

VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO POR LA INTRODUCCIÓN DE BRACHIARIA EN DOS REGIONES DE COSTA RICA

Johnny Montenegro¹, Eduardo. Barrantes²

RESUMEN

Variación del carbono orgánico del suelo por la introducción de brachiaria en dos regiones de Costa Rica. La captura y almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS) bajo pasturas está recibiendo mucha atención como opción de mitigación. En concordancia con lo anterior se cuantificó, en el trópico seco y en el trópico húmedo de Costa Rica, el carbono orgánico de un suelo cubierto por *Brachiaria* con diferente edad de establecimiento, se comparó con el determinado bajo una pastura natural, y se determinaron los cambios producidos en el tiempo por la sustitución de la pastura natural. Para estudiar la dinámica temporal del COS en un sitio del trópico húmedo de Guápiles se evaluó pasto natural (T0) y *Brachiaria* con 7 (T7) y 11 (T11) años de establecida; en Atenas, trópico seco, se evaluó además del natural (T0), 3 y 15 (T3 y T15) años de establecida la brachiaria. En cada sitio, para cada pastura y edad de establecimiento, se seleccionaron tres repeticiones, de donde se obtuvieron muestras de suelo hasta 60 y 50 cm de profundidad, respectivamente, y se implementó un diseño irrestricto al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. En cada localidad, el COS (kg C t^{-1} de suelo) fue similar ($P > 0,05$) entre las edades de establecimiento de la gramínea mejorada y la natural, aunque la cantidad varió con la profundidad ($P < 0,0001$), y se determinó correlación lineal positiva ($P < 0,001$) con el contenido de N del suelo. En Atenas, el COS presentó correlación lineal negativa ($P < 0,0001$) con el contenido de arcilla. En ambos sitios fue clara la tendencia al incremento del COS con el tiempo del establecimiento de la gramínea mejorada, luego de una reducción inicial, mostrando el efecto benéfico de la introducción de las especies mejoradas.

Palabras clave: Brachiaria, cambio climático, gases con efecto invernadero, ganadería tropical, mitigación.

ABSTRACT

The capture and storage of soil organic carbon (SOC) under pastures is receiving a lot of attention as a mitigation option. Therefore, the objectives were to quantify in the dry and humid tropics of Costa Rica, the soil carbon under *Brachiaria* grass with different age of establishment, to compare it with that determined under a natural pasture, and to determine if there are changes in it along the time with the substitution of natural pasture. To study the temporal dynamics of SOC in the humid tropic of Guápiles, a place with natural grass (T0), and *Brachiaria* with 7 (T7) and 11 (T11) years of establishment was selected; while in the dry tropic of Atenas in addition to the natural grass (T0), were evaluated 3 and 15 (T3 and T15)

1 Investigador en Cambio climático y Agricultura, Convenio Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica, email: jmontenegro@inta.go.cr / jmontenegro@imn.ac.cr; ORCID: 0000-0001-8526-570X.

2 Director, Dirección de Investigación y Transferencia, Universidad Técnica Nacional - Sede Atenas. Teléfono (506) 2455-1004, ORCID: 0000-0002-0383-3388.

years after the brachiaria was established. In each site, for each pasture and age of establishment, three replications were selected, from which the soil samples up to 60 and 50 cm deep were obtained, respectively, and a randomized unrestricted design with three treatments and three replications was implemented. In each locality, the SOC (kg C t^{-1} of soil) was similar ($P > 0.05$) between the ages of establishment of the improved and natural grass, although the amount varied with depth ($P < 0.0001$), and a positive linear correlation ($P < 0.001$) with soil N content was determined. In Atenas, SOC presented a negative linear correlation ($P < 0.0001$) with soil clay content. In both places there was a clear tendency to increase the SOC with the time of establishment of the improved grass, after an initial reduction, showing the beneficial effect of the introduction of the improved species.

Key words: Brachiaria, climate change, greenhouse gases, mitigation, tropical cattle.

INTRODUCCIÓN

La captura y almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS) bajo sistemas de producción ganaderos es un servicio ecosistémico de las pasturas, y actualmente está recibiendo mucha atención ya que se puede constituir una importante opción de mitigación (Conant *et al.* 2001; Acharya *et al.* 2012). Se estima que los suelos bajo pasturas contienen al menos el 20% de todo el carbono del suelo terrestre y tienen el potencial de almacenar mayor cantidad que los suelos agrícolas (Liebig *et al.* 2010; McSherry y Ritchie 2013).

Debido a que el suelo es el más grande reservorio de carbono de los ecosistemas terrestres, tan solo el incremento del 5% en el tamaño de ese depósito, lo cual puede ser logrado con técnicas de manejo, tiene el potencial de reducir la cantidad de carbono atmosférico hasta en 16% (Baldock 2007). Se estima que el 89% de la mitigación potencial de los gases con efecto invernadero del sector agrícola se puede lograr mediante el secuestro de carbono en el suelo (Smith *et al.* 2008).

El incremento del COS es el resultado del carbono que ingresa mediante la fotosíntesis de las plantas, menos el que se libera por la respiración microbiana durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. Si el carbono que se incorpora es mayor al respirado, se incrementa el contenido de este en el suelo.

De acuerdo con lo anterior, cuando ocurre un cambio en la cobertura del suelo y esta produce mayor cantidad de biomasa, muy probablemente también se incrementa el COS. Esta situación se

podría estar presentando en el caso de las pasturas cuando especies naturales de poca producción son reemplazadas por especies mejoradas con gran potencial productivo de biomasa.

En concordancia con lo anterior, evaluaciones realizadas por Costa *et al.* (2016) en Brasil determinaron en un perfil de 1,10 m de profundidad, que suelos bajo pasturas de *Brachiaria* presentaron incrementos de COS del orden de $0,56 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ comparados con la cobertura de vegetación natural que era la dominante previo al establecimiento de la gramínea.

Por su parte Assad *et al.* (2013) determinaron incrementos de COS entre 0-30 cm de profundidad, cuando compararon los valores de la vegetación nativa con aquellos detectados en suelos con años de haber sido convertidos a pasturas del género *Brachiaria*. La misma tendencia fue reportada por Eclisa *et al.* (2012) en Sur América.

Pasturas bien manejadas o mejoradas, tienen potencial de secuestrar carbono en el suelo. En este sentido, Maia *et al.* (2009) determinaron el potencial para secuestrar o emitir carbono a la atmósfera mediante el manejo de pasturas, y detectaron que las degradadas disminuyeron las reservas del suelo en aproximadamente $0,27\text{-}0,28 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; un mejor manejo de las pasturas mediante un régimen de pastoreo más técnico disminuyó el carbono del suelo a una menor tasa ($0,03 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que este mismo manejo en otros tipos de suelo y el manejo mejorado aumentaron las existencias en $0,72 \text{ t}$ y $0,61 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

Lo anterior es concordante con lo reportado por Braz *et al.* (2013) en los Cerrados del Brasil.

