

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**LÍNEA BASE DE CARBONO DEL SUELO DE DIFERENTES
COBERTURAS VEGETALES EN LA ZONA ATLÁNTICA DE
COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON
ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL CON EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CATALINA HERNÁNDEZ MONTERO

CARTAGO, COSTA RICA, 2022

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**LINEA BASE DE CARBONO DEL SUELO DE DIFERENTES
COBERTURAS VEGETALES EN LA ZONA ATLÁNTICA DE
COSTA RICA**

**ANTEPROYECTO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
FORESTAL CON ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CATALINA HERNÁNDEZ MONTERO

CARTAGO, COSTA RICA

JUNIO, 2022



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

LÍNEA BASE DE CARBONO DEL SUELO DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES EN LA ZONA ATLÁNTICA DE COSTA RICA.

Hernández Montero Catalina

RESUMEN

El conocimiento actual de las cantidades de carbono almacenado en los distintos tipos de suelo es limitado y a pesar de que se conoce que el suelo puede ser participe del ciclo de Carbono actuando como reservorio o fuente, generar información resulta esencial para la toma de futuras decisiones. Por lo que en este estudio se estableció una línea base de Carbono en el suelo de 6 sitios ubicados en la zona Atlántica de Costa Rica.

La vegetación presente en los sitios está compuesta en su mayoría de plantaciones forestales mixtas de *Araucaria hunsteinii* en combinación con especies como *Eucalitus* sp, *Pinus* sp, *Schizolobium parahyba*, *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia ferruginea* y *Vochysia guatemalensis*. En el caso de los sitios de la finca Reventazón y en los alrededores del CATIE, fueron establecidas en el año 2021 y en la finca las Delicias en el año 2019. Además, uno de los 6 sitios escogidos ubicado en el sector de la finca las Delicias presenta su cobertura original compuesta por un potrero que fue abandonado, por lo que puede presentar características de un charral.

En cuanto a los resultados el sitio que presenta mayor cantidad de C para las dos profundidades es Noche Buena con un promedio de 196,07 y 162,22 Mg ha⁻¹

respectivamente y el sitio con menor cantidad es el sector de Reventazón con un promedio de 96,86 y 88,02Mg ha⁻¹ respectivamente.

Además, se determinó que para este estudio existen diferencias significativas en cuanto a la cantidad de Carbono en el suelo presente en los sitios con respecto a las características de este (Da, MO% y % de arcillas), pero no así por la cobertura presente en cada uno de ellos.

Palabras clave: Plantaciones forestales mixtas, sumidero, materia orgánica, densidad aparente, arcillas.

ABSTRACT

The current knowledge of the amounts of Carbon stored in the different types of soil is limited and despite the fact that it is known that the soil can participate in the Carbon cycle acting as a reservoir or source, generating information is essential for future decision making. Therefore, in this study, a base line of Carbon was settled in the soil of 6 sites located in the Atlantic zone of Costa Rica.

The vegetation present in the sites is composed mostly of mixed forest plantations of *Araucaria hunsteinii* in combination with species such as *Eucalitus* sp, *Pinus* sp, *Schizolobium parahyba*, *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia ferruginea* and *Vochysia guatemalensis*. In the case of the sites of the Los Pavones farm and in the surroundings of CATIE, they were established in the year 2021 and in the Las Delicias farm in the year 2019. In addition, one of the 6 chosen sites located in the

sector of the farm Las Delicias presents its original cover composed of a paddock that was abandoned, so it may present characteristics of a charral.

Regarding the results, the site with the highest amount of C is Noche Buena with an average of 196,07 y 162,22 Mg ha⁻¹ and, on the other hand, the site with the lowest amount of C is the Reventazón sector with an average of 96,86 y 88,02Mg ha⁻¹. In addition, it was determined that for this study there are differences in the amount of Carbon in the soil present in the sites with respect to its characteristics (apparent density and percentage of organic matter).

Keywords: Mixed forest plantations, carbon sink, organic matter, apparent density, clays..

*Hernández Montero, C. 2022. Línea base de carbono del suelo de diferentes coberturas vegetales en la Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ing. Edwin Esquivel Segura Dr., Ing Víctor Martínez Albán Lic. y Ing. Edgar Ortiz Malavasi Ph.D., como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Edwin Esquivel Segura Dr.
Director de tesis



Edgar Ortiz Malavasi Ph D.
Profesor lector



Victor Martínez Albán Lic.
Reforest the tropics



Dorian Carvajal Vanegas M Sc
Coordinador Trabajos Finales
de graduación



Catalina Hernández Montero
Estudiante

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mi mamá, a mi hermano y a mi novio, por guiarme, cuidarme, creer en mí y que porque gracias a su sacrificio logré dar un paso tan importante en mi vida.

A Iris y a Mariam, por ser una parte esencial en mi camino.

A Angelet y a Angie, porque juntas pudimos lograr salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fortaleza, perseverancia y determinación para lograr mis objetivos en la vida.

Al personal de Reforest The Tropics por todo el apoyo, consejo y confianza brindada para la realización de este trabajo en especial al Ing. Víctor Martínez y a Greg Powell.

Al profesor Edwin por ser un excelente guía y consejero.

A mi familia por apoyarme, animarme y dejarme muy claro que soy capaz de realizar mis sueños siempre que me esfuerce para conseguirlos.

