

Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque

Carbon in the soil: comparison between a pasture area and a forest

Jennifer Rojas-Solano

Estudiante, Escuela de Agronomía
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jrsolano93@hotmail.com

Saúl Brenes-Gamboa

Sede del Atlántico
Universidad de Costa Rica
Turrialba, Cartago, Costa Rica
saul.brenes@ucr.ac.cr

Sergio Abarca-Monge

Dirección de Investigación e Innovación
Instituto Nacional de Transferencia
Agropecuaria (INTA)
Turrialba, Cartago, Costa Rica
sabarca@inta.go.cr

RESUMEN: Se determinó la cantidad de carbono que aportan pastos de piso con respecto a un bosque. El estudio se realizó en Turrialba, Costa Rica. Se evaluó: concentración de carbono, carbono orgánico, densidad aparente y materia orgánica. El bosque capturó y almacenó más carbono que los pastos, pero la densidad aparente del suelo fue menor en los pastos. El pasto *Cynodon nlemfuensis* obtuvo los mayores valores para la concentración de carbono y biomasa aérea.

PALABRAS CLAVE: Sumideros de carbono, dinámica del carbono en pastos, captura de carbono

ABSTRACT: The objective was determining the amount of carbon that floor grasses contribute with respect to a forest. The study was carried in Turrialba, Costa Rica. It was evaluated: concentration of carbon, organic carbon, apparent density and organic matter. The forest captured and stored more carbon than the grasses, but the bulk density of the soil was lower in the grasses. In the grass *C. nlemfuensis*, it obtained the highest values for the concentration of carbon and aerial biomass.

KEYWORDS: Carbon sinks, pasture carbon dynamics, carbon sequestration

Recibido: 02-07-21 | Aceptado: 23-08-21

CÓMO CITAR (APA): Rojas-Solano, J., Brenes-Gamboa, S., Abarca-Monge, S. (2022). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *InterSedes*, 23(47), 184–205. DOI 10.15517/isucr.v23i47.47695

Publicado por la Editorial Sede del Pacífico, Universidad de Costa Rica

DOI: 10.15517/isucr.v23i47.47695

Introducción

El calentamiento global se define como el aumento de la temperatura y se debe al incremento de los gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI más importante y abundante, presente en todos los ecosistemas. El principal almacén de carbono, en ecosistemas forestales y vegetales, es el suelo. Por medio de la fotosíntesis, las plantas forman materias primas que son la base de estructuras como hojas, raíces o tallos, las cuales depositan el carbono que tienen en el suelo por medio de la materia orgánica como el follaje en los árboles al caer o también por el follaje de los pastizales y raíces (Ordóñez y Masera, 2017). Los efectos del calentamiento global se pueden limitar, según Cook-Patton *et al.*, (2020), se deben reducir las emisiones de GEI y capturar el exceso de dióxido de carbono atmosférico, y la regeneración de bosques naturales o la implementación de proyectos silvopastoriles, son estrategias que se pueden aplicar, pero se deben de realizar evaluaciones más precisas para medir su potencial.

El cambio climático y la ganadería tienen relación por ser esta última la actividad agrícola más extensa y más emisora de GEI en Costa Rica. Existe un lineamiento respecto al carbono y su neutralidad emitido en el 2007. Según la Estrategia de Ganadería Baja en Carbono, Costa Rica apoya la iniciativa francesa 4X1000 Suelos para la Seguridad Alimentaria y el Clima, lanzada en la COP 21, el cual procura un incremento de la materia orgánica y la captura de carbono en los suelos. Por lo tanto, es necesario conocer la dinámica de carbono en los suelos con coberturas de pastos. Además, el aporte de los diferentes pastos en comparación con los sistemas naturales, como el bosque.

Las fincas ganaderas con sistemas silvopastoriles, donde hay bosque, árboles dispersos y suelos gestionados, tienen gran potencial de retener carbono. Son una alternativa para disminuir el efecto invernadero. Al establecerse árboles y pasturas se contribuye a la captura de carbono y a incrementar la productividad ganadera en forma sostenible. Además de que colabora con el propósito de mitigar el cambio climático (Cárdenas *et al.*, 2015).

El bosque se confrontó con los pastizales, y se realizó una comparación entre tres distintos pastos: *Brachiaria decumbens*, *Brachiopará* (*B. arrecta* x *B. mutica*) y *Cynodon nlemfuensis*. Las variables

estudiadas fueron las siguientes: concentración de carbono, densidad aparente y carbono orgánico del suelo. En la segunda comparación, se evaluaron la materia orgánica, la biomasa aérea y la biomasa radical. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue determinar la cantidad de carbono orgánico que aportan al suelo tres pastos de piso en un sistema de ganadería de carne en comparación con el bosque.

Materiales y métodos

Descripción del sitio de estudio

La Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) se ubica en la ribera del río Tuis, Turrialba, Cartago, Costa Rica, la cual tiene como coordenadas geográficas: de latitud 9°52'00 N, longitud 83°38'22 W y una altitud de 646 m.s.n.m. La FEIMA tiene un área de aproximadamente 37 hectáreas (ha), divididas en tres secciones: agricultura (7.29 ha), ganadería (8,5 ha), y bosque, el cual es destinado a la conservación de los recursos naturales y abarca la mayor parte del área total de la finca con 20.77 ha. El trabajo se realizó de marzo a diciembre del 2019.