Por lo anteriormente expuesto es que se hace necesario cuantificar no solo el contenido de carbono en el perfil del suelo, sino también determinar si se está produciendo algún cambio en la cantidad de carbono en el tiempo. De manera que, si se asocia la dirección del cambio detectado en la cantidad de carbono orgánico del suelo con el manejo o práctica implementada, se podrían identificar aquellas que contribuyen con el mantenimiento, incremento o disminución del COS, lo cual

es de suma importancia para la sostenibilidad del sistema de producción.

Basado en lo anterior los objetivos de esta investigación fueron: cuantificar en un sitio del trópico seco y otro en el trópico húmedo de Costa Rica, el carbono de un suelo cubierto por pasto *Brachiaria* con diferente edad de establecimiento; en cada región, comparar los valores de COS bajo la pastura mejorada con los de una pastura natural y, determinar si se han producido cambios en el tiempo en los valores de COS por la sustitución de la pastura natural por la especie mejorada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

Se seleccionaron dos fincas para implementar los muestreos; una de ellas es la Estación Experimental Los Diamantes (10°12' Latitud norte, 83°46' Longitud oeste) en Guápiles, Costa Rica, con un suelo Inceptisol, Suborden Udepts con textura franco arenoso, y a 260 m s.n.m.. Esta finca pertenece al Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) Costa Rica. Esta región se clasifica como Bosque muy Húmedo Tropical (Holdridge 2000) y se caracteriza por tener temperatura y precipitación promedio anual de 26°C y 4.200 mm, respectivamente.

La otra finca se ubica en el Pacífico Central del país, en la provincia de Alajuela, cantón de Atenas (9°56' Latitud norte, 84°22' Longitud oeste). La finca pertenece a la Universidad Técnica Nacional (UTN), está a 450 m s.n.m., con 26°C de temperatura y 1.600 mm de precipitación promedio anual, y se encuentra en la zona de vida clasificada como Bosque Seco Tropical (Holdridge 2000). El suelo es un Entisol, Suborden Orthents, con textura arcillosa.

Las pasturas

En ambas fincas muestreadas las pasturas consideradas no reciben fertilización química, y se manejan en un sistema de pastoreo rotacional con bovinos de carne. En ellas el control de las malezas se realiza de manera manual cuando es necesario.

Muestreo de suelo

En ambas regiones se seleccionaron parcelas con pasto del género *Brachiaria*. En el caso de Guápiles se incluyó la *B. brizanta* cv Marandú y un híbrido de este género conocido como Cayman. También se muestreó el suelo bajo la especie naturalizada denominada ratana (*Ischaemum indicum*). En Atenas el comparador es una gramínea natural dominada por el género *Axonopus*, siendo la especie mejorada la *B. brizantha* cv Marandú.

Para ambos sitios las especies naturales fueron consideradas como testigo, debido a que fueron las pasturas existentes en los sitios donde se estableció la especie mejorada.

Tratamientos y variables evaluadas

En Guápiles se evaluaron tres tratamientos (edades de establecimiento de las pasturas):

1. Pastura de ratana (*Ischaemun indicum*) con más de 20 años de establecida (testigo, T0).
2. Siete años de establecida la pastura de *B. brizantha* cv Cayman (T7).
3. 11 años de establecida la pastura de *B. brizantha* cv Marandú (T11).

Con respecto al sitio muestreado en Atenas, los tratamientos (edades de establecidas las pasturas) fueron:

1. Pastura natural (*Axonopus* spp) con más de 20 años de establecida (T0).
2. Tres años de establecida la pastura de *B. brizantha* cv Marandú (T3).
3. 15 años de establecida la pastura de *B. brizantha* cv Marandú (T15).

En cada sitio, para cada pastura y edad de establecimiento, se seleccionaron tres parcelas o repeticiones, las cuales estaban separadas 20 m, en donde se obtuvieron las muestras de suelo. En ambas fincas muestreadas, las especies referenciadas representaron más del 95% de la biomasa disponible.

Las variables evaluadas fueron: contenido de carbono (kg t^{-1} suelo) y, % de nitrógeno.

En cada finca, la estrategia utilizada para estudiar la dinámica temporal del carbono del suelo fue una cronosecuencia, que consiste en evaluar áreas con diferentes períodos de establecimiento de la pastura mejorada ubicadas en similar condición de suelo, clima, y topografía.

Manejo de muestras

Las muestras de suelo recolectadas en el campo se clasificaron de acuerdo con la profundidad, dividiéndose en secciones de 10 cm hasta la máxima profundidad a la que se pudo introducir el barreno. El muestreo se realizó con un equipo Eijkelkamp provisto de un barreno cilíndrico diseñado para tomar muestras de suelo no

disturbadas. La profundidad de muestreo varió en función de las características propias del suelo donde se realizaron los muestreos.

En las pasturas ubicadas en la Estación Experimental Los Diamantes la profundidad de muestreo fue de 60 cm; no fue posible mayor exploración del perfil debido a la existencia de una capa rocosa que se ubica entre 50 y 70 cm de profundidad, y en consecuencia ello impidió la penetración del barreno.

En el caso de la UTN, la profundidad de muestreo fue 50 cm, la presencia de una capa de suelo arcilloso, sumamente compactada ubicada entre 50 y 60 cm de profundidad imposibilitó la introducción del barreno a mayores profundidades.

Las muestras de suelo se depositaron en una bolsa plástica identificada y se enviaron al Laboratorio de Suelos del INTA Costa Rica.

Análisis de laboratorio

A las muestras de suelo se les determinó: densidad aparente por el método del cilindro, carbono y nitrógeno mediante combustión seca de Dumas, y textura por el método de Bouyucos.

Cálculo de carbono

Como primer paso en el cálculo del contenido de carbono, se hizo la corrección a masa equivalente de suelo (MES), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación (Livestock Environmental Assessment and Performance 2018):

$$\text{MES} = \frac{\sum \text{Ma}}{\sum \text{Va}} * t_i * 100 \quad \text{Ec. 1,}$$

Donde:

- MES (t suelo ha^{-1}) es la masa equivalente de suelo (se utilizará en la ecuación 3),
- $\sum \text{Ma}$ es la suma de las masas de las muestras agrupadas,
- $\sum \text{Va}$ es la suma de los volúmenes de las muestras agrupadas,
- t_i (cm) corresponde a la profundidad del muestreo aplicado.

El contenido de carbono en el suelo se calculó de acuerdo con la ecuación 2, como sigue:

$$\text{COS (t C ha}^{-1}\text{)} = \text{CO}_i * \text{P}_i * \text{densidad } i \text{ Ec. 2,}$$

Donde:

- COS (t C ha⁻¹): es la cantidad de carbono orgánico del suelo,
- CO_i (mg C g⁻¹ suelo): es el contenido de carbono orgánico presente en la muestra *i*,
- P_i (cm): es la profundidad a la que se tomó la muestra *i*,
- Densidad (g cm⁻³): es la Densidad Aparente de la muestra *i*.

Finalmente, se calculó el contenido de carbono orgánico del suelo por tonelada de suelo de acuerdo con la ecuación 3, en la cual se utilizan los valores calculados en las ecuaciones 1 y 2:

$$\text{COS (kg C t}^{-1}\text{ suelo): COS (t C ha}^{-1}\text{) / MES (t de suelo ha}^{-1}\text{) * 1.000 Ec. 3,}$$

Donde:

- COS (kg C t⁻¹ suelo): cantidad de carbono orgánico por tonelada de suelo,
- COS (t C ha⁻¹): cantidad de carbono orgánico del suelo, (Ec. 2)
- MES (t de suelo ha⁻¹): masa equivalente de suelo (Ec. 1).