A mi novio por ser el apoyo que necesitaba para seguir adelante.

A Iris y a Mariam por adoptarme en su familia y facilitarme los recursos necesarios para salir adelante con mi carrera.

A los tetranychus por ser la mejor compañía durante estos años.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
ACREDITACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
Área de estudio.....	3
Recolección de datos.....	4
Procesamiento de datos.....	5
Análisis de información.....	7
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
Características del suelo.....	8
Carbono en el suelo.....	10
CONCLUSIONES.....	19
RECOMENDACIONES.....	19
BIBLIOGRAFÍA.....	21

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución y cantidad de muestras por sitio en las tres fincas del área de estudio.....	4
Cuadro 2. Valores promedio de las diferentes características del suelo encontrados en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.....	8
Cuadro 3. Valores de Carbono en suelo encontrados en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.....	10
Cuadro 4. Diferencia en los valores de C para cada uno de los sitios muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.....	13
Cuadro 5. Diferencia en los valores de C para cada profundidad muestreada en la Zona Atlántica de Costa Rica.....	14
Cuadro 6. Diferencia en los valores de C para cada profundidad y sitio muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.....	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción del Carbono en el suelo en seis sitios ubicados en la Zona Atlántica de Costa Rica por profundidad.....	<u>11</u>
Figura 2. Interacción del Carbono en el suelo por profundidad en seis sitios ubicados en la Zona Atlántica de Costa Rica.....	<u>12</u>
Figura 3. Diferencia en los valores de C para cada uno de los sitios muestreados en la Zona Atlántica de Costa Rica.....	<u>13</u>
Figura 4. Diferencia en los valores de C para cada profundidad muestreada en la Zona Atlántica de Costa Rica.....	<u>14</u>
Figura 5. Diferencia en los valores de C para cada profundidad y sitio muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.....	<u>15</u>
Figura 6. Contenido de Carbono en suelo con respecto al porcentaje de Materia Orgánica obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.....	<u>16</u>
Figura 7. Contenido de Carbono en suelo con respecto a la densidad aparente del suelo obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.....	<u>17</u>
Figura 8. Contenido de Carbono en suelo con respecto a la textura (porcentaje de arcillas) del suelo obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.....	<u>17</u>

INTRODUCCIÓN

El suelo es el principal almacén de Carbono en ecosistemas forestales y vegetales. Las plantas en su biomasa entendiéndose como hojas, raíces o tallos por medio de la fotosíntesis almacenan carbono, que luego por medio de la materia orgánica como el follaje, raíces o ramas de los árboles al caer al suelo puede llegar a integrarse como Carbono orgánico [1].

Este importante compartimiento, dentro del ciclo global del Carbono (C), puede actuar como fuente o reservorio de C desde y hacia la atmósfera, dependiendo del uso que se le dé [2]. Tomando en cuenta que los niveles de carbono en el suelo dependen de factores como el uso histórico, el tipo de suelo, la especie que se encuentra en el sitio y los ciclos de cosechas [3] es importante tener prácticas que aseguren disminuir el atmosférico almacenándolo en el suelo.

Existen prácticas agronómicas como la cero labranza, la aplicación de materia orgánica, el establecimiento de coberturas forestales, entre otras; que favorecen la captura de carbono en el suelo, por lo que, en un manejo sustentable, el carbono orgánico del suelo debe mantenerse o aumentarse dependiendo de una línea base previamente establecida [4]. Este valor debe ser tomado como referencia para compararlo con posibles cambios que se podrían presentar en los sitios luego de haberse realizado alguna perturbación [5].

A pesar de esto, el conocimiento actual de las cantidades de carbono almacenado bajo distintos escenarios (tipo de cobertura, características del suelo, entre otras)

es limitado y aunque estudios realizados por la FAO demuestran que el 68,8 % del carbono orgánico de la biosfera se encuentra en el suelo [6], si se toma en cuenta que en la actualidad uno de los principales servicios ambientales atribuidos a las plantaciones forestales, es la función de capturar y ser sumideros de carbono, saber cuantificar la capacidad de captura de carbono de los ecosistemas forestales [7] considerando la biomasa aérea, la necromasa y especialmente el carbono orgánico del suelo resulta esencial para la toma de decisiones futuras.

Por tanto, con este trabajo se pretende realizar un estudio en seis sitios ubicados en la zona Atlántica de Costa Rica, con el objetivo de obtener la línea base de carbono captado por el suelo y determinar si existen diferencias en cuanto al reservorio de carbono según el tipo de cobertura y las diferentes características del suelo presentes; bajo la hipótesis de que el carbono del suelo depende del uso presente, por lo que diferentes coberturas y características del suelo afectarán el contenido de carbono cuantificando las cantidades de este elemento en presentaciones no atmosféricas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los sitios de estudio se encuentran distribuidos de la siguiente manera: tres sitios en la Finca Hacienda Las Delicias ubicada en el cantón de Guácimo de la provincia de Limón (10° 12' N, 83° 37' W), un sitio en la Finca Reventazón ubicada en Turrialba de la provincia de Cartago (9° 54' N, 83° 36' W) y dos sitios en las inmediaciones del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza -CATIE, en el distrito central del cantón Turrialba de la misma provincia (9° 53' N, 83° 39' W).