La particularidad del suelo en la FEIMA es que el material parental vino de otro sitio, precisamente donde se encuentra la represa de Angostura. Llegó ahí por acción del ser humano con ayuda de maquinaria hace aproximadamente 20 años, por lo que se clasifica en la categoría de los antropoles. Su nombre deriva del término griego *anthropos* que hace referencia a su origen humano. La evolución de este tipo de suelos no se produce en forma inmediata y se modifica según el manejo que les den. En el sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy la mayoría de los antropoles se incluyen en el orden de los inceptisoles (Cascales *et al.*, 2012).

El sistema de ganadería es agrosilvopastoril cuya producción pecuaria, en este caso, es con ganado vacuno, que convive con especies leñosas perennes como los árboles, arbustos y pastos mejorados, que interactúan bajo un mismo manejo integrado. En total hay 34 apartos que miden aproximadamente 2500 m² cada uno. En cada apto el ganado ingresa y se mantiene por uno o dos días según la cantidad de pasto disponible, con el fin de alcanzar un

periodo mínimo de descanso de 34 días o más para la recuperación del pasto. Por lo general, siempre se mantienen un total de 20 animales, todos de la raza brahman y 1.8 unidades animales por hectárea por año (Brenes, S., comunicación personal, 4 noviembre del 2017).

El área de pastizales cuenta con cinco distintos pastos de piso. Sin embargo, se seleccionaron tres especies para el estudio: *Brachiaria decumbens*, brachipará (*B. arrecta* x *B. mutica*) y el pasto *Cynodon nlemfuensis* (tabla 1). Los tres tipos de pasto tienen unos 10 años de haberse establecido y son los más antiguos en comparación con los demás.

TABLA 1

INFORMACIÓN COMPARATIVA ENTRE LOS TRES TIPOS DE PASTOS DE PISO EN LA FEIMA. TURRIALBA, 2019

Pastos	B. decumbens	Braquipará	C. nlemfuensis
Nombres comunes	Pasto alambre, Pasto peludo	Pará grass, Búfalo grass	Estrella Estrella africana
Rendimiento (MS/ton/ha/año)	8-20	5-12	12-18
Familia	Gramínea	Gramínea	Gramínea
Ciclo vegetativo	Perenne	Perenne	Perenne
Propagación vegetativa	Semilla vegetativa	Material vegetativo	Semilla vegetativa
Tipo de crecimiento	Cepas	Estolones y rastrera	Estolones y rastrera
Altura	0.6-1.0 m	0.5-1.0 m	0.5-1.0 m
Tolera	Quema, sequía, suelos ácidos	Encharcamiento y sequía	Sequía, encharcamiento
No tolera	Sombra y sobre pastoreo	Sequía extrema	Sequía extrema
Precipitaciones	1,000 a 3,500 mm/año.	1,000 a 4,200 mm/año.	800 a 2,500 mm/año.
Altitud	0 a 1,800 msnm	0 a 1,500 msnm	0 a 1,700 msnm
Uso	Pastoreo, heno y ensilaje	Pastoreo	Pastoreo, heno

Fuente: Suárez y Alfonso, 2012; Cerdas y Vallejos, 2012; Peters *et al.*, 2011.

VARIABLES ESTUDIADAS

Carbono

El carbono se une con el oxígeno para formar CO_2 , este gas es absorbido por las plantas por medio de las estomas y son transportados a los sitios específicos donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Lo que la planta logra fijar es convertido en carbohidratos para luego formar los tejidos de la planta, raíces, tallos, hojas e inflorescencia (Martínez *et al.*, 2013). Después de que el ganado se alimenta del pasto, las plantas y raíces mueren al ser descompuestos por los microorganismos vivos. Estos tejidos son ricos en carbono y se mantienen en el suelo, forman materia orgánica y esta incorpora el carbono orgánico del suelo (Harvey *et al.*, 2018).

Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de las principales componentes del suelo. El COS es el resultado del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de carbono del suelo en forma de CO_2 a la atmósfera, por erosión y lixiviación (Aguilera, 2000). Cuando se trata de CO_2 , el secuestro de COS comprende tres etapas: 1) la extracción del CO_2 de la atmósfera por medio de la fotosíntesis de las plantas; 2) la transferencia de carbono del CO_2 a la biomasa vegetal, y 3) la transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva. La cantidad de COS almacenada en un suelo depende del equilibrio que existe entre la cantidad de carbono que entra y la que sale del suelo como gases de respiración basados en carbono, procedentes de la mineralización microbiana y, en menor medida, de la lixiviación del suelo, erosión o deposición del suelo (Lefèvre *et al.*, 2017).

Materia orgánica

La materia orgánica que contiene el suelo viene de la descomposición vegetal y sus subproductos; son los microorganismos y material húmico. Cuanto mayor es la cantidad de materia orgánica presente en el suelo habrá más carbono y mejor será la calidad del suelo. Algunos de los beneficios de la materia orgánica en el suelo

son los siguientes: liberación y disponibilidad de los nutrientes en las plantas, determina la retención y mejora la infiltración de agua, almacena los nutrientes que aportan las plantas. También, absorbe la radiación solar, la cual influye en la temperatura del suelo. La materia orgánica del suelo proporciona carbono y energía a los microorganismos del suelo (Álvarez y Biancucci, 2006).

Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3 o ton/m^3). Este indicador describe la compactación del suelo (Lefèvre *et al.*, 2017). Los valores aumentan con la profundidad del suelo por la reducción de la actividad biológica que sí existe en los primeros centímetros del perfil, el incremento de arena en el suelo, la migración de partículas de arcilla hacia horizontes más profundos y cuando aumenta el contenido de la fracción mineral (Alvarado y Forsythe, 2005).

Biomasa aérea

La medición de la biomasa disponible en las pasturas brinda información para las fincas ganaderas debido a la relación directa que existe entre el material consumido por día por los animales en pastoreo y la existencia de biomasa en los apartos. La biomasa aérea es la principal fuente de alimentación en los sistemas productivos (Villalobos *et al.*, 2013).

Biomasa radical

La biomasa radical se define como parámetro que mide la cantidad de biomasa de raíces por unidad de área, determinada a una profundidad de muestreo definida. El sistema radical puede variar en longitud y área, según las especies y características ambientales (Jiménez y Arias, 2004). Las raíces se necesitan principalmente para el crecimiento y la sobrevivencia de las plantas.

En las gramíneas, la biomasa total de raíces decrece rápidamente desde las capas superficiales a las profundas del suelo por dos factores: el primer factor es la forma de vida, lo cual entre las gramíneas constituyen un tipo funcional homogéneo en cuanto a la distribución de raíces. El segundo factor son las condiciones ambientales. Los árboles y arbustos tienen sistemas radicales más

profundos, le siguen las hierbas y gramíneas perennes, suculentas y, por último, las plantas anuales (Ferrante, 2003).

La biomasa radical se determinó mediante el sistema informático WinRhizo al determinar la densidad radical longitudinal (RLD) en el área explorada por el barreno Riverside la cual es de $1,452\text{cm}^3$. Es expresada en cm de raíz por cm^3 de suelo.

Determinación del carbono en el suelo

Tipo de muestreo

Como criterio para escoger el lugar donde se realizaron las calicatas, se consideraron las directrices sobre la medición y modelación de las reservas de carbono en el suelo y los cambios en la existencia en los sistemas de producción ganadera “Guidelines for Measuring Soil Carbon Stocks and Stock Changes in Livestock Production Systems” (FAO, 2018). Las etapas del muestreo se detallan a continuación: a. Muestrea el área representativa, esto depende del área del aparcamiento y que esté completamente cubierto por el pasto. b. Dividir el área en un número de unidades homogéneas, llamadas estratos y se aplica un muestreo aleatorio dentro de cada estrato, para reducir la incertidumbre. c. Por ser un sistema silvo-pastoril, puede ser en sombra o efecto directo del sistema radical. d. Los pastos por evaluar, deben tener una cobertura de un 100 % y que no esté mezclado con otro tipo de pasto o malezas. e. Tener una distancia considerable con respecto al bosque, que no haya sombra de 10 metros. f. Considerar la topografía (plana o con un porcentaje bajo de pendiente) y que este represente al área de estudio.

Ubicación de calicatas

Se realizaron en total once calicatas, que se realizaron a mano y con una pala. Un total de tres calicatas en cada tipo de pasto y dos en el bosque, como se detalla en la siguiente tabla.

TABLA 2

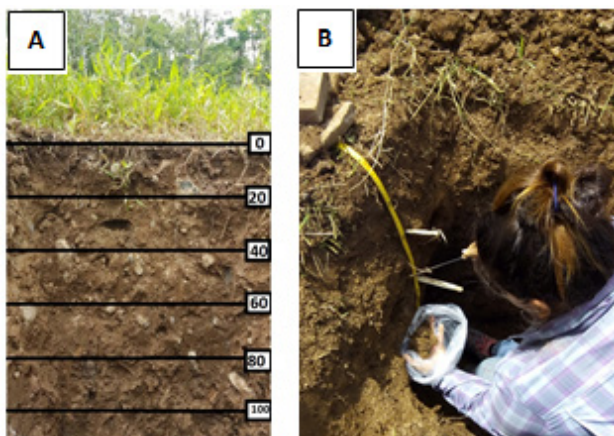
UBICACIÓN DE LAS CALICATAS SEGÚN EL TIPO DE COBERTURA EN LA FEIMA, TURRIALBA, COSTA RICA. 2019

Cobertura		Ubicación de la calicata	
<i>B. decumbens</i>	J-2	N09.864806	W083.637010
	J-4	N09.864690	W083.636677
	J-6	N09.864383	W083.636355
Brachipará	B-19	N09.864024	W083.635227
	B-20	N09.864066	W083.635089
	B-23	N09.863506	W083.635454
<i>C. nlemfuensis</i>	P-13	N09.863311	W083.637197
	P-14	N09.863337	W083.637909
	P-15	N09.863390	W083.637686
Bosque	1	N09.865287	W083.636344
	2	N09.864111	W083.634572

Cada calicata tuvo una profundidad de 1m del perfil del suelo, se dividió en segmentos de 20 cm a lo largo de la calicata (figura 2A). Las muestras se recolectaron con la ayuda de un machete en bolsas plásticas de aproximadamente 1 kg, en total se recolectaron diez muestras, dos por cada segmento de 20 cm (figura 2B).