Análisis estadístico

En cada sitio se implementó un diseño irrestricto al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. Se realizó un análisis de contrastes ortogonales, y mediante un ANDEVA y la prueba de Tuckey al 5% se efectuó la comparación de medias en InfoStat (DiRienzo *et al.* 2018).

RESULTADOS

Estación Experimental Los Diamantes

Distribución del carbono orgánico en el perfil evaluado

La cantidad de carbono del suelo varió con la profundidad (P<0,0001), observándose los mayores valores en la parte superficial del suelo y los menores en la sección más profunda (Cuadro 1).

La incorporación sobre la superficie del suelo de parte de la biomasa aérea producida, así como la constante reposición de la biomasa radical que se localiza mayoritariamente en las capas más superficiales del suelo, que se produce como resultado de la mortalidad de estas luego de los pastoreos, contribuye a explicar los mayores valores de COS en los estratos superficiales (Andrade *et al.* 2014; Rumpel y Kögel-Knabner 2011).

Cuadro 1. Carbono orgánico, kg t⁻¹ suelo, según profundidad en un suelo con gramíneas. Guápiles, Costa Rica.

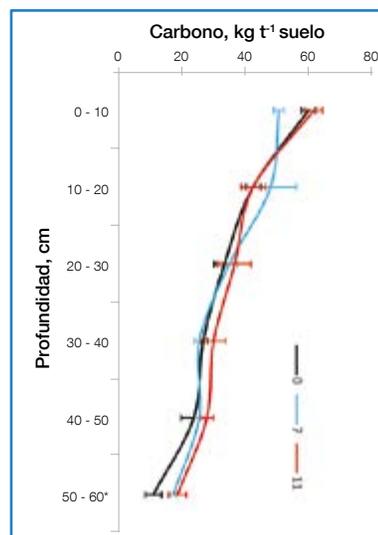
Profundidad, cm	Carbono, kg t ⁻¹ suelo
0 – 10	57,9±2,1 ^a
10 – 20	44,6±2,8 ^b
20 – 30	35,3±1,9 ^c
30 – 40	27,7±1,4 ^{cd}
40 – 50	25,9±1,5 ^d
50 – 60	15,8±1,7 ^e
0 - 30	45,6±2,2 ^a
30 - 60	23,1±1,3 ^b
0 - 60	34,5±2,9

Valores promedio ± 1 error estándar (EE) con diferente letra difieren al nivel P<0,05

La distribución del carbono orgánico en el perfil del suelo explorado muestra dos situaciones bien definidas. Coincidentemente con lo reportado en la literatura (Paz y Etchevers 2016), la primera es la tendencia clara a disminuir el carbono con la profundidad, determinándose en promedio un contenido menor del 50% a partir de los 30 cm de profundidad con respecto al determinado en la capa superficial de 0 a 10 cm (figura 1).

La segunda es que, con la excepción del estrato más superficial, el contenido de carbono orgánico tiende a ser mayor con la especie mejorada en T11. Las raíces de la especie mejorada logran crecer a mayores profundidades que las de ratana y ello se manifiesta en mayor contenido de carbono a partir de los 20 cm de profundidad (figura 1). Esta condición ha sido mencionada por (Pérez *et al.* 2019) quienes al comparar la cantidad de carbono en el suelo bajo especies de gramíneas mejoradas determinaron mayores niveles de COS con respecto a aquel determinado bajo pasturas naturales.

La ratana es una especie muy agresiva que cubre el 100% del suelo y presenta gran masa radicular la cual se localiza muy superficial (Villalobos 2010). Este hecho probablemente influye positivamente para que esta especie tenga la cantidad de carbono observada en esta evaluación en la capa más superficial del suelo. Ello también explica la menor cantidad de carbono en capas de suelo más profundas tal y como se observa en la especie mejorada (figura 1).



0: testigo; 7, 11: años de establecida la pastura mejorada.

Valores promedio \pm 1 EE

Figura 1. Distribución de carbono orgánico en el perfil de un suelo cubierto por *Brachiaria* con diferente edad de establecimiento. Guápiles, Costa Rica.

También se determinaron diferencias ($P < 0,0001$) en el contenido de carbono a lo profundo del perfil en cada tratamiento, y a pesar de que no se determinó interacción significativa tratamiento*profundidad (Cuadro 2), el comportamiento del COS puede agruparse, de acuerdo con la tendencia observada, en tres categorías: 1.- reducción del COS luego del establecimiento de la pastura e incremento posterior a los siete años (0-10 cm); 2.- incremento del COS desde el establecimiento y hasta los siete años, posterior a lo cual disminuyó (10-20 cm), y 3.- incremento continuo del COS constituido por las capas más profundas (Cuadro 2).

Cuadro 2. COS, kg t⁻¹ suelo, según profundidad y años de establecido el pasto *Brachiaria*. Guápiles, Costa Rica.

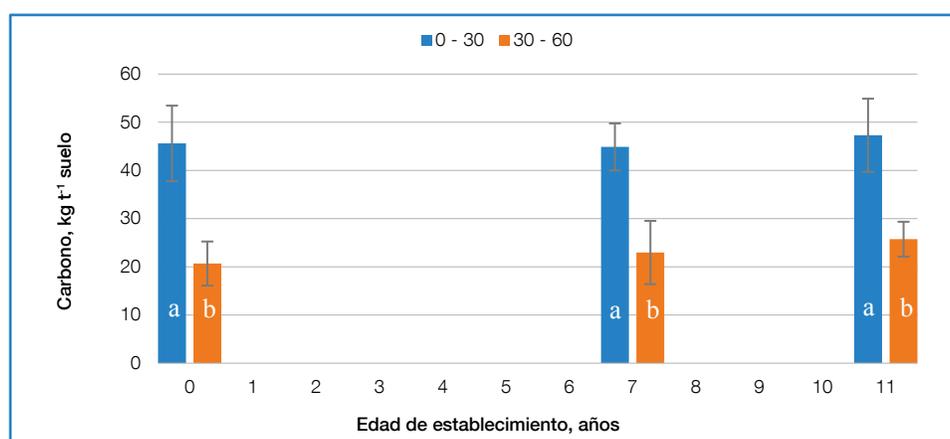
Tratamiento	T0	T7	T11
		Carbono,	
Profundidad, cm		kg t⁻¹ suelo	
0 - 10	60,4 \pm 2,3 ^a	51,0 \pm 1,7 ^a	62,1 \pm 2,7 ^a
10 - 20	42,7 \pm 2,3 ^b	48,4 \pm 8,2 ^a	42,8 \pm 3,8 ^b
20 - 30	33,7 \pm 3,2 ^{bc}	35,2 \pm 2,5 ^{ab}	37,0 \pm 5,1 ^{bc}
30 - 40	26,9 \pm 1,1 ^c	25,7 \pm 1,4 ^{bc}	30,3 \pm 3,8 ^{cd}
40 - 50	24,0 \pm 4,0 ^{ec}	25,7 \pm 1,4 ^{bc}	28,1 \pm 2,0 ^d
50 - 60	11,1 \pm 2,7 ^d	17,5 \pm 1,2 ^c	18,8 \pm 2,8 ^e

Promedio \pm 1 EE en cada tratamiento con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

La tendencia observada en el incremento de COS parece ser el resultado del aporte de carbono que realizan las raíces de la *Brachiaria*, mostrando el beneficio de esta especie que entre sus características está la de presentar raíces largas que pueden explorar capas profundas del suelo (Pérez *et al.* 2019), lo cual le permite acceder más agua y nutrientes y con ello logra producir mayores niveles de biomasa que las especies naturales.