La finca Hacienda Las Delicias se encuentra a 295 msnm, presenta una temperatura promedio anual de 25,1 °C y una precipitación media anual de 3464 mm. Por su parte la Finca Reventazón se encuentra a 630 msnm, tiene una temperatura promedio anual de 21,7 °C y una precipitación media anual de 2619 mm. El CATIE se encuentra a 602 msnm, tiene una temperatura promedio anual de 22,5°C y posee una precipitación promedio anual de 2645 mm [8].

El tipo de suelo que se presenta en estos sitios según la capa de suelos de Costa Rica del Atlas de Costa Rica 2014, es de orden Inceptisol y además presentan pendientes de hasta 30% en el sector de la finca Reventazón.

La vegetación presente en los sitios está compuesta en su mayoría de plantaciones forestales mixtas de *Araucaria hunsteinii* en combinación con especies como *Eucaliptus* sp, *Pinus* sp, *Schizolobium parahyba*, *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia ferruginea* y *Vochysia guatemalensis*. En el caso de los sitios de la finca

Reventazón y en los alrededores del CATIE, fueron establecidas en el año 2021 y en la finca las Delicias en el año 2019. Además, uno de los 6 sitios escogidos ubicado en el sector de la finca las Delicias presenta una cobertura de potrero abandonado, por lo que puede catalogarse en este momento como un charral.

Recolección de los datos

Se recolectó un total de 27 muestras de suelo para todo el estudio, considerando todos los sitios a evaluar. El área representada por cada una de estas muestras dependió del área de cada uno de los sitios por lo que se obtuvo por lo menos tres muestras de cada uno de ellos. Las muestras se compusieron de 32 submuestras, a profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm (16 submuestras por cada profundidad), por lo que en total se recolectaron 864 submuestras. En el Cuadro 1 se puede observar la distribución y cantidad de muestras por cada sitio.

Cuadro 1. Distribución y cantidad de muestras por sitio en las tres fincas del área de estudio

Finca	Sitio	Área (ha)	ha/muestra	n° muestras	Barrenazos	Subtotal/finca
Catie	Noche Buena	12	3	4	128	
	Puente Cajón	9	3	3	96	224
Reventazón	Lote 6	22	5	4	128	128
Delicias	Pasto	40	7	6	192	
	Mixta	38	7	5	160	
	Núcleo	30	7	5	160	512
Total		151		27	864	

Elaboración propia

Para la recolección de las muestras se utilizó un barreno holandés de 5 cm de diámetro y cada muestra se depositó en una bolsa de plástico debidamente identificada, anotando la fecha, el sitio y la profundidad en la que se recolectó.

Antes de la toma de cada muestra, se eliminaron los horizontes orgánicos de cada punto. El muestreo se realizó a conveniencia en cada sitio, para lograr la mayor representatividad de cada uno de ellos, tomando un punto de GPS y marcando cada punto para evitar la toma de datos en el mismo lugar durante la recolección de las muestras y para su fácil reconocimiento en el futuro.

Para la determinación de la densidad aparente, se tomó una muestra por sitio, compuesta por tres submuestras a profundidades de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm recolectadas con un barreno para muestreo de densidad aparente con cilindros de 5 cm de diámetro. Estas muestras se colectaron en el mismo momento en el que se realizó la toma de las muestras anteriormente mencionadas.

Procesamiento de los datos

Antes de realizar el análisis de los datos obtenidos, las muestras de suelo se secaron al aire por al menos 24 horas. Seguidamente se realizó un tamizaje a 2 mm (mesh ASTM N° 10) y se determinaron los pesos de grava (partículas > 2 mm), biomasa de raíces y suelo (< 2 mm) ($\pm 0,01$ g) [3].

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de laboratorio de las muestras según el procedimiento utilizado por Esquivel et al. [3] y [9], en el cual se determina la materia orgánica en el suelo mediante el método de pérdida de peso por ignición WLOI

(Weight-Loss-On-Ignition) propuesto por Magdoff [10] y se realiza una medición del carbono por combustión. Para ello, se obtuvo una alícuota de 10 g de suelo ($\pm 0,01$ g) por muestra y se secó por 24 horas en horno a 105 °C para obtener el peso seco del suelo ($\pm 0,01$ g). Posteriormente, se calcinó utilizando una mufla a 450 °C por 24 horas y se pesó ($\pm 0,01$ g) para obtener el peso calcinado.

El contenido de materia orgánica se determinó mediante la Fórmula (1):

$$MO (\%) = \frac{PSS(105^{\circ}C) - PSC(450^{\circ}C)}{PSS(105^{\circ}C)} \quad (1)$$

Donde,

PSS(105 °C): peso seco del suelo (g)

PSC(450 °C): peso calcinado (g)

La determinación del contenido de carbono en el suelo se realizó utilizando el porcentaje de materia orgánica mediante la siguiente Fórmula (2), acorde a Tabatabai [11].

$$Carbono = \frac{VS \cdot Da \cdot MO\%}{2} \quad (2)$$

Donde,

VS: Volumen de suelo (m^3/ha)

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

MO: Materia orgánica (%)

Para obtener la densidad aparente se utilizó la siguiente Fórmula (3) donde se determinó el volumen de cada cilindro ($\pm 0,01$ mm) utilizado para recoger las muestras y el peso seco del suelo ($\pm 0,01$ g).

$$Da = \frac{PSS(105^{\circ}C)}{VC} \quad (3)$$

Donde,

PSS (105°C) = peso seco del suelo (g)

VC = Volumen del cilindro (cm³).

