

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

Evaluación de los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo y el potencial de captura de carbono en sistemas de pasto Cayman (*Urochloa* híbrido *CIAT BRO2/1752*) en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras en la zona húmeda de Costa Rica

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Agroforestería y Agricultura Sostenible

Leonel Salas Juárez

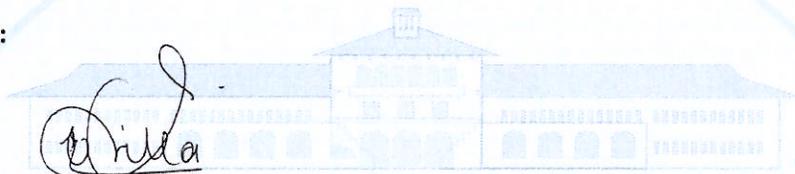
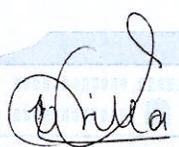
Turrialba, Costa Rica

Octubre, 2022

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA
Y AGRICULTURA SOSTENIBLE**

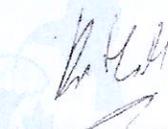
FIRMANTES:



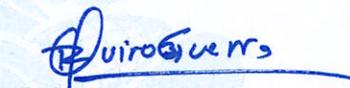
Cristóbal Villanueva Najarro, Ph.D.
Director de tesis



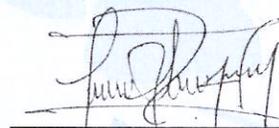
Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Rein van der Hoek, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



Leonel Salas Juárez
Candidato

Dedicatoria

A Dios,

Que es Todopoderoso, por haberme guiado e iluminado a lo largo de mis estudios de Maestría y por enseñarme que, sin Él, nada es posible.

A mi madre, Dominga Juárez Gómez,

Que es la persona más feliz del logro alcanzado, siempre la llevo en mi corazón, por apoyo y siempre estar pendiente de mí desde el inicio hasta el final de mi Maestría.

A mi padre, Leonardo Salas Enríquez (QEPD),

Por todos sus consejos y que desde el cielo me sigue cuidando y dando esas fuerzas para seguir adelante, este triunfo también es tuyo, gracias, papá.

A mis hermanos,

Por motivarme a ser mejor cada día

Agradecimientos

Al Iarna (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad), Universidad Rafael Landívar, Guatemala, por darme los consejos y transmitir la necesidad de formación a nivel de Maestría.

A mi director consejero, PhD. Cristóbal Villanueva, por confiarme el proyecto de investigación, por su paciencia, dedicación y enseñanzas en este proceso. Por su tiempo y esmero, conocimientos, amistad y gran apoyo, su desinteresado empeño y consejos durante el desarrollo de la presente investigación, le estoy muy agradecido, que Dios le bendiga siempre.

A los miembros del comité consejero PhD. Muhammad Ibrahim y PhD. Rein van der Hoek, por creer en mí, en mi trabajo y darme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación.

A mis profesores de Maestría, especialmente a los profesores Alejandro Imbach y Danilo Pezo por compartir sus conocimientos y enseñanzas.

A Rodrigo Granados y MSc. Luis Diego Jiménez, por brindarme su apoyo y conocimiento en el desarrollo de la fase de campo.

A Eduardo Corrales y Alejandra Ospina, por el apoyo en los análisis estadísticos.

Al programa de beca DAAD, por brindarme el apoyo económico, para poder concluir mis estudios, mil gracias.

A mis compañeros de promoción 2021-2022 y 2022-2023, por darme la oportunidad de compartir muchos momentos, culturas y tradiciones de sus países y por el apoyo en todo momento.