Carbono por unidad de suelo según edad de establecimiento

No se determinaron diferencias ($P > 0,05$) a lo largo del tiempo de establecimiento, tanto para la capa superficial de 0–30 cm, como en la más profunda (30–60 cm) del perfil evaluado (figura 2), aunque en ambas profundidades existe tendencia al incremento del COS con la edad de establecida la pastura mejorada.



Valores promedio \pm 1 EE con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$ 0-30, 30-60: profundidad en cm

Figura 2. COS en el perfil del suelo (0–60 cm) en función del tiempo de establecido el pasto *Brachiaria*. Guápiles, Costa Rica.

Cambio en la cantidad de carbono por unidad de suelo

En los primeros 30 cm del suelo y hasta el séptimo año del establecimiento de la brizantha, en promedio la tendencia muestra que el carbono disminuyó $0,11 \text{ kg t}^{-1}$ suelo (Cuadro 3). Sin embargo, cuando se considera en su totalidad el tiempo desde la siembra, el COS tiende a incrementarse $0,15 \text{ kg t}^{-1}$ suelo (Cuadro 3). Incrementos en la cantidad de carbono en el suelo por la introducción de especies de gramíneas mejoradas ha sido reportada por Arguedas *et al.* (2020) en Costa Rica. De igual manera, estos resultados son coincidentes con los mostrados por Assad *et al.* (2013) y Costa *et al.* (2016) en Brasil y por Eclisa *et al.* (2012) en tres países de Sur América.

La situación es diferente cuando se considera la mayor profundidad, ya que independientemente de la edad de plantada (T7 y T11) el suelo bajo la especie mejorada presenta tendencia al

incremento del COS (Cuadro 3) en cantidades que hacen que el perfil completo evaluado (0–60 cm) presente valores positivos, es decir, se incrementan los valores del COS.

Cuadro 3. Cambio promedio anual en el COS según profundidad y años de establecida la *Brachiaria*. Guápiles, Costa Rica.

	Profundidad cm		
	0-30	30-60	0-60
Promedio anual	kg C t⁻¹ suelo		
T7	$-0,11 \pm 0,60$	$0,33 \pm 0,39$	$0,11 \pm 0,49$
T11	$0,15 \pm 0,42$	$0,46 \pm 0,39$	$0,31 \pm 0,40$

Valores promedio \pm 1 EE

Esto pone de manifiesto la importancia de realizar los muestreos de suelo a profundidades mayores que 30 cm cuando se determine COS, ya que se podría estar dejando de contabilizar cambios en la cantidad de carbono que estarían ocurriendo, lo cual es el resultado del crecimiento de raíces y los exudados de estas (Pérez *et al.* 2019).

Relación Carbono:Nitrógeno del suelo

La relación carbono:nitrógeno (C/N) del suelo fue similar entre las diferentes edades de establecida la gramínea mejorada (T7 y T11) y la pastura natural (T0, Figura 3), con valores cercanos a 10 en la parte superficial del perfil, los cuales se incrementan ligeramente con la profundidad. También se observó tendencia a incrementarse los valores con la edad de establecimiento (T11, Figura 3).

Se determinó correlación lineal positiva ($P < 0,001$) entre el contenido de nitrógeno y de carbono del suelo (figura 4), lo cual pone de manifiesto la importancia del nitrógeno para incrementar la tasa de fijación de carbono en el suelo, tal y como fuera establecido por Fisher *et al.* (1995).

Es claro que conforme existe más nitrógeno en el suelo se incrementa el crecimiento de las

pasturas, lo cual es de gran importancia no solo porque se aumenta la disponibilidad del forraje, sino también porque existe mayor cantidad de material vegetal que se incorpora al suelo, tanto a nivel superficial como bajo la superficie. Es por esta razón que una de las recomendaciones en pasturas tropicales es la introducción de leguminosas para incrementar la disponibilidad del nitrógeno en el suelo y con ello la producción de forraje y también la fijación de carbono en el suelo (Fisher *et al.* 1995).

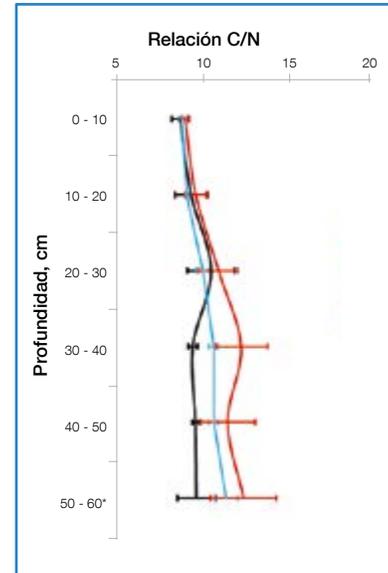


Figura 3. Relación C/N en el perfil del suelo (0-60 cm) bajo *Brachiaria* con diferente tiempo de establecida. Guápiles, Costa Rica.

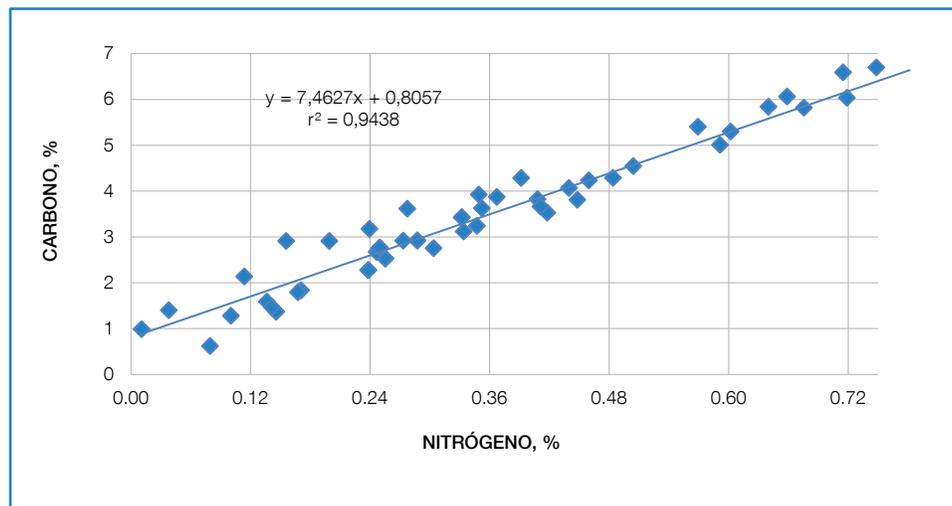


Figura 4. Relación entre nitrógeno y carbono de un suelo bajo pastura natural y de *Brachiaria*. Guápiles, Costa Rica.