Además, se realizó una caracterización de la textura del suelo por medio del método de Bouyoucos, según la metodología utilizada por Hernández [12]; tomando en cuenta que la cantidad de carbono almacenada en el suelo está relacionada con las arcillas presentes en el mismo [3].

Análisis de la información

Los datos de Carbono se sometieron a un análisis estadístico bajo un diseño completamente aleatorio con parcelas divididas con un arreglo factorial, en el que se les aplicó la prueba de Jarque-Bera para verificar su normalidad además se compararon las medias utilizando la prueba de Tukey. Los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico Past y Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del suelo

En el siguiente cuadro se presentan los valores promedio obtenidos para las diferentes características del suelo tomadas en cuenta para este estudio.

Cuadro 2. Valores promedio de las diferentes características del suelo encontrados en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.

Sitio	Profundidad (cm)	MO%	Da (Mg m ⁻³)	Arcilla (%)
Mixta	0-20	23,90	0,65	60,18
	20-40	22,63	0,70	54,72
Noche Buena	0-20	21,80	0,90	51,22
	20-40	17,96	0,90	41,97
Núcleo	0-20	21,99	0,64	49,47
	20-40	20,03	0,79	42,23
Pasto	0-20	27,36	0,70	62,27
	20-40	22,84	0,64	72,79
Puente Cajón	0-20	10,38	1,02	48,09
	20-40	9,33	1,26	49,31
Reventazón	0-20	15,17	0,64	53,65
	20-40	10,94	0,80	53,78

Elaboración propia

La materia orgánica que contiene el suelo viene de la descomposición vegetal y sus subproductos; son los microorganismos y material húmico [1], durante este estudio la materia orgánica encontrada en los sitios presentaba características parecidas al sitio tomado como testigo llamado Pasto, ya que las plantaciones establecidas son bastante jóvenes. En un futuro en los sitios que presentan cobertura forestal en los cuales la especie principal es *Araucaria hunsteinii* se produciría en su mayoría humus de tipo Mor y como es mencionado por Alvarado [13] este tipo de material

húmico tiende a acidificar el suelo, pero esta peculiaridad puede llegar a ser despreciable gracias a la cantidad de carbono que se almacena en el suelo.

Como se puede observar en el cuadro 2 el porcentaje de materia orgánica disminuye con respecto al aumento en la profundidad como es esperado ya que la mayor parte de la biomasa se encuentra en los primeros 20 cm de suelo, obteniendo el mayor porcentaje de materia orgánica en el sector de Pasto con 27,36% en la profundidad de 0-20 cm y el menor en el sector de Puente Cajón con 9,33% para la profundidad de 20-40 cm.

En cuanto a la densidad aparente se obtuvieron valores que oscilan entre 0,65 y 1,02 Mg m⁻³ para la profundidad de 0 a 20 cm donde el valor mínimo corresponde al sector de la finca Reventazón y el mayor al sector de Puente Cajón. Para la profundidad de 20 a 40 cm los valores oscilan entre 0,64 y 1,26 Mg m⁻³ donde el valor mínimo corresponde al sector de Pasto, ubicado dentro de la finca las Delicias y el mayor al sector de Puente Cajón al igual en la profundidad anterior. Estos valores en su mayoría tienden a aumentar conforme aumenta la profundidad del suelo como es esperado ya que es dependiente del porcentaje de materia orgánica del sitio y cobertura presente, concordando con los propuesto por Alvarado [14] para los suelos de tipo inceptisoles como los que se presentan en este estudio.

Por otra parte, los resultados del estudio de textura demuestran que los suelos muestreados en este trabajo pertenecen en su mayoría al grupo textural denominado Arcilloso lo cual concuerda con los estudios realizados por Martínez [7] y Fonseca [15] en sitios cercanos y bajo condiciones similares a los de este trabajo.

En el cuadro 2 se puede observar el porcentaje promedio de arcilla presente para cada uno de los sitios, donde el sector de pasto cuenta con el mayor porcentaje para las dos profundidades con 62,27% y 72,79% y los sitios con menor porcentaje de arcillas serian Puente Cajón con 48,09% para la profundidad de 0 a 20 cm y Noche Buena con 41,97% para la profundidad de 20 a 40 cm. Cabe rescatar que este tipo de textura es relacionada con buen almacenaje de Carbono en el suelo.

Carbono en el suelo

En el cuadro 3 se observan los valores de Carbono en el suelo presentes en los sitios estudiados en este trabajo para las dos profundidades muestreadas.

Cuadro 3. Valores de Carbono en suelo obtenidos en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.

Sitios	Profundidad		Promedio Sitios
	0-20	20-40	
Mixta	155,27	158,89	157,08
Noche Buena	196,07	162,22	179,14
Núcleo	140,82	159,00	149,91
Pasto	191,87	146,01	168,94
Puente Cajón	105,42	117,22	111,32
Reventazón	96,86	88,02	92,44
Promedios Profundidad	147,72	138,56	

Elaboración propia. Los valores de Carbono se presentan en unidades de Mg ha^{-1} .

