-del-Suelo-Albn-Rosales_edited.pdf
- Rubio, A. M. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. [Archivo PDF]. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Samayoa, S. (2011). *Mercado de carbono, oportunidades para proyectos de pequeña escala. Tegucigalpa, Honduras: Programa Regional de Medio Ambiente en Centro América (PREMACA)*. [Archivo PDF]. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/CF1F3D1F3D8BBADB05257C290072D01F/\\$FILE/Mercado_de_carbono_oportunidades_para_proyectos.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/CF1F3D1F3D8BBADB05257C290072D01F/$FILE/Mercado_de_carbono_oportunidades_para_proyectos.pdf)
- Sistema de Información de Recursos Forestales de Costa Rica (SIREFOR). (2025). *Estadísticas de aprovechamiento forestal en Costa Rica*. <https://www.sirefor.go.cr/Sirefor/estadisticas>
- Six, J., Conant, R.T., 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>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2022). *¿Qué es el Acuerdo de París?* <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>

Verhulst, N., François, I. and Govaerts, B. (2015) Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables? Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. [Archivo PDF]. <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/4408/56985.pdf>