FIGURA 1

A) DEMOSTRACIÓN DE LAS DIVISIONES EN EL PERFIL DEL SUELO EN CALICATA Y B) RECOLECCIÓN DEL SUELO EN LA CALICATA



Las muestras se enviaron al laboratorio de suelos del Instituto de Investigación y Transferencia Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería (INTA), en Ochomogo de Cartago, debidamente rotuladas con la numeración asignada para un mejor control. En el muestreo de densidad aparente se utilizaron cilindros metálicos de 5 cm de diámetro y de longitud, se tomó una muestra para cada segmento de 20 cm, con la ayuda de un martillo y una pieza de madera dura, como se observa en la figura 3.

FIGURA 2

A) Y B) INTRODUCCIÓN DEL CILINDRO AL PERFIL DEL SUELO, C) RECOLECCIÓN DEL SUELO EN BOLSA PLÁSTICA DESPUÉS DE RETIRAR EL CILINDRO



Las muestras para densidad aparente se trasladaron al laboratorio en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en una bolsa plástica con la numeración asignada. Figura 3C.

Procesamiento de las muestras

Para la determinación de carbono orgánico y materia orgánica se utilizó el método de Dumas,¹ para lo cual se pesó 0.05-0.07g de la muestra sólida del suelo y se encapsuló en una triple cápsula de estaño. Se colocó en una placa de acero inoxidable de forma ordenada sobre una placa calefactora llamada analizador. Este analizador también conocido como horno, se mantuvo a una tempera-

¹ Ramírez, S. (7 mayo del 2019). Metodología utilizada en el laboratorio (correo electrónico). San José, Costa Rica, INTA.

tura de alrededor de 120 °C. Contenía únicamente oxígeno puro, lo cual provocó que los gases atmosféricos se oxidaran, durante el proceso se le añadió tres veces 100 microlitros de HCl 2 mol/L hasta que se destruyeran todos los carbonatos, hasta que la muestra dejó de producir efervescencia. Se dejaron secar las muestras durante 8 horas y así eliminar el agua formada. El último paso fue introducirlo en el automuestreador, el cual por medio de la detección infrarroja dio a conocer la concentración del carbono y porcentaje de la materia orgánica.

Para la determinación de la densidad aparente, primeramente, la muestra se traspasó a bolsas de papel rotuladas y se introdujeron en la estufa por 48 horas a una temperatura de 105 °C. El secado se realizó para eliminar el agua del espacio poroso y agua. Al final se saca la muestra de la estufa, se dejó enfriar por 20-30 minutos y se pesó en balanza granataria. Con esto se obtuvo el peso seco de las partículas sólidas del suelo. La fórmula para el cálculo de la densidad aparente del suelo es la siguiente:

$$D_A = \frac{P_s}{V}$$

D_A : densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$).

P_s : peso seco del suelo (g).

V: volumen del cilindro (cm^3) el volumen predeterminado es de $98,1 \text{ cm}^3$.

Luego, con la concentración del carbono y la masa de suelo en volumen conocido (D_a) se calculó la masa (en peso) del COS.

$$SOC_i \text{ (in Mg C ha}^{-1}\text{)} = OC_i \times ESM \times (1 - vGi) \times 1,000,000$$

La ecuación de la FAO (2018). En donde:

SOC_i (in Mg C ha^{-1}): carbono orgánico del suelo (ton/ha).

OC_i : concentración de carbono (% o mg/g).

ESM : densidad aparente (g/cm^3).

$(1 - vGi)$: Profundidad de la muestra (cm).

1, 000,000: factor de conversión a hectárea.

Determinación de la biomasa aérea

Tipo de muestreo

Muestreo completamente al azar.

Instrumentos de campo

Marco de 1x1 metros, machete (cuchillo 65 cm), cinta métrica, balanza electrónica de dos dígitos, marca Ocony modelo SS ($\pm 0,01g$) y bolsas plásticas 50 x 50 cm (tipo jardineras).

Metodología para el muestreo

Para cada tipo de pasto se muestrearon en tres apartos (los mismo que anteriormente se utilizaron para las calicatas). En cada aparto se lanzó el marco (1x1m), cinco veces, sin ver dónde caía para que el ojo humano no tuviera interferencia con el punto de muestreo.

El muestreo se realizó minutos antes del ingreso del ganado, esto con el propósito de conocer la oferta de biomasa inicial. Se procedió a cortar el tejido vegetal que constituyó en toda la biomasa aérea a una altura de 10 cm sobre la superficie del terreno, esto con el fin de homogenizar el procedimiento de muestreo. El pasto cosechado se recolectó en una bolsa plástica y se le determinó el peso fresco con una balanza electrónica.

Procesamiento de datos

Con las cinco repeticiones para cada tipo de pasto, se completó la información en una hoja de Microsoft Excel, se calculó el promedio para poder extrapolar el dato en kg/ha y conocer la oferta de pasto antes de que el ganado ingresara de nuevo a la pastura (aparto) después del periodo de descanso.

Determinación de la biomasa radical

Tipo de muestreo

Muestreo completamente al azar. Barreno para raíces tipo Riverseide, bolsas plásticas, pinzas, tamiz de laboratorio y sistema informático WhiRhizo.

Metodología para el muestreo

Para cada tipo de pasto se realizaron cinco perforaciones con el barreno Riverside, a una profundidad de 18,5 cm en el perfil del suelo.