El sitio que presenta mayor cantidad de C para las dos profundidades es Noche Buena con un promedio de $196,07 \text{ Mg ha}^{-1}$ de 0 a 20 cm y $162,22 \text{ Mg ha}^{-1}$ de 20 a 40 cm, por su parte el sitio con menor cantidad de C es el sector de Reventazón con un promedio de $96,86 \text{ Mg ha}^{-1}$ de 0 a 20 cm y $88,02 \text{ Mg ha}^{-1}$ de 20 a 40 cm.

Dentro de los valores obtenidos se puede notar que uno de los sitios en el que se presenta la mayor cantidad de Carbono en los primeros 20 cm de profundidad es el sector de Pasto donde la cobertura presente es la denotada como charral, sitio donde no se presenta ninguna perturbación. Esto se puede deber a los años que llevan de haber sido establecidas las plantaciones, a las prácticas utilizadas en el establecimiento de la masa forestal, y a que como se mencionó anteriormente la cero labranza es una de las prácticas que favorece para que no se muestre una pérdida en la cantidad de Carbono presente en el suelo.

En las figuras 1 y 2 se puede observar la interacción de los valores de carbono en los seis sitios muestreados en este trabajo para las dos profundidades.

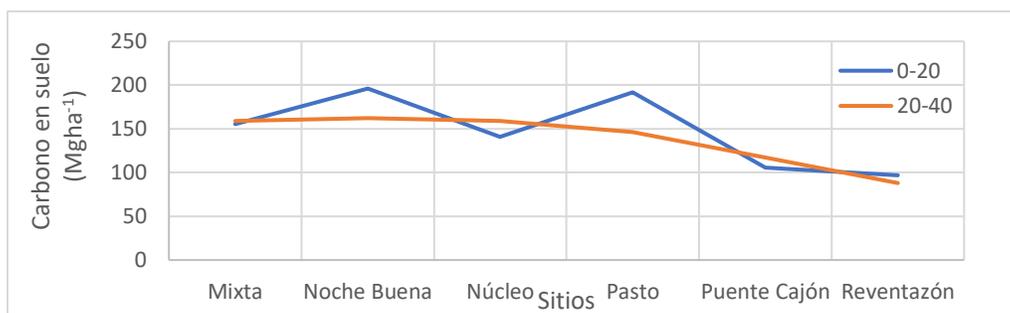


Figura 1. Interacción del Carbono en el suelo en seis sitios ubicados en la Zona Atlántica de Costa Rica por profundidad.

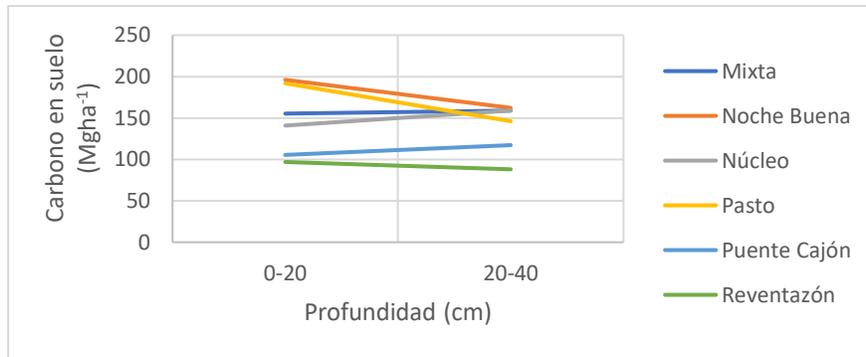


Figura 2. Interacción del Carbono en el suelo por profundidad en seis sitios ubicados en la Zona Atlántica de Costa Rica.

Con respecto al comportamiento de las cantidades de Carbono por sitio se puede observar en la figura 1 que para la profundidad de 0 a 20 cm hay mayor variabilidad que para la profundidad de 20 a 40 cm. A pesar de que como se explicará a continuación, no existe una diferencia significativa entre los valores de C obtenidos en las diferentes profundidades si se puede notar en la figura 2 que hay una interacción diferente en cuanto a la cantidad de C que se encuentra en cada uno de los sitios dependiendo de las profundidades esto puede deberse a las relaciones existentes con las diferentes características del suelo explicadas a más adelante; las cuales son mayormente explicadas por la presencia de MO y arcillas, las cuales se encuentran en su mayoría en los primeros 20 cm del suelo.

Por otra parte, los valores de Carbono en Suelo obtenidos presentaron un p mayor a 0,05 en las pruebas de normalidad realizadas, por lo que se procedió a someterlos a una prueba de Tukey que refleja que las medias de las muestras son significativamente diferentes según el sitio pero no así según la profundidad (cuadros 4 y 5), esto se puede deber según Coleman [16] a que la evaluación del

carbono secuestrado en el suelo presenta dificultades generales debido a su natural variabilidad como se menciona en Esquivel [3].

En el cuadro 4 y en la figura 3 se puede observar la clasificación en grupos de los seis sitios muestreados según las diferencias encontradas en las cantidades de Carbono, donde los sitios en los cuales se obtuvo mayor cantidad de C fueron Noche Buena y Pasto y por su parte los que tienen menor cantidad son Puente Cajón y Reventazón.

Cuadro 4. Diferencia en los valores de C para cada uno de los sitios muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.

Sitio	Promedio Sitio	Grupos
Noche Buena	196,07	a
Pasto	191,87	a
Mixta	155,27	b
Núcleo	140,82	b
Puente Cajón	105,42	c
Reventazón	96,86	c

Elaboración propia. Los valores de Carbono se presentan en unidades de Mg ha^{-1} .