INDICE GENERAL

1. Introducción.....	1
2. Materiales y métodos.....	3
2.1. Área de estudio.....	3
.....	3
2.2. Establecimiento del ensayo	3
2.3. Tratamientos.....	4
2.4. Variables evaluadas.....	5
2.4.1 Dinámica de los parámetros físicos, químicos y biológicos (macrofauna) del suelo	5
2.5. Secuestro de carbono en el sistema	5
2.5.1. Carbono en suelo	5
2.5.2. Carbono en pasto	6
2.5.3. Carbono en la biomasa de leñosas forrajeras.....	6
2.6. Análisis estadístico.....	7
2.6.1 Parámetros físicos y químicos del suelo.....	7
2.6.2 Parámetros biológicos del suelo	8
2.6.3 Biomasa de forrajeras	8
3. Resultados y discusión	9
3.1. Relación de los sistemas forrajeros con los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo	9
3.2. Parámetros biológicos (macrofauna).....	16
3.3. Secuestro de carbono en los sistemas de pasto en asocio con leñosas forrajeras.....	18
3.3.1. Carbono en suelo	18
3.3.2. Carbono en pasto	19
3.3.3. Carbono en las leñosas forrajeras.....	20
3.3.3.1. Generación de ecuaciones alométricas	20
3.3.3.2. Modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de la biomasa las leñosas forrajeras	20
3.3.3.3. Aporte de carbono de las fracciones de las leñosas forrajeras.....	21
3.3.3.4. Carbono total del sistema.....	21
4. Conclusiones.....	24
5. Recomendaciones	24

6. Bibliografía	25
7. Anexos	33
Anexo 1. Valores dasométricos para la generación de la ecuación alométrica de la especie de <i>Tithonia diversifolia</i>	33
Anexo 2. Valores dasométricos para la generación de la ecuación alométrica de la especie de <i>Leucaena diversifolia</i>	33
Anexo 3. Densidad total de macrofauna (m ²)	34

Índice de tablas

Tabla 1. Tratamientos utilizados en la evaluación de la dinámica de los parámetros físicos, químicos, biológicos y el carbono abajo y sobre del suelo en sistemas de pasto Cayman (<i>Urochloa</i> híbrido CIAT BRO2/1752) en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras.	4
Tabla 2. Análisis de la densidad aparente del suelo.	9
Tabla 3. Densidad aparente del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	9
Tabla 4. Análisis de pH del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	11
Tabla 5. Características de pH en los distintos sistemas forrajeros.	11
Tabla 6. Análisis de los parámetros N, P y K del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	12
Tabla 7. Características químicas del suelo (N, P y K) en los distintos sistemas forrajeros.	13
Tabla 8. Análisis de Ca y Mg del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	14
Tabla 9. Características químicas del suelo (Ca y Mg) en los distintos sistemas forrajeros	15
Tabla 10. Carbono orgánico del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	15
Tabla 11. Carbono orgánico del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	16
Tabla 12. Macrofauna (riqueza y densidad) del suelo en los distintos sistemas forrajeros.	17
Tabla 13. Dinámica del secuestro de carbono (tC/ha) en el suelo en los distintos sistemas forrajeros. .	19
Tabla 14. Carbono almacenado en el pasto (tC/ha) en los sistemas de pastura de Cayman en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras.	19
Tabla 15. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en las leñosas forrajeras.	20
Tabla 16. Aporte de carbono por las fracciones de las leñosas forrajeras.	21
Tabla 17. Secuestro de carbono (tC/ha) en el suelo y arriba del suelo en los sistemas de pasto Cayman en monocultivo y asocio con leñosas forrajeras.	22

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio	3
Figura 2. Efecto del año sobre la densidad aparente del suelo en los distintos sistemas forrajeros. Medias de tratamientos con letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0.05$) según la prueba de medias LSD Fisher.	10
Figura 3. Exploración de las relaciones entre parámetros físicos y químicos del suelo en los años 2018 y 2022 del ensayo con forrajeras.	16
Figura 4. Relación Año: Tratamiento de la macrofauna. Medias de tratamientos con letras diferentes difieren significativamente ($p < 0.05$) según la prueba de medias LSD Fisher.	17

Figura 5. Aporte de los componentes en el carbono total de los sistemas de pasto Cayman en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras..... 22