FIGURA 3

MUESTREO DE RAÍCES CON EL BARRENO RIVERSIDE



Procesamiento de datos

Los datos de cada muestra de raíz, según su origen, se procesaron con el programa WinRhizo, sistema informático que analiza la cantidad y distribución de las raíces en el suelo. De esta forma, se obtuvo un histograma que proveyó información sobre diversos parámetros como la morfología, área, volumen, densidad, apariencia, arquitectura, ramificación, color, presencia de relaciones simbióticas y estado sanitario, entre otros. Sin embargo, los parámetros que se estudiaron en este análisis fueron densidad radical longitudinal y el área.

Análisis estadístico

Se realizó una comparación de las coberturas (bosque y pastos) por medio de la Prueba de T de Student para cada profundidad (cada 20 cm) de las calicatas. Posteriormente, se realizó una Prueba de F y una comparación de medias para cada profundidad entre pasturas con las tres especies predominantes: *Cynodon nlemfuensis*, *Brachiaria arrecta* x *B. mutica*, *Brachiaria decumbens* y el bosque.

Resultados y discusión

Concentración de carbono (%C)

En la tabla 3, se presentan los resultados de la concentración de carbono en forma independiente para cada profundidad entre las coberturas de bosque y las tres especies de pasto predominantes en las pasturas.

TABLA 3

VARIACIÓN DEL CARBONO DE SUELO CON COBERTURA CON BOSQUE Y ESPECIES DE PASTO POR CADA PROFUNDIDAD

Profundidad (cm)	Bosque	Carbono (%)		
		<i>C.nlemfuensis</i>	<i>B.decumbens</i>	Braquipará
0-20	0,94 a	1,99 a	1,68 a	1,40 a
20-40	1,03 a	0,76 a	0,41 a	0,69 a
40-60	0,45 b	0,58 a	0,46 b	0,43 b
60-80	2,03 a	0,12 c	0,29 b	0,30 b
80-100	1,61 a	0,32 b	0,33 b	0,42 b

Medias con letra en común en una misma fila no difieren significativamente ($p > 0,05$).

No hubo diferencias significativas entre las tres especies pastos y el bosque en relación con la concentración de carbono para las primeras dos profundidades entre 0-20 cm y 20-40 cm. En la profundidad 40-60 y 60-80 cm el pasto estrella presentó diferencias con respecto a las otras especies de pasto y el bosque. El bosque presentó valores significativamente más altos que las pasturas.

Es importante resaltar que entre los tres pastos hubo características similares como, por ejemplo, todas pertenecen a la familia Poaceae (Gramíneas) con metabolismos fotosintético tipo C4, todos son coberturas utilizadas para la ganadería con la misma carga animal y manejo. También, se encontraron entre los valores aceptables de altitud y precipitación como lo indica el cuadro dos. Los resultados se consideran bajos en relación con los reportados por Abarca *et al.* (2018), en suelos que pasaron de bosques a pastos. Los resultados concuerdan con Wiesmeier *et al.* (2019), que especifican que las características topográficas desempeñan un papel importante para el almacenamiento de carbono en suelo. Por ejemplo, el pasto *C. nlemfuensis* que se encuentra en un lugar

plano, con poca inclinación y sin curvaturas, existe un favorecimiento por un aumento la humedad del suelo y disponibilidad de nutrientes. Esto a su vez, provoca el desarrollo de más la actividad microbiana y el consecuente aumento del porcentaje carbono que se deposita y el carbono orgánico que aumenta. Caso contrario es el pasto braquipará, pero con tendencia menor en el pasto *B. decumbens*, ambos tienen pendientes y las curvaturas pronunciadas que ayudan a que el agua de lluvia, sea descargada fácil y rápidamente. Esto no permite un ambiente apto para los microorganismos, que solo pueden trabajar cuando hay humedad adecuada y por lo tanto no depositan mucho carbono en el suelo (Wiesmeier *et al.*, 2019).

Densidad aparente (Da)

La densidad aparente mostró diferencias entre las especies de pasto y el bosque para cada profundidad. La FEIMA es un silvopastoril con pastoreo con una Da de alrededor de 1 g/cm³ en las distintas coberturas (tabla 4) y resulta menor en comparación con los autores mencionados. No obstante, las bajas concentraciones de carbono en la pastura de *Decumbens* pueden estar asociada a una menor densidad aparente en el perfil del suelo estudiado, lo que permite una mayor percolación del carbono a capas más profundas, lo cual ha sido mencionado por Abarca *et al.* (2018).

TABLA 4

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE CON COBERTURA CON BOSQUE Y ESPECIES DE PASTO POR CADA PROFUNDIDAD

Profundidad (cm)	Bosque	<i>C.nlemfuensis</i>	<i>B.decumbens</i>	Braquipará
	Densidad aparente (g/cm ³)			
0-20	1,31 a	1,1 ab	0,96 ab	0,92 b
20-40	1,42 a	1,19 ab	1,03 b	1,07 ab
40-60	1,57 a	1,09 c	1,2 b	1,23 b
60-80	1,14 a	1,34 b	1,33 b	1,37 b
80-100	1,15 a	0,88 b	1,23 a	1,02 a

Medias con letra en común en una misma fila no difieren significativamente ($p > 0,05$)

Leyva *et al.* (2018) mencionan que la densidad aparente en un silvopastoril se maneja entre 1,12-1,35 g/cm³ en los primeros 20

cm del perfil del suelo. Además, especifica que en un sistema silvo-pastoril con pastoreo intensivo mantienen una Da de 1,66 g/cm³ (Roncallo *et al.*, 2012).