Letras distintas indican diferencias significativas.

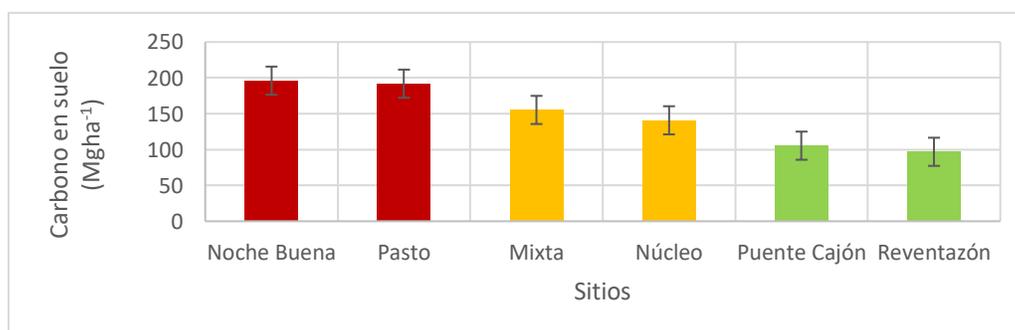


Figura 3. Diferencia en los valores de C para cada uno de los sitios muestreados en la Zona Atlántica de Costa Rica.

En el cuadro 5 y figura 6 se observa que no hay diferencias significativas en cuanto a la cantidad de Carbono presente según la profundidad.

Cuadro 5. Diferencia en los valores de C para cada profundidad muestreada en la Zona Atlántica de Costa Rica.

Profundidad	Promedio profundidad	Grupos
0-20	147,72	a
20-40	138,56	a

Elaboración propia. Los valores de Carbono se presentan en unidades de Mg ha^{-1} . Letras distintas indican diferencias significativas.

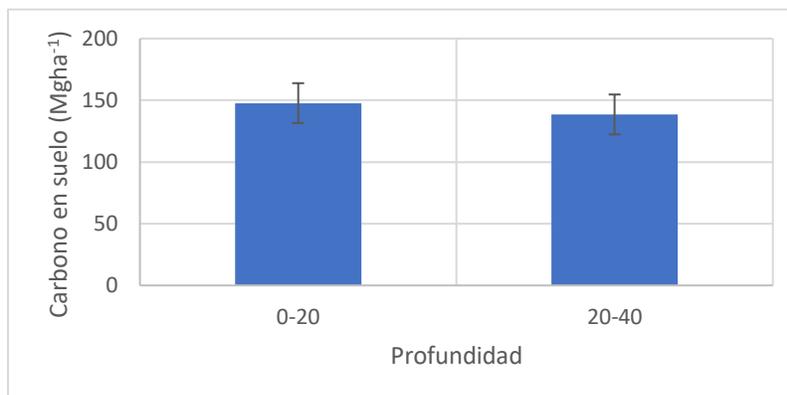


Figura 4. Diferencia en los valores de C para cada profundidad muestreada en la Zona Atlántica de Costa Rica.

En el cuadro 6 y figura 5 se puede observar la clasificación general en grupos de los seis sitios muestreados según las diferencias encontradas en las cantidades de Carbono en las dos profundidades tomadas en cuenta en este estudio, donde como ya se mencionó anteriormente los sitios en los cuales se obtuvo mayor cantidad de

C fueron Noche Buena y Pasto y por su parte los que tienen menor cantidad son Puente Cajón y Reventazón.

Cuadro 6. Diferencia en los valores de C para cada profundidad y sitio muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.

Sitio	Profundidad	Promedio C	Grupos
Noche Buena	0-20	196,07	a
Pasto	0-20	191,87	a
Noche Buena	20-40	162,22	b
Núcleo	20-40	159,00	b
Mixta	20-40	158,89	b
Mixta	0-20	155,27	b
Pasto	20-40	146,01	b
Núcleo	0-20	140,82	b
Puente Cajón	20-40	117,22	bc
Puente Cajón	0-20	105,42	c
Reventazón	0-20	96,86	c
Reventazón	20-40	88,02	c

Elaboración propia. Los valores de Carbono se presentan en unidades de Mg ha^{-1} .

Letras distintas indican diferencias significativas.

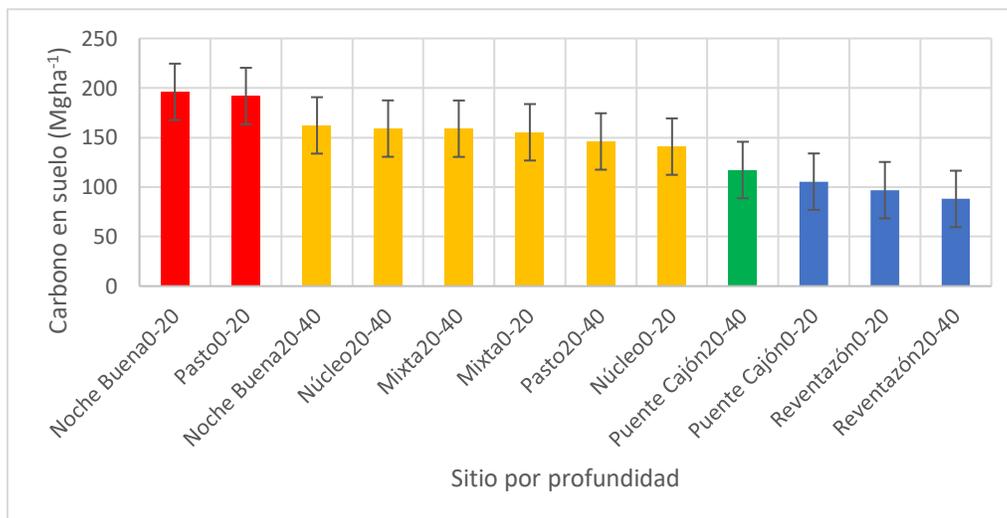


Figura 5. Diferencia en los valores de C para cada profundidad y sitio muestreados en la zona atlántica de Costa Rica.