Atenas

Cantidad de carbono por unidad de suelo

La cantidad de COS varió ($P < 0,0001$) con la profundidad. Los mayores valores por unidad de suelo se determinaron en la parte más superficial del perfil, y los menores en las secciones más profundas; valores intermedios se detectaron en las restantes capas de suelo (Cuadro 4).

De igual forma, cuando se agrupa el COS por profundidad del suelo, en la parte superior (0–30 cm) se determinó el mayor ($P < 0,0001$) contenido de carbono por unidad de suelo con respecto al detectado a mayor profundidad (30–50 cm, Cuadro 4).

Cuadro 4. Carbono orgánico, kg t^{-1} suelo, según profundidad en un suelo con *Brachiaria*. Atenas, Costa Rica.

Profundidad, cm	Carbono, kg t^{-1} suelo
0 – 10	50,9±2,4 ^a
10 – 20	34,4±2,5 ^b
20 – 30	29,5±3,5 ^{bc}
30 – 40	20,8±2,7 ^c
40 – 50	18,7±2,6 ^c
0 - 30	38,3±2,4 ^a
30 - 50	19,8±2,6 ^b

Valores promedio \pm 1 EE con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

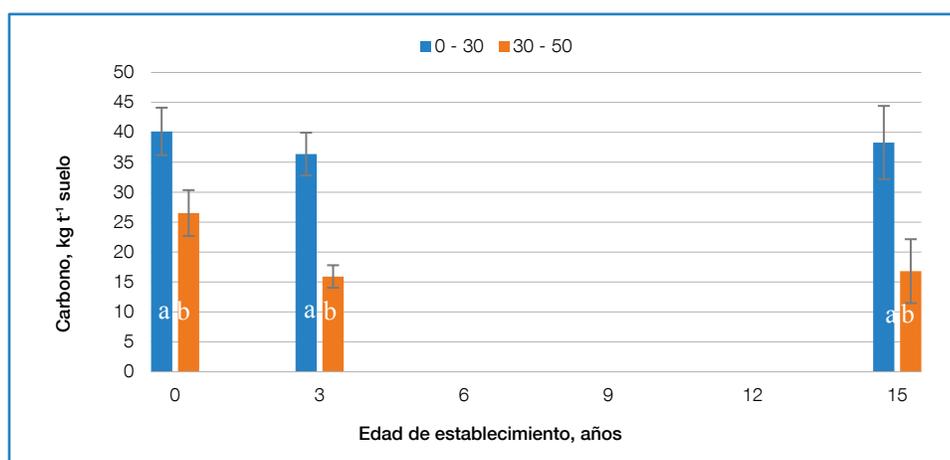


Figura 5. Contenido de carbono orgánico, kg t^{-1} suelo, de un suelo bajo *Brachiaria* según profundidad y edad de establecimiento. Atenas, Costa Rica.

La constante incorporación de material vegetal sobre la superficie del suelo, así como también el incorporado por la renovación de raíces y los exudados de estas (Andrade *et al.* 2014; Rumpel y Kögel-Knabner 2011) que se localizan mayoritariamente en los primeros 30 cm del suelo, favorecen la acumulación del carbono a esa profundidad.

Por otra parte, aunque no se detectaron diferencias entre tratamientos en el contenido de COS con el tiempo de establecimiento a una misma profundidad (0–30 cm ó 30 – 50 cm), se nota la tendencia a la reducción de carbono en ambas profundidades tres años después de establecida la gramínea, lo cual es más marcado entre los 30 y 50 cm (figura 5).

Ello probablemente refleja el efecto negativo de la preparación del suelo para el establecimiento de la gramínea mejorada, ya que al arar el suelo se expone materia orgánica a condiciones propicias para que ocurra su descomposición, lo cual conlleva a la disminución de esta (Hernández y López 2002; Sotomayor-Ramírez *et al.* 2007).

Sin embargo, lo interesante es que, con el paso del tiempo, dada la producción e incorporación al suelo de biomasa aérea y radicular, a partir de los tres años la tendencia cambia y se incrementa el contenido de carbono a valores similares que los observados bajo la pastura natural (T0), evidenciando la fijación de carbono causado por esta gramínea mejorada (figura 5). La tendencia es la misma en la parte más profunda del perfil evaluado.

Ello pone de manifiesto que esta gramínea mejorada, bajo las condiciones agroecológicas donde se plantó y debido al manejo de la misma, puede reponer el carbono del suelo, al menos a su condición original previo a su siembra, pero para ello se requiere un período relativamente largo desde su establecimiento debido a las condiciones climáticas de esta región donde se

presentan alrededor de seis meses sin lluvias. Es por ello que sería prudente utilizar otros métodos de siembra, como por ejemplo mínima labranza, para causar menor alteración de las condiciones del suelo y así no favorecer la rápida mineralización de la materia orgánica durante el proceso de siembra y con ello reducir la pérdida de carbono del suelo (Espinoza 2010).

Al analizar las tendencias del COS en el perfil superior (0–30cm) pero en tractos de 10cm, se pudo observar como la capa más superficial (0–10cm) muestra dos situaciones claras. La primera es que el contenido de COS es superior ($P < 0,0001$) con relación a las observadas en las dos restantes capas de suelo. La segunda es que el valor de COS se incrementó a los tres años de establecimiento, mostrando equilibrio posteriormente (figura 6).

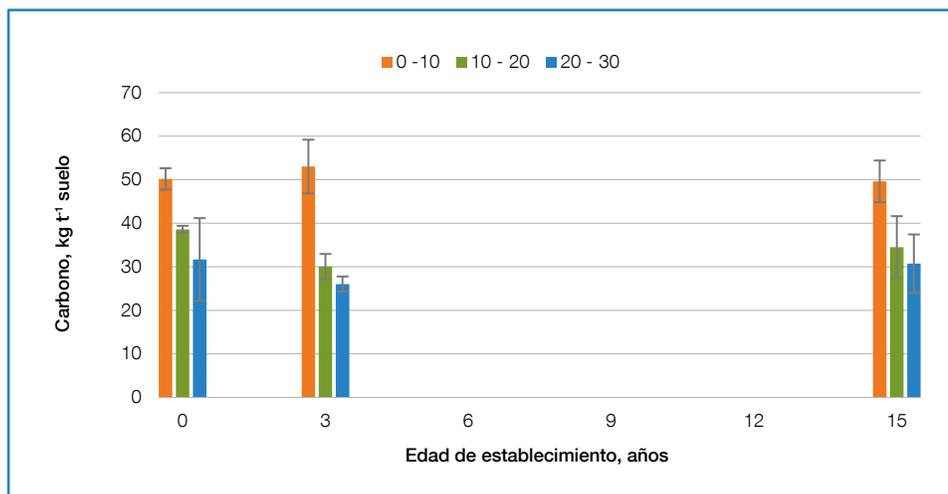


Figura 6. Contenido de carbono orgánico, kg t⁻¹ suelo, en los primeros 30 cm de profundidad de un suelo bajo *Brachiaria* según edad de establecimiento. Atenas, Costa Rica.