Carbono orgánico del suelo (COS)

En la variable del carbono orgánico del suelo (tabla 5), no existen diferencias significativas entre los suelos con las coberturas estudiadas para la profundidad 0-20 cm. En la siguiente profundidad, la cual es de 20-40 cm, el bosque presentó el mayor valor de COS.

TABLA 5

VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO CON COBERTURA CON BOSQUE Y ESPECIES DE PASTO POR CADA PROFUNDIDAD

Profundidad (cm)	Bosque	<i>C. nlemfuensis</i>	<i>B. decumbens</i>	Braquipará
	Carbono orgánico del suelo (ton/ha)			
0-20	28,67 a	43,50 a	31,45 a	26,05 a
20-40	29,03 a	18,14 ab	8,26 b	14,38 b
40-60	11,08 a	12,69 a	11,09 a	10,77 a
60-80	50,18 a	4,41 b	7,73 b	8,03 b
80-100	41,86 a	6,07 b	8,10 b	8,2 b

Medias con letra en común en una misma fila no difieren significativamente ($p > 0,05$)

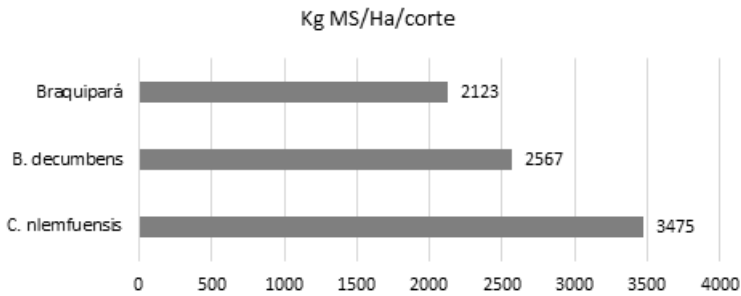
Entre el suelo del pasto *C. nlemfuensis* y el del pasto *B. decumbens* existe una diferencia de 12 ton/ha de COS en los primeros 20 cm del perfil del suelo. La concentración del carbono orgánico se encuentra entre los 0-20 cm y reducen más de la mitad del COS a partir de los 40 cm de profundidad de la calicata. Ello concuerda con la FAO (2018), que especifica que la entrada del COS se debe a la perturbación biológica del suelo y que principalmente ocurre por el sistema radicular de las plantas. Además, las posibles explicaciones para las diferencias que presenta los pastos con el COS entre especies podrían estar relacionadas con diferencias en la composición del material vegetativo, lo que a su vez afectaría sus tasas y patrones de descomposición (Fisher *et al.*, 2007).

Biomasa aérea

El cálculo se hizo después de un periodo de descanso de 34 días, como se observa en la figura 5, *C. nlemfuensis* produjo la mayor cantidad con 3 475 kg MS/ha, seguido por el pasto *B. decumbens* con unos 2 500 kg MS/ha.

FIGURA 4

OFERTA DE BIOMASA COMESTIBLE EN KILOGRAMOS DE MATERIA SECA SEGÚN LA COBERTURA DE PASTO EN LA FEIM



Biomasa radical

La cantidad y distribución de las raíces en el perfil del suelo es el resultado de la interacción del clima, el suelo, el genotipo y el manejo que se dé (Valenzuela y Wilson, 1987). Por eso se dio la importancia de conocer la biomasa radical en la FEIMA con los tres pastos estudiados. Se observa la RLD de las cinco muestras tomadas para cada pasto. Nuevamente, el pasto *C. nlemfuensis* obtuvo los valores mayores en comparación con los otros dos pastos. El promedio de dicho pasto fue de 11,800 cm/m^3 (Tabla 6), seguido por el pasto braquiaparà con 7,800 cm/m^3 , y, por último, el pasto *B. decumbens* con 5,800 cm/m^3 .

TABLA 6

RLD EXPRESADAS EN CM/M³ DE LOS TRES PASTOS ESTUDIADOS

Muestra	<i>B.decumbens</i>	<i>C. nlemfuensis</i>	BraQUIPARÁ
1	11,557	15,854	5,718
2	6,109	14,611	7,046
3	6,449	14,800	4,623
4	8,132	11,792	7,329
5	4,265	10,202	9,400

En la tabla 6, se demuestra que el pasto *C. nlemfuensis* tiene mayor longitud de raíces, (el doble que el pasto *B. decumbens*), lo cual mantiene el comportamiento mayor como el presentado en las demás variables evaluadas: C, COS y biomasa aérea.