Por otra parte, en cuanto a la duda de que exista una diferencia entre la cantidad de Carbono presente en el suelo con respecto a las características del suelo presentes en los sitios, en las figuras 6, 7 y 8, se puede observar que sí existen diferencias para este estudio, dependiendo además de la profundidad. Para las tres relaciones representadas en las siguientes figuras, el coeficiente de determinación (r cuadrado) logra explicar la proporción de la varianza de la variable Carbono con respecto a cada una de las características del suelo ya que el valor obtenido es superior al 88%. Además, la ecuación presenta lo que pasaría en caso de que la línea tocara el punto cero.

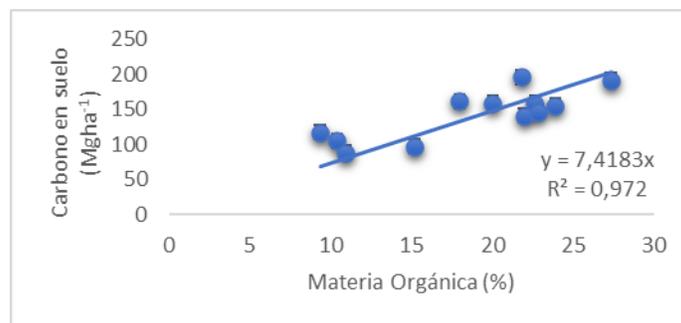


Figura 6. Contenido de Carbono en suelo con respecto al porcentaje de Materia Orgánica obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.

En la figura 6, se puede observar que en sitios con mayor porcentaje de materia orgánica se presentan también las mayores cantidades de Carbono en el suelo, demostrando como lo menciona Hernández [12] que el carbono está directamente relacionado al porcentaje de materia orgánica en el suelo.

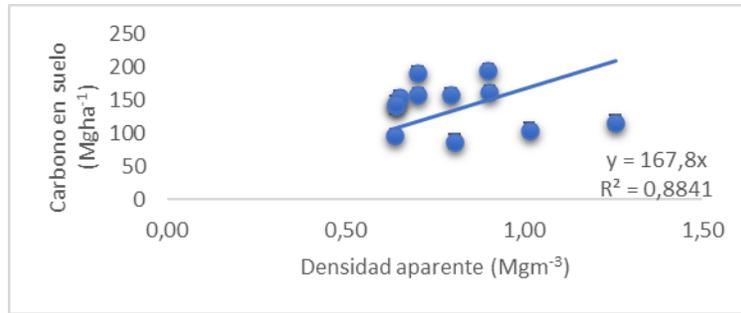


Figura 7. Contenido de Carbono en suelo con respecto a la densidad aparente del suelo obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.

Por su parte, en la figura 7 con respecto a la densidad aparente se puede observar que los sitios con mayor Da, presentan las mayores cantidades de C en el suelo; excepto por el sitio Puente Cajón que se presenta como un valor atípico para las dos profundidades ya que por su uso anterior el suelo presentaba mayor compactación que los demás sitios. Esta tendencia demuestra que la Da aparente está ligada al porcentaje de MO como se mencionó anteriormente.

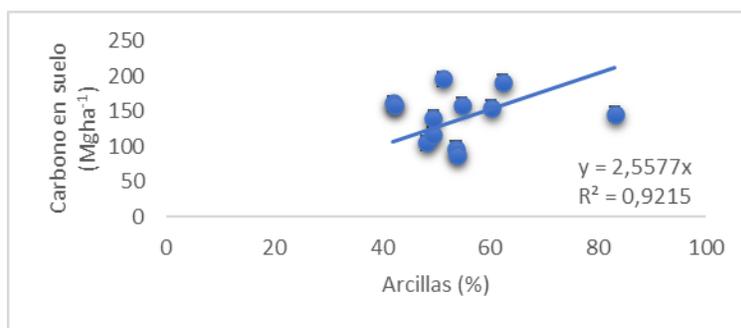


Figura 8. Contenido de Carbono en suelo con respecto al porcentaje de arcilla del suelo obtenido en seis sitios ubicados en la zona atlántica de Costa Rica, para las diferentes profundidades.

Aunque en el suelo se pueden encontrar porcentajes de limo y arenas, para este estudio se pueden despreciar, ya que como se observa en la figura 8, el contenido de C está relacionado con el porcentaje de arcillas presentes en el suelo aumentando a conforme este porcentaje aumenta.