Por el contrario, las otras dos capas de suelo (10–20 y 20–30 cm) mostraron reducción de COS al tercer año de establecida la pastura mejorada.

Esta diferencia de comportamiento podría estar señalando la incorporación de biomasa aérea en la capa más superficial de suelo que contribuyó para que los niveles de COS se incrementaran durante esos años (Pérez *et al.* 2019), situación que ocurre más lentamente en capas un poco más profundas donde básicamente ocurre

incorporación de biomasa radical. Sin embargo, en el tiempo esta fracción de COS se vuelve más importante al ir incorporando cantidades que contribuye con el incremento, tal y como se observó en la presente investigación donde a los 11 años de establecida la pastura mejorada se ha incrementado el valor de COS en el tracto de 10 a 20 cm de profundidad (figura 6). La situación es similar en la capa de suelo ubicada entre 20 y 30 cm de profundidad.

Cambio en el contenido del carbono del suelo

El cambio estimado en la cantidad de carbono en ambas profundidades (0 – 30 y 30 – 50 cm) muestra valores negativos tres años luego del establecimiento de la especie mejorada (Cuadro 5). Si bien se presenta una tendencia al incremento en el valor de carbono a partir de los tres años, 15 años después de la siembra de la brizantha todavía no se muestran valores de carbono como los originales (Cuadro 5). Sin embargo, es claro que la diferencia en la cantidad de carbono con respecto a la original (T0) se reduce con el tiempo de establecimiento, lo cual es muestra clara del aporte de carbono al suelo que es realizado por la gramínea mejorada.

La introducción y siembra de gramíneas mejoradas usualmente son precedidas por la preparación mecánica del suelo, para lo cual normalmente se utiliza el arado que realiza la remoción del suelo hasta 30 cm de profundidad. Esto ha sido relacionado con incrementos de la mineralización de la materia orgánica del suelo y en consecuencia con reducciones del carbono almacenado e incrementos de las emisiones de CO₂ (Lal 2004; Smith 2014; Willems *et al.* 2011).

Cuadro 5. Cambio promedio anual en la cantidad de carbono del suelo, kg t⁻¹ suelo, según profundidad y tiempo de establecida la *Brachiaria*. Atenas, Costa Rica.

	Profundidad, cm		
	0-30	30-50	0-50
Promedio anual	kg C t ⁻¹ suelo		
3	-1,26±1,14	-3,53±1,35	-2,17±0,70
15	-0,12±0,51	-0,65±0,24	-0,33±0,40

Con relación a la profundidad de muestreo, se nota como el cambio de la gramínea provoca pérdidas de carbono a profundidades mayores a 30 cm, las cuales no serían consideradas de no muestrear a esta profundidad. Similares (Noponen *et al.* 2013; Chatterjee *et al.* 2020) y contrastantes (Chatterjee *et al.* 2020) resultados han sido reportados para el cultivo del café.

La importancia de tener una clara visión de lo que está pasando con el carbono del suelo, no solo a nivel superficial, es relevante para desarrollar prácticas que efectivamente contribuyan al menos a mantener estable el carbono del suelo, y a contribuir con la mitigación del cambio climático.

Relación Carbono/Nitrógeno del suelo

Se determinó interacción ($P < 0,00145$) tratamiento*profundidad, donde los valores de la relación carbono:nitrógeno (C/N) en T15 mostraron ser menores en los estratos más profundos con respecto a los de T0 y T3 (figura 7). Los valores de esta relación fueron similares hasta los 30 cm de profundidad para todos los tratamientos. En general, los valores se incrementan con la profundidad, aunque T15 mostró estabilidad a partir de los 20 cm (Figura7).

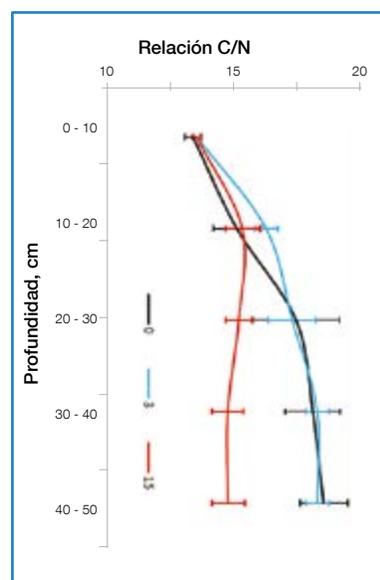


Figura 7. Relación C/N en el perfil del suelo (0 – 50 cm) bajo *Brachiaria* con diferente tiempo de establecida. Atenas, Costa Rica.

Todos los tratamientos mostraron que el contenido de N correlacionó ($P < 0,0001$) de forma lineal y positiva con el carbono del suelo (r^2 entre 0,97 a 0,99), mostrando como al incrementarse el N también se aumenta el C. Los datos agrupados mostraron la misma tendencia (figura 8).

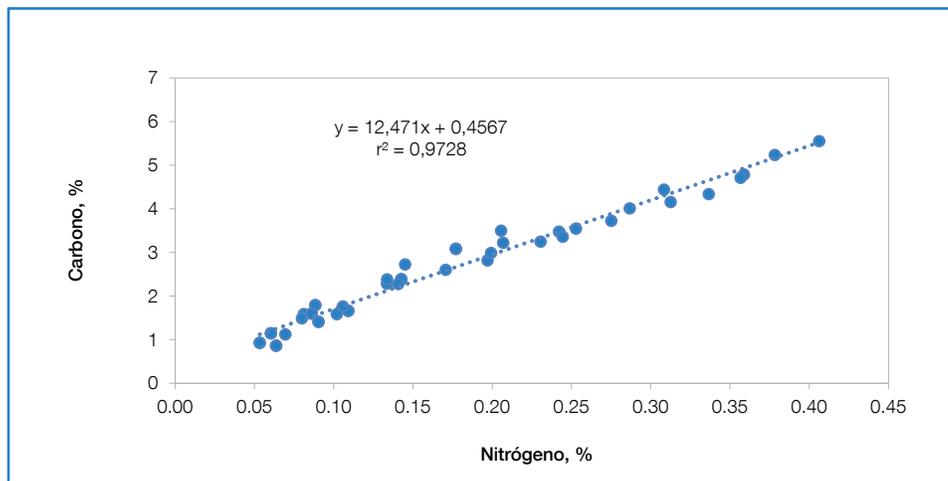


Figura 8. Relación entre carbono y nitrógeno (N) de un suelo bajo *Brachiaria*. Atenas, Costa Rica.

También se determinó correlación lineal ($P < 0,0001$) entre el contenido de arcilla y el de carbono con todos los datos agrupados, pero en este caso la relación fue negativa, es decir, se reduce el carbono cuando el contenido de arcilla aumenta (figura 9).