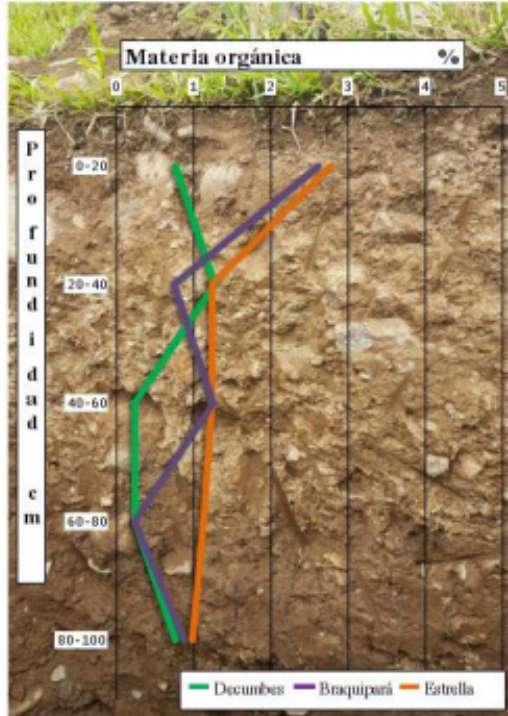
Materia orgánica

La materia orgánica representa la mayor reserva de COS y la cantidad registrada está controlada por procesos tanto bióticos como abióticos, en donde se realiza la descomposición de los restos de planta y animales (FAO, 2018). Los suelos que sustentan los pastos *C. nlemfuensis* y braQUIPARÁ presentaron los valores mayores más altos para la materia orgánica (figura 6), con un porcentaje de 2,80 y 2,60 respectivamente. El comportamiento de los contenidos de materia orgánica, fue muy similar entre los tres pastos. En braQUIPARÁ y estrella se redujeron después de los 40 cm de profundidad en las calicatas.

Roncillo *et al.* (2012) en un estudio compararon dos suelos: uno bajo un sistema silvopastoril y otro con monocultivo, a dos profundidades 0-20 cm y 20-40 cm. Por medio del análisis químico de muestras de suelo, encontraron que el silvopastoril obtuvo el mayor porcentaje de materia orgánica de 2,07 % (a una profundidad de 0-20 cm) y 1,81 % (a una profundidad de 20- 40 cm), al compararlo con los resultados del sistema bajo un monocultivo de gramínea con el pasto kikuyina (*Bothriochloa pertusa*) de 1,49 % a los 0-20 cm y que se reduce a 0,46 % después de los 20 cm de profundidad.

FIGURA 5

PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN RELACIÓN CON LA PROFUNDIDAD SEGÚN LA COBERTURA DE PASTO EN LA FEIMA, TURRIALBA, 2019



Los resultados concuerdan con Montenegro y Abarca (2002), los cuales indican que la mayor concentración de carbono en el suelo los primeros 20cm es debido a la alta tasa de crecimiento aérea y radical. Con *C. nlemfuensis* se obtuvo una biomasa aérea, radical, además la materia orgánica mayor en comparación con los demás pastos.

Se comprueba que el sistema silvopastoril aumenta el COS, por medio de la deposición de las hojas de los árboles y las raíces más profundas de los árboles. La FEIMA es en general, un sistema silvopastoril y los pastos estudiados son Gramíneas, se observa que la única diferencia es que los contenidos de la materia orgánica no aumentaron después de los 20 cm.

Conclusiones y recomendaciones

El objetivo del estudio fue conocer cuál ecosistema (bosque y pasturas) y cuál de los tres tipos de pasto capturaba más carbono orgánico en el suelo. Además, saber la cantidad de biomasa aérea en cada tipo de pasto, con el propósito de brindarles información a los ganaderos sobre la cantidad en kilogramos por hectárea para el conocimiento de la producción de forraje en esa área, clima, topografía y manejo. Por último, la información radical fue por medio de un método novedoso, el WinRhizo, con el propósito de brindar información nueva en referencia a los pastos.

Es importante recordar que el suelo es un antrosol, que fue formado hace 20 años por el ser humano. No hubo un control del tipo y cantidad de sustratos depositados, por ende, la deposición de las variables estudiadas de la materia orgánica, ha sido solo por los 20 años de actividad y es de esperar que su deposición no haya sido más allá de los 20 cm superiores del suelo.

Se observó que el suelo con la cobertura boscosa capturó más COS en relación con los tres pastos. Bajo las condiciones de este estudio, en la comparación entre especies de pastos, la estrella africana (*C. nlemfuensis*) obtuvo el valor más alto en todas las variables estudiadas (COS, biomasa aérea y biomasa radical), seguido por el suelo del brachipará y, por último, el suelo con la cobertura del pasto *B. decumbens*.

C. nlemfuensis obtuvo los valores más altos en la biomasa aérea, radical y materia orgánica, variables importantes para la captura de carbono, ya que el carbono es capturado por medio de las plantas, principalmente la biomasa aérea, almacenado en el suelo por las raíces y por medio de la descomposición del material vegetal que con el tiempo es transformado en materia orgánica. Dichos factores ocasionaron que el pasto obtuviera el valor más alto también en el COS.

Se debe considerar que los resultados de esta investigación se obtuvieron en un clima, una topografía, un sistema de manejo específico, con una carga animal definida, entre otros aspectos. La actividad ganadera silvopastoril es un sistema al tomar todos los factores que intervienen en la captura de carbono y producción del forraje. Si bien es cierto que puede ser funcional para productores cercanos con explotaciones similares, es importante conocer la captura en cada finca.