Lista de acrónimos

Sigla	Definición
C	Carbono
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CO2	Dióxido de carbono
COS	Carbono orgánico del suelo
EPA	Agencia de Protección Ambiental (EE.UU.)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
K	Potasio
N	Nitrógeno
P	Fósforo
PIB	Producto Interno Bruto
SSP	Sistemas silvopastoriles
PCM	Pasto Cayman en monocultivo
PC+Ld	Pasto Cayman + <i>Leucaena diversifolia</i>
PC+Td	Pasto Cayman + <i>Tithonia diversifolia</i>

Evaluación de los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo y el potencial de captura de carbono en sistemas de pasto Cayman (*Urochloa* híbrido *CIAT BRO2/1752*) en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras en la zona húmeda de Costa Rica

Leonel Salas Juárez¹

¹Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Costa Rica.

Leonel.salas@catie.ac.cr

Resumen

Los sistemas silvopastoriles constituyen una alternativa para la conservación y restauración de pasturas, conservación de fuentes de agua y de la biodiversidad. Además, en los últimos años ha aumentado el interés en el manejo de pastos y el diseño de sistemas silvopastoriles para aumentar el secuestro de carbono, esto debido al potencial para acumular carbono abajo y arriba del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar de los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo y el potencial de captura de carbono en sistemas de pasto Cayman (*Urochloa* híbrido *CIAT BRO2/1752*) en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras en la zona húmeda de Costa Rica. La investigación se llevó a cabo en la finca comercial del Centro Agronómico Tropical y Enseñanza (CATIE), entre los meses de enero y agosto 2022. Los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo se evaluaron mediante un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con estructura parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo de los tratamientos PCM, PC+Ld y PC+Td (Pasto Cayman en Monocultivo, Pasto Cayman en asocio con *L. diversifolia* y Pasto Cayman en asocio con *T. diversifolia*, respectivamente) y el factor tiempo (2018 y 2022). La biomasa sobre el suelo de las leñosas forrajeras fue evaluada por medio de diseño de bloques completos al azar (DBCA), utilizando los mismos tratamientos. Ninguno de los parámetros físicos, químicos y biológicos presentó diferencia significativa entre tratamiento, sin embargo, se observó un aumento de la densidad aparente con relación al año en todos los tratamientos. Los parámetros químicos disminuyeron a mayor profundidad, la mayor tasa de cambio fue para el Fósforo (-23%). Mientras, la mayor tasa de cambio positiva la tuvo el Mg (56.7%), ambos casos relacionados con el tratamiento de PC+Ld. Para los parámetros biológicos, en el tiempo hubo un aumento de macrofauna (principalmente lombrices) y más acentuado en el tratamiento de PC+Ld. El mayor stock de carbono total lo presentó PC+Ld con 75 ± 13.15 tC/ha respecto al resto de los tratamientos. La mayor cantidad de carbono de los sistemas se encuentra abajo del suelo con valores arriba del 70%, el tratamiento PC+Td presenta la mayor acumulación con el 84%. En general, el sistema PC+Ld mostró ciertas ventajas en los cambios físicos, químicos y biológicos del suelo. Además, de la mayor captura de carbono.

Palabras claves: Stock de carbono, *Leucaena diversifolia*, *Tithonia diversifolia*, ecuación alométrica.

Evaluation of physical, chemical and biological soil parameters and carbon sequestration potential in Cayman grass (*Urochloa* hybrid CIAT BRO2/1752) systems in monoculture and in association with forage woody plants in the humid zone of Costa Rica.

Leonel Salas Juarez¹

¹Tropical Agricultural Research and Higher Education Center, CATIE, Costa Rica.