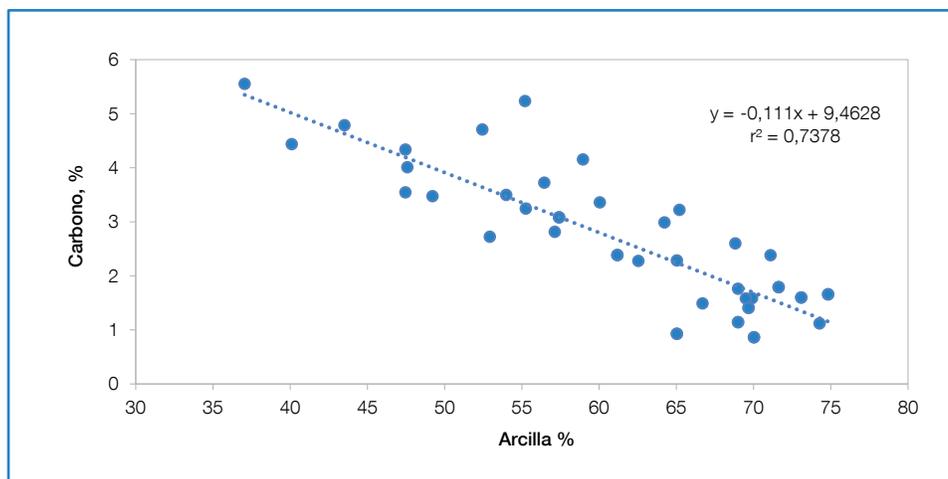


Figura 9. Relación entre el contenido de carbono y de arcilla de un suelo bajo *Brachiaria*. Atenas, Costa Rica.

Ello es contrario a lo reportado en la literatura donde normalmente se asocian mayores niveles de carbono del suelo con más arcilla (Avilés-Marín *et al.* 2007). Sin embargo, esta aparente contradicción se explica por los altos contenidos de arcilla de este suelo, que en algunos casos supera el 70% de las partículas del suelo. Bajo estas condiciones, y dada la compactación observada que impidió la introducción del barreno mecánico y señalado en la sección de materiales y métodos, se disminuye la profundidad de las raíces. La compactación es asociada con problema de penetración y desarrollo de las raíces, obteniéndose como resultado la reducción de la biomasa

radical (Kinner *et al.* 2009; Paripovich *et al.* 2010), y en consecuencia los valores de carbono obtenidos son los más bajos (Cuadro 4).

En ambas fincas, a pesar de que las condiciones climáticas y de suelo son contrastantes, el patrón de distribución del carbono en el suelo fue similar, disminuyó con la profundidad (Céspedes *et al.* 2012), sin que aparentemente la edad del establecimiento influyera en este comportamiento. De igual forma para ambas regiones, el perfil superior (0-30 cm) contiene mayor cantidad de COS por unidad de suelo que el determinado en la parte más profunda del perfil evaluado (Figuras 2 y 5).

Coincidentemente luego del establecimiento de la gramínea mejorada, es clara la tendencia de la reducción de COS en ambas fincas. Ello se nota claramente por los valores negativos (Cuadros 3 y 5), en el perfil superior (0-30 cm). Sin embargo, con el paso del tiempo de establecida la gramínea mejorada, se empiezan a recuperar los contenidos de COS en Atenas. En el caso de Guápiles, los valores del COS se incrementaron con respecto al valor inicial (T0). Ello muestra el efecto benéfico de la introducción de las especies mejoradas.

En Guápiles en la mayor profundidad del perfil (30-60 cm) la situación es diferente por cuanto el COS mostró tendencia al incremento. Las labores de preparación del suelo al no ser tan profundas, no influyen la descomposición más rápida de la materia orgánica como si lo estimularon en el perfil superior. Además, las condiciones de suelo franco favorecen el crecimiento de las raíces de las especies mejoradas que hacen que con el tiempo depositen residuos y exudados que mejoran el contenido de COS.

En el caso de Atenas, la condición de suelo arcilloso que de manera conjunta con las condiciones climáticas típicas del trópico seco, desfavorecen, la primera la penetración de las raíces y, la segunda el crecimiento vegetativo durante una parte significativa del año debido a la estacionalidad de las lluvias. Lo anterior hace que, en términos generales, el COS en el perfil evaluado se incremente en Guápiles, pero disminuya en Atenas (Cuadros 3 y 5).

Por lo anterior es que se requiere considerar el efecto del clima (Abdalla *et al.* 2018) y las características del suelo (Pringle *et al.* 2011) en la variación del contenido de carbono. El primero influye directamente el patrón de crecimiento de las gramíneas a lo largo del año, y el segundo la facilidad de penetración de las raíces en el perfil del suelo. Por ello la pastura mejorada sembrada en condiciones contrastantes repone el carbono perdido por la preparación del suelo en tiempos diferentes (Cuadros 3 y 5).

También fue clara la relación del nitrógeno con el carbono del suelo, y ello muestra otro beneficio de la implementación de prácticas que conduzcan al incremento de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo dada su relación con el desarrollo y producción de biomasa de las gramíneas, lo cual tiene relación directa con el carbono en el suelo (van Groenigen *et al.* 2017).

La profundidad de muestreo muestra que, dependiendo de las condiciones climáticas de la región donde se ubique la actividad de interés, el carbono del suelo a profundidades mayores a los 30 cm podría contribuir a mitigar, o bien, a incrementar la concentración de este elemento en la atmósfera. Se requiere realizar este tipo de investigación en diferentes actividades agrícolas para dilucidar si este patrón climático es consistente con el contenido de carbono a profundidades como las referenciadas.

Basado en lo observado con los resultados obtenidos, se recomienda en la medida de lo posible, minimizar el laboreo del suelo previo a la siembra, ya que fue evidente la reducción del carbono durante los años posteriores a la siembra. La utilización de prácticas de establecimiento con mínima labranza podría reducir la disminución de carbono (Aguilera *et al.* 2013) y quizás se observarían mayores incrementos de este elemento en el tiempo. Sería aconsejable incluir esta variable comparativa en próximos muestreos.

De igual manera se recomienda la introducción de leguminosas asociadas a la gramínea que favorezcan la disponibilidad de nitrógeno, lo cual estimularía el crecimiento de las pasturas mejoradas y con ello probablemente se podría incrementar el carbono del suelo (van Groenigen *et al.* 2017).

Es deseable continuar los muestreos en el tiempo, en los mismos puntos utilizados en la presente investigación, para corroborar o determinar nuevas tendencias. Además, sería interesante incrementar el número de puntos de muestreo y con ello tratar de reducir la variabilidad observada para lograr determinar diferencias significativas entre las variables consideradas.

Sería importante incluir otras especies de gramíneas mejoradas para determinar si el comportamiento en términos de incremento de carbono en el suelo con el tiempo es similar al observado hasta el momento con la *B. brizantha*.

Se deberían realizar dos ciclos de muestreos espaciados al menos tres años para observar y determinar si existe variación en el contenido de carbono del suelo en el mismo sitio debido a la introducción de la gramínea mejorada con el manejo establecido, y con ello corroborar lo determinado en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación es parte de la Cuarta Comunicación Nacional y el Segundo Informe Bienal de Actualización de Costa Rica ante la CMNUCC – 00098756, y se ha efectuado bajo la tutela del Convenio entre el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), con el financiamiento parcial del

Fondo Global del Ambiente (GEF por sus siglas en inglés) Costa Rica. También se agradece el apoyo financiero de FUNDECOOPERACION lo cual hizo posible el desarrollo de esta investigación.