La investigación sobre la captura de carbono en pastos se debe realizar, tanto a nivel nacional como mundial. Se pudieron conocer las diferencias entre un pasto en comparación con otro, fue notable, más de 10 ton/ha de carbono es significativo. De acuerdo con el lineamiento sobre carbono neutral mencionado al principio, es posible concluir que la FEIMA con el bosque, árboles dispersos y suelos con las pasturas estudiadas, cuenta con un gran potencial de absorber, retener y acumular carbono en el suelo. Disminuye las cantidades de carbono presentes en la atmósfera, cuya alta concentración favorece el cambio climático.

Referencias

- Abarca, S., Soto, R. y Arguedas, F. (2018). Carbono orgánico, nitrógeno y densidad aparente en suelos de fincas con ganadería bovina de cría. *Alcances Tecnológicos INTA*, 12(2), 25-29.
- Aguilera S., S. (2000). *Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos*. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121065>.
- Alvarado, A. y Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94.
- Álvarez, P. y Biancucci, M. (2006). *Ciclo del carbono: Materia orgánica y humus*. Universidad Nacional del COMAHUE. <http://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Alvarez-y-Biancucci-20061.pdf>.
- Cárdenas, E., Bustamante, A., Espitia, J. y Páez, A. (2015). Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria* (24), 51. <https://doi.org/10.19052/mv.1339>.
- Cascales, L., Chaparro, A. y Riquelme, A. (2012). Suelos y agricultura. Los Anthrosoles: Evolución, importancia y distribución. <https://xdoc.mx/preview/suelos-y-agricultura-los-anthrosoleswrb-5f93a91bcdecc>
- Cerdas, R. y Vallejos, E. (2012). Productividad del pasto Brachipará (*B.arrecta x B.mutica*) con varias dosis de nitrógeno y frecuencias de corte en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Electrónica de*

- las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*, 14(5), 28-42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66630511>.
- Cook-Patton, S.C., Leavitt, S.M. y Gibbs, D. (2020). Mapping Carbon Accumulation Potential from Global Natural Forest Regrowth. *Nature*, 585, 545–550. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2018). *Measuring and Modelling Soil Carbon Stocks and Stock Changes in Livestock Production Systems*. FAO. <http://www.fao.org/3/I9693EN/i9693en.pdf>.
- Ferrante, D. (2003). *Distribución del agua en el suelo y su relación con la estructura radical y producción de biomasa de tres tipos funcionales, en un pastizal de la Estepa Magallánica seca, Santa Cruz*. Universidad Nacional de la Patagonia Austral.
- Fisher, J., Santos, R Dos., Alves, B., Boddey, M., Braz, P., Urquiaga, S. y Boddey, R. (2007). Another Dimension to Grazing Systems: Soil Carbon. *Tropical Grasslands*, 41, 65-83. http://www.tropicalgrasslands.asn.au/TropicalGrasslandsJournal_archive/PDFs/Vol_41_2007/Vol_41_02_2007_pp65_83.pdf.
- Jiménez, C. y Arias, D. (2004). Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en una gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(2), 44-63.
- Harvey, C., Ibrahim, M., Mora, J. y Mauricio, D. (2018). *La conservación de la 70 biodiversidad en sistemas silvopastoriles Potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la Generación de Servicios Ambientales* [sesión de conferencia]. Memorias de una conferencia electrónica. Turrialba, Costa Rica
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V. y Wieses, L. (2017). *Carbono Orgánico del suelo el potencial oculto*. Roma, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Leyva, S., Baldoquin, A. y Reyes, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba Properties of Soils in Different Agricultural Uses, Las Tunas, Cuba. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 34(1), 36-47. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v35n1/0120-0135-rcia-35-01-00036.pdf>.
- Martínez, H., Fuentes, E. y Acevedo, H. (2013). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8, 68-96.

- Montenegro, J. y Abarca, S. (2002). Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense*, 26(1), 17-19.
- Ordóñez, J. y Masera, O. (2017). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711314>.
- Peters, M., Franco, H., Schmidt, A. y Hincapiè, B. (2011). Especies Forrajeras Multipropósito Opciones para Productores del Trópico Americano. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 132(1), 25-30. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25899-2_4.
- Roncallo, B., Murillo, J., Bonilla, R. y Barros, J. (2012). Evolution of Soil Properties in Agroforestry Arrangement Based on Red Ceiba (*Pachira quinata* (Jacq.) W.S. Alverson). *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 13(2), 167-178.
- Sánchez, J. (2017). Utilización eficiente de las pasturas tropicales en la alimentación del ganado lechero. *XI Seminario Manejo y Utilización de Pastos y Forrajes en Sistemas de Producción Animal*. Disponible en: <http://nutriciondebovinos.com.ar>
- Suárez, J. y Alfonso, M. (2012). Caracterización morfológica y agroproductiva de procedencias de *Ricinus communis* L. para la producción de aceite. *Rev. Pastos y Forrajes*. 35, 381-392.
- Valenzuela, M. y Wilson, O. (1987). *Evaluación del sistema radical del cultivo de trigo mediante dos métodos de medición*. s.l., Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Villalobos, L., Arce, J. y WingChing, R. (2013). Producción de Biomasa y costos de producción de pastos estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), Kikuyo (*Kikuyuocloa clandestina*) y ryegrass perenne (*Lolium perenne*) en lecherías de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 37(2), 91-103. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=94681689&lang=es &site=ehost-live>.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, HJ. y Kögel-Knabner, I. (2019). Soil Organic Carbon Storage as A Key Function of Soils - A Review of Drivers and Indicators at Various Scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.