Leonel.salas@catie.ac.cr

Abstract

Silvopastoral systems constitute an alternative for the conservation and restoration of pastures, conservation of water sources and biodiversity. In addition, in recent years there has been increasing interest in pasture management and the design of silvopastoral systems to increase carbon sequestration, due to the potential to accumulate carbon below and above the soil. The objective of this study was to evaluate the physical, chemical and biological parameters of the soil and the potential for carbon sequestration in systems of Cayman grass (*Urochloa* hybrid CIAT BRO2/1752) in monoculture and in association with forage woody species in the humid zone of Costa Rica. The research was carried out at the commercial farm of the Tropical Agricultural and Teaching Center (CATIE), between January and August 2022. Soil physical, chemical and biological parameters were evaluated using a randomized complete block design (RCBD) with a split-plot structure and repeated measures over time for the treatments PCM, PC+Ld and PC+Td (Cayman grass in monoculture, Cayman grass in association with *L. diversifolia* and Cayman grass in association with *T. diversifolia*, respectively) and the time factor (2018 and 2022). The aboveground biomass of forage woody plants was evaluated by randomized complete block design (RCBD), using the same treatments. None of the physical, chemical and biological parameters showed significant differences between treatments; however, an increase in bulk density relative to the year was observed in all treatments. Chemical parameters decreased at greater depth, the highest rate of change was for phosphorus (-23%). Meanwhile, the highest positive rate of change was for Mg (56.7%), both cases related to the PC+Ld treatment. For the biological parameters, there was an increase in macrofauna (mainly earthworms) over time and more accentuated in the PC+Ld treatment. The highest total carbon stock was presented by PC+Ld with 75±13.15 tC/ha with respect to the rest of the treatments. The greatest amount of carbon in the systems was found below the soil with values above 70%, the PC+Td treatment presented the greatest accumulation with 84%. In general, the PC+Ld system showed certain advantages in the physical, chemical and biological changes of the soil. In addition, there was greater carbon sequestration.

Keywords: Carbon stock, *Leucaena diversifolia*, *Tithonia diversifolia*, allometric equation.

1. Introducción

En América Latina, la expansión de la producción ganadera está asociada a la deforestación, debido al predominio de los sistemas tradicionales de producción (pasturas degradadas, sin cobertura arbórea, sobrepastoreo, etc.). Por ejemplo, en la Amazonía se estima que el 70% de los bosques han sido convertidos a pastizales y cultivos forrajeros (Steinfeld *et al.* 2009). El recurso suelo constituye la mayor reserva de carbono orgánico y es vulnerable al impacto del cambio climático y a las actividades agropecuarias en caso de seguir implementando prácticas incorrectas (Barrezueta-Unda *et al.* 2019). En América Central, al menos 6.3 millones de hectáreas están cubiertas por pastizales degradados, la degradación en estas áreas aumenta, debido a que las tasas anuales de renovación son menores que las de degradación (Betancourt *et al.* 2007). Además, Szott *et al.* (2000) mencionan que en Centroamérica más del 50% de las pasturas se encuentran en un estado avanzado de degradación causando, anualmente, en Honduras entre 10 y 36 millones de dólares (Holmann 2004) y en Guatemala, 489 USD/ha/año de pérdidas económicas (Betancourt 2006). Las prácticas silvopastoriles contribuyen a la recuperación de suelos degradados (Contreras-Santos *et al.* 2019), además los SSP constituyen una alternativa para la conservación y restauración de pasturas (Nair *et al.* 2009), de manera adicional este tipo de prácticas favorecen a la conservación de las fuentes de agua y el flujo hidrológico (Ríos *et al.* 2007), y la conservación de la biodiversidad (Sáenz *et al.* 2007; Enríquez *et al.* 2007).

Las dos actividades económicas principales de nuestra región son las prácticas agrícolas y ganaderas (Gudynas 2015). El sector agropecuario de mayor importancia en Centroamérica es la ganadería bovina contribuyendo cerca del 20% del Producto Interno Bruto (PIB) de la región. Sin embargo, la ganadería representa el 1.3% del producto interno bruto regional (PIB), desde el punto de vista económico, en el subsector agropecuario más importante de la región (Acosta y Díaz 2014). Además, en los últimos años ha aumentado el interés en el manejo de pastos y diseño de sistemas silvopastoriles para fomentar el secuestro de carbono, esto debido al potencial de estos sistemas productivos para acumular carbono abajo y arriba del suelo (Ibrahim *et al.* 2010).