Gracias a los análisis realizados y a pesar de los valores de Carbono en el suelo encontrados son significativamente diferentes según los sitios muestreados, los cuales presentaban diferentes coberturas en su mayoría plantaciones forestales mixtas, no se puede establecer una diferencia en el reservorio de Carbono en el suelo con respecto a la cobertura presente, ya que las plantaciones forestales tienen poco tiempo de haberse establecido y en todas las plantaciones se encuentra la especie *Araucaria hunsteinii* como punto en común por lo que la materia orgánica presente en los sitios es muy similar. Esto quiere decir que la diferencia de Carbono en los sitios puede deberse a las relaciones con las características del suelo explicadas anteriormente, a las técnicas de establecimiento, fertilización, entre otros y no a la cobertura en sí.

CONCLUSIONES

El sitio que presenta mayor cantidad de C para las dos profundidades es Noche Buena con un promedio de 196,07 Mg ha⁻¹ de 0 a 20 cm y 162,22 Mg ha⁻¹ de 20 a 40 cm, por su parte el sitio con menor cantidad de C es el sector de Reventazón con un promedio de 96,86 Mg ha⁻¹ de 0 a 20 cm y 88,02 Mg ha⁻¹ de 20 a 40 cm.

Se encontraron diferencias en cuanto a la cantidad de Carbono del suelo y las características presentes en el mismo, dependiendo además de la profundidad en la cual se realiza el estudio.

Las diferencias en la cantidad de Carbono en el suelo con respecto a las coberturas en cada uno de los sitios existentes pueden deberse a factores externos y no a la cobertura en sí.

RECOMENDACIONES

Se debería de establecer una línea de tiempo específica para realizar este tipo de estudio, para lograr obtener una base de datos que ayude a entender de una mejor manera el funcionamiento del suelo como reservorio de Carbono.

Para próximas tomas de datos se debería tomar en cuenta las propiedades químicas del suelo realizando un muestreo con mayor detalle, para determinar si tienen relación con la capacidad de retención de Carbono que tiene el suelo.

Además, se deberían de tener en cuenta los ciclos de fertilización y enmiendas en caso de que se realicen en estos sitios para saber cuál es su influencia en la cantidad de Carbono presente en los estudios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Rojas, S. Brenes, S. Abarca, “Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque”, *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, vol. 8, no. 1, pp. 68-96
- [2] E. Martínez, J. P. Fuentes, E. Acevedo, “Carbono orgánico y propiedades del suelo”, *Editorial Sede del Pacífico, Universidad de Costa Rica DOI: 10.15517/isucr.v23i47.47695*.
- [3] E. Esquivel, R. Rubilar, S. Sandoval, E. Acuña, J. Cancino, M. Espinosa, y F. Muñoz, “efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la región de biobío, Chile”, *Revista Árvore, Viçosa-MG*, v.37, n.6, p.1135-1144, 2013
- [4] W. Fonseca, “Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales”, *Ambientales*, 51(2), 91-109. 10.15359/rca.51-2.5
- [5] S. Álvarez, y A. Rubio, “Línea base de Carbono en bosque mixto de pino-encino de la sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo co2fix v.3.2.”, *Universidad Autonoma Chapingo*. 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005
- [6] FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT), “Soil carbon sequestration for improved land management”, *World soil reports* 96. Roma, IT. 58 p.

- [7] V. Martínez," Crecimiento y fijación potencial de carbono en plantaciones forestales mixtas de *Araucaria hunsteinii* en la zona atlántica, Costa Rica", *Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica*, Escuela de Ingeniería Forestal, Trabajo Final de Licenciatura Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura Cartago, Costa rica.
- [8]IMN, "Estaciones Automáticas", Recuperado en 5 de octubre de 2021, de: <https://www.imn.ac.cr/estaciones-automaticas>
- [9] E. Esquivel-Segura, R.A. Rubilar-Pons and J. Cancino-Cancino, "Efecto inicial de los residuos de aprovechamiento forestal en el carbono de un suelo granítico de Chile," *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 30, Dec 15, pp. 22.
- [10] F. MAGDOFF, "Soil organic matter fractions and implications for interpreting organic matter test", In: MAGDOFF F. M. T.; HANLON, E. A. (Ed.). Soil organic matter: analysis and interpretation. *Wisconsin: SSSA Special Publication*, 1996. v.46. p.11-20.
- [11] M. TABATABAI, "Soil organic matter testing: an overview", In: MAGDOFF F. M. T.; HANLON, E. A. (Ed.). Soil organic matter: analysis and interpretation. *Wisconsin: SSSA Special Publication*, 1996. v.46. p.1-9.
- [12] P. Hernández," Efecto de diferentes métodos de control de arvenses en las propiedades del suelo, en plantaciones de teca, *Tectona grandis*(L.f.)",

Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Trabajo Final de Licenciatura Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura Cartago, Costa Rica.

[13] A. Alvarado, y J. Raigosa, “Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales”, *Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo* 631.47 A472n.

[14] A. Alvarado, y W. Forsythe, “Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica”, *Agronomía Costarricense* 29(1): 85-94. ISSN:0377-9424 / 2005

[15] W. Fonseca, “Determinación del Carbono en el suelo en la finca las Delicias, (Sección Cutris), Guácimo, Limón”, *Repositorio Académico Institucional de la Universidad Nacional de Costa Rica*. Informe de consultoría.

[16] M. D. COLEMAN, “Comparing soil carbon of short rotation poplar plantations with agricultural crops and woodlots in North Central United States”, *Environmental Management*, v.33, p.S299-S308, 2004.