Se agradece a personal de la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) por el apoyo recibido durante las labores de muestreos.

LITERATURA CITADA

Abdalla, M; Hastings, A; Chadwick, D; Jones, D; Evans, C; Jones, M; Rees, R; Smith, P. 2018. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 253:62-81.

Acharya, B; Rasmussen, J; Eriksen, J. 2012. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 153:33-39.

Aguilera, E; Lassaletta, L; Gattinger, A; Gimeno, B. 2013. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 168:25-36.

Andrade, H; Espinoza, E; Moreno, H. 2014. Impact of grazing on soil organic storage carbon in high lands of Anaime, Tolima, Colombia. *Zootec. Trop.* 32:7-21.

Arguedas, F; Hernández, M; Abarca, S; Soto, R. 2020. Adicionalidad de carbono orgánico de suelo en pasto cayman manejado con enfoque Voisin. *Alcances Tecnológicos*, en prensa.

Assad, E; Pinto, H; Martins, S; Groppo, J; Salgado, P; Evangelista, B; Vasconcellos, E; Sano, E; Pavão, E; Luna, R; Camargo, P; Martinelli, L. 2013. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. *Biogeosciences* 10:6141-6160.

Avilés-Marín S; Galvis-Spinola, A; Hernández-Mendoza, T; Arévalo-Galarza, G. 2007. Relación de la textura y superficie específica con la materia orgánica del suelo en selvas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(2):109-113.

Baldock, J. 2007. Composition and cycling of organic carbon in soil. In: Marshner, P; Rengle, Z (eds) *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, p. 1-27.

Braz, S; Urquiaga, S; Alves, B; Jantalia, C; Guimarães, A; dos Santos, C; dos Santos, S; Machado, É; Boddey, R. 2013. Soil carbon stocks under productive and degraded brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:914-928.

Céspedes, F; Fernández, J; Gobbi, J; Bernardis, A. 2012. Reservorio de carbono en el suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Rev. Fitotec. Mex.* 35:79-86.

Chatterjee, N; Ramachandran, P; Nair, V; Bhattacharjee, A; de Melo, E; Muschler, R; Noponen, M. 2020. Do coffee agroforestry systems always improve soil carbon stocks deeper in the soil? A case study from Turrialba, Costa Rica. *Forests* 11:49-72.

Conant, R; Paustian, K; Elliot, E. 2001. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecol. Appl.* 11:343-355.

- Costa, F; Sales, M; Valentim, J; Bardales, N; Amaral, E; Costa, C; Catani, V. 2016. Soil carbon sequestration in grass and grass-legume pastures in the western Brazilian Amazon. II SIGEE – Second International Symposium on Greenhouse Gases in Agriculture – Proceedings. p. 353-355.
- DiRienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2018. InfoStat versión 2018, Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Eclisa, R; Jobbagy, E; Jackson, R; Biganzoli, F; Piñeiro, G. 2012. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America, *Glob. Change Biol.* 18:3237-3251.
- Espinoza, Y. 2010. Efecto de la labranza sobre la materia orgánica y tamaño de agregados en un suelo cultivado con maíz en condiciones tropicales. *Bioagro* 22(3):177-184.
- Fisher, M; Rao, I; Lascano, E; Sanz, J; Thomas, R; Vera, R; Ayarza, M. 1995. Pasture soils as carbon sink. *Nature* 376:473
- Hernández, R; López, D. 2002. El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia* 27(10):529-553.
- Holdridge, L. 2000. *Ecología basada en zonas de vida*, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José, Costa Rica. 96 p.
- Kinner, A; Lunt, I; Spooner, P; McIntyre, S. 2009. The effect of soil compaction on germination and early growth of *Eucalyptus albens* and an exotic annual grass. *Austral Ecology* 34(6):698-704.
- Lal, R. 2004a. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623–1627.
- Liebig, M; Gross, J; Kronberg, S; Phillips, R; Hanson, J. 2010. Grazing management contributions to net global warming potential: a long-term evaluation in the Northern Great Plains. *J. Environ. Qual.* 39:799-809.
- Livestock Environmental Assessment and Performance. 2018. Guidelines for measuring soil carbon stocks and stock changes in livestock productions systems (Draft). FAO, Rome. 144p.
- Maia, S; Ogle, S; Cerri, C; Cerri, C. 2009. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. *Geoderma* 149(1-2):84-91.
- McSherry, M; Ritchie, M. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Glob. Chang. Biol.* 19:1347-1357.
- Noponen, M; Healey, J; Soto, G; Haggard, J. 2013. Sink or source—The potential of coffee agroforestry systems to sequester atmospheric CO₂ into soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 175:60-68.
- Paripovich, D; Balks, M; Schipper, L; Lowe, D. 2010. Impacts of conversion from forestry to pasture on soil physical properties of Vitrandis (Pumice Soils) in central North Island, New Zealand. *In World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, (19, 2010, Brisbane, Australia). Memoria. Brisbane, Australia. Published on DVD.
- Paz, F; Etchevers, J. 2016. Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 34: 339-355.
- Pérez, M; Medina, M; Hurtado, A; Arboleda, E; Medina, M. 2019. Reservas de carbono del pasto *Cenchrus clandestinus* (Poaceae) en los sistemas de manejo tradicional y silvopastoril, en diferentes relieves. *Revista de Biología Tropical* 67(4):769-783.
- Pringle, M; Allen, D; Dalal, R; Payne, J; Mayer, D; O'Reagain, P; Marchan, B. 2011. Soil carbon stock in the tropical rangelands of Australia: Effects of soil type and grazing pressure, and determination of sampling requirement. *Geoderma* 167-168:261-273.
- Rumpel, C; Kögel-Knabner, I. 2011. Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil* 338: 143-158.
- Smith, P. 2014. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global Change Biol.* 20:2708-2711.

Smith, P; Martino, D; Cai, Z; Gwary, D; Janzen, H; Kumar, P; McCarl, B; Ogle, S; O'Mara, F; Rice, C; Scholes, B; Sirotenko, O; Howden, M; McAllister, T; Pan, G; Romanenkov, V; Schneider, U; Towprayoon, S; Wattenbach, M; Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B.* 363:789–813.

Sotomayor-Ramírez, D; Espinoza, Y; Ramos-Santana, R. 2007. Short-term tillage practices on soil organic matter pools in a tropical Ultisol. *Australian J. Soil Research* 44:687-693.

van Groenigen, J; van Kessel, C; Hungate, B; Oenema, O; Powlson, D; van Groenigen, K. 2017. Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. *Environ. Sci. Technol.* 51(9):4738-4739.

Villalobos, E. 2010. Respuesta del pasto ratana (*Ischaemum indicum*) a la fertilización nitrogenada y edad de rebrote. Tesis Ing. Agr. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 57 p.

Willems, A; Augustenborg, C; Hepp, S; Lanigan, G; Hochstrasser, T; Kammann, C; Muller, C. 2011. Carbon dioxide emissions from spring ploughing of grassland in Ireland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 1414:347-351.