Es importante la transformación de los sistemas ganaderos tradicionales a la intensificación sostenible de los sistemas de producción basados en un mejor manejo de las pasturas por medio de pastoreo racional y asociados con leguminosas herbáceas, sistemas silvopastoriles novedosos o modernos, y liberación de áreas críticas para bosques. Este tipo de diseños de fincas permite mayor productividad, un mejor aprovechamiento de los nutrientes del suelo y mayor disponibilidad del pasto cuando éstos se encontraron asociados a especies arbóreas, debido a la mejora de la fertilidad del suelo y a las condiciones de sombra generadas en el agroecosistema, asimismo, el secuestro de carbono en el suelo, la biomasa radicular y aérea (Alvim *et al.* 2004; Hernández *et al.* 2006; Pezo 2019). El mejoramiento de pasturas y el aumento de la cobertura arbórea de las pasturas degradadas presentan un alto potencial de secuestro de carbono a nivel de finca. A nivel de paisaje, el potencial de las fincas ganaderas se vería incrementado insertando algunas áreas con plantaciones forestales y liberando áreas no aptas para la producción agropecuaria para la regeneración natural de bosques secundarios (Ibrahim *et al.* 2007).

En pasturas se han realizado una serie de investigaciones para conocer la agronomía de las plantas forrajeras, su respuesta ante factores bióticos y abióticos y la respuesta en producción de leche y carne. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre secuestro de carbono se han enfocado a las pasturas en monocultivo en diferentes estados de degradación. También, se han estudiado las pasturas con árboles dispersos de regeneración natural, pero poco se sabe de sistemas silvopastoriles de pasturas mejoradas en asocio con leñosas forrajeras como *Leucaena diversifolia* y *Tithonia diversifolia* y de estudios que

tengan un punto de partida (línea base) y el comportamiento del carbono orgánico y otros parámetros físicos y químicos en el suelo, que son parte importante en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción.

En los últimos años, CIAT y CATIE, en conjunto con instituciones nacionales, han realizado algunos trabajos pioneros de pasturas mejoradas en asocio con leguminosas leñosas (*Leucaena diversifolia* principalmente). Sotelo *et al.* (2017) en un estudio en CIAT evaluó la producción de carne usando el híbrido Cayman de la gramínea (*Urochloa*), en monocultivo y en asocio con leguminosas herbáceas (*Canavalia brasiliensis*) y leñosas (*L. diversifolia*). En dicho estudio encontró ganancias de peso que variaron entre 227 y 552 kg/ha/año para pasturas en monocultivo y el sistema silvopastoril Cayman+C. *brasiliensis*+*L. diversifolia* respectivamente. Asimismo, Jiménez (2007) en el Pacífico Central de Costa Rica evaluó el sistema silvopastoril de pasto *Urochloa brizantha* asociado con *Leucaena leucocephala* y encontró una ganancia diaria de peso promedio en el año de 500 g/animal/día. Además, el CIAT y CATIE, en conjunto con sus socios, en distintas ecorregiones ganaderas, han venido promoviendo estrategias de trabajo con el enfoque de la intensificación sostenible de los sistemas de producción ganadera. Bajo este marco, se han priorizado acciones para mejorar la eficiencia productiva y ambiental del sector primario, por medio de la identificación y validación de sistemas en asocio de gramíneas y leguminosas arbustivas (Chacón *et al.* 2015).

Se espera que el asocio de pasto Cayman con las leñosas *Leucaena diversifolia* y *Tithonia diversifolia* mejore la competitividad del sector ganadero, la seguridad alimenticia y nutricional, la resiliencia al cambio climático y que contribuya a las metas de reducción de emisiones de GEI que varios países han incluido dentro de sus estrategias nacionales, para cumplir con los compromisos nacionales e internacionales de producción con bajas emisiones de carbono (FAO 2010; Herrero *et al.* 2011; Thangata y Hildebrand 2012; Vijaya Venkata Raman *et al.* 2012). Además, estos sistemas integrados por pasturas mejoradas en asocio con leñosas forrajeras tienen un alto potencial de secuestro de carbono; Botero (2002) menciona que es posible encontrar gran cantidad de carbono provenientes de las raíces y materia orgánica en pasturas y SSP con poco tiempo de establecidos. Asimismo, el proceso implica beneficios importantes para el suelo, las pasturas y la calidad del ambiente, ante la prevención de erosión y la desertificación y para el incremento de la biodiversidad (Alonso 2011). El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial de captura de carbono y la dinámica de los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo en sistemas de pasto Cayman (*Urochloa* híbrido CIAT BRO2/1752) en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras en la zona húmeda de Costa Rica.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La presente investigación se realizó entre enero y febrero en la finca comercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicada a 640 msnm en Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica (Figura 1). La precipitación media anual es de 2700 mm, la temperatura media de 21.8 °C, la humedad relativa de 88% y la evapotranspiración potencial total anual de 1143.5 mm, pertenece Bosques Muy Húmedo Premontano (CATIE 2006). Los suelos se caracterizan como aluviales mixtos, Ultisol e Inceptisol con textura entre franco y franco arcilloso en los primeros horizontes (McDaniels 2001).

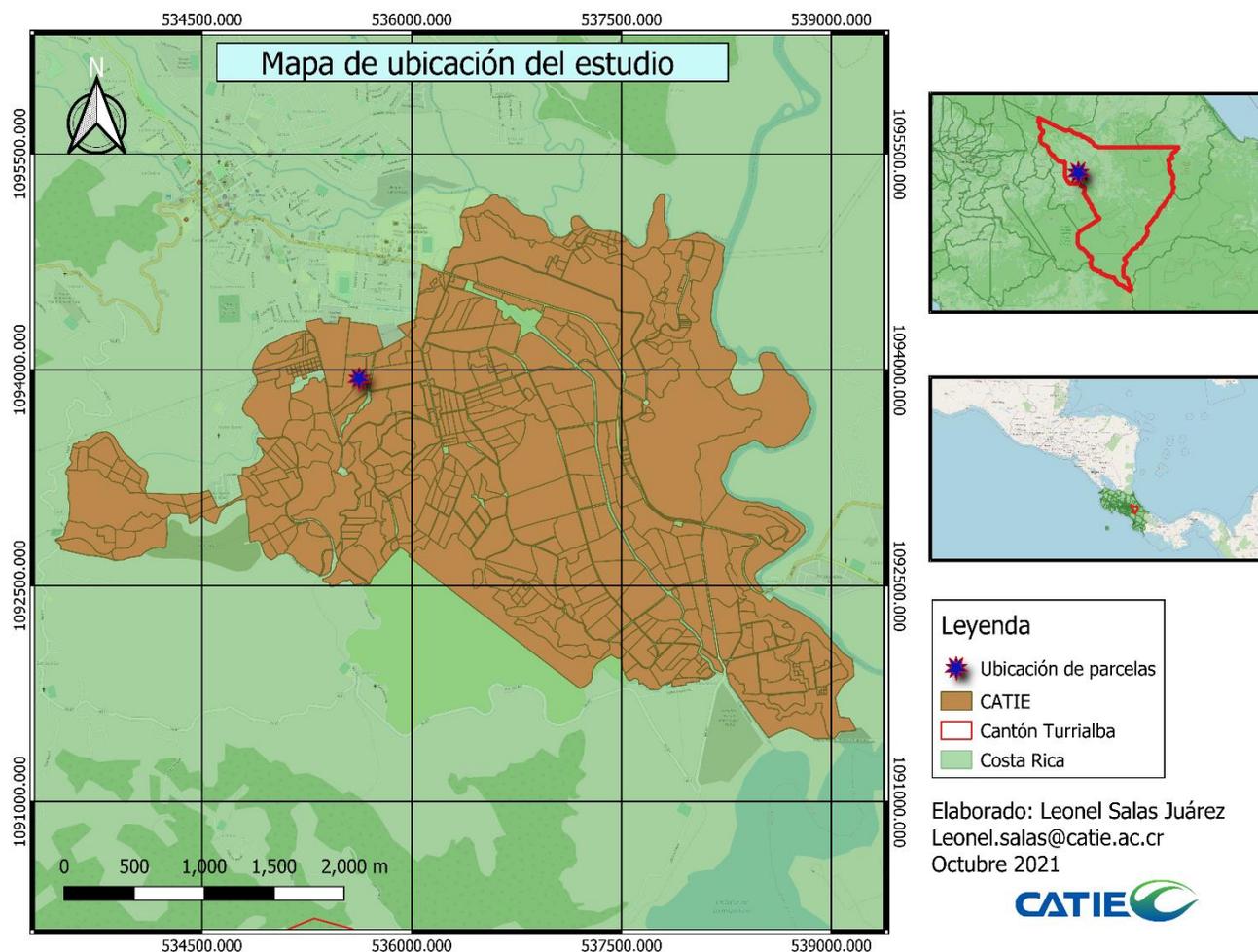


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

2.2. Establecimiento del ensayo

El establecimiento del experimento se realizó en noviembre del 2018, con prácticas de labranza (una pasada de arado y dos de rastra), luego se realizó la siembra de Cayman al voleo utilizando 8 kg de semilla por hectárea, distribuida de forma manual, seguidamente se tapó la semilla con ramas jaladas por un tractor. En el establecimiento del sistema no se aplicaron fertilizantes, ni se utilizó algún tipo de

enmienda. Para ambos socios, la densidad de siembra del pasto Cayman fue igual al de monocultivo. En todos los bloques, primero, se realizó la siembra de pasto Cayman en noviembre 2018 y posteriormente, en septiembre de 2019, se sembraron las leñosas forrajeras. En las parcelas de 2500 m² correspondientes a cada tratamiento se sembraron entre cuatro y nueve franjas a doble hilera de plantas de *Leucaena diversifolia* y *Tithonia diversifolia*, con distanciamiento de 5 m entre franjas, 1 m entre plantas y 1 m entre cada hilera dentro de cada franja, obteniendo densidades de siembra que van desde 576 a 648 plantas por parcela (2500 m²), equivalente a 2304 y 2592 plantas por hectárea. Antes de la siembra de las leñosas forrajeras, se realizó la aplicación de herbicida quemante (20% paraquat) sobre el pasto Cayman ya establecido, aplicado en franjas de 1.5 metros de ancho y correspondiendo cada franja a los respectivos surcos establecidos para cada leñosa forrajera. La siembra de *Tithonia diversifolia* se realizó en callejones utilizando material vegetativo (estacas) de 30 cm de altura, colocando dos estacas en equis (X) por punto de siembra; para *Leucaena diversifolia* la siembra se realizó utilizando plantas en bolsa plástica con seis meses de edad y una altura entre 0.50 y 1 m, que fueron sembradas y manejadas previamente en vivero, la siembra en vivero fue mediante semilla sexual.

Para las leñosas se consideró un periodo de establecimiento de 12 meses, al final de este periodo se realizó un corte de uniformización a 0.40 m de altura sobre la base del suelo para *Tithonia diversifolia* y a 1.5 m para *Leucaena diversifolia*, ambas especies fueron podadas utilizando sierra manual. La uniformización del pasto Cayman se realizó con motosegadora a una altura de 10 cm de la base del suelo. En el año 2021, las parcelas de 2500 m² recibieron dos aplicaciones de fertilizante Nitrato de amonio (34 % N), la primera aplicación fue en junio con una dosis de 35 kg de N/ha y 30 días después, la segunda aplicación con dosis de 17 kg de N/ha (David 2021).

2.3. Tratamientos

Para esta investigación se han priorizado los arreglos de gramíneas y leñosas forrajeras que constituyen los tratamientos (Tabla 1). Para la evaluación del potencial de captura de carbono en sistemas de pasto Cayman en monocultivo y en socio con leñosas forrajeras, así mismo, para conocer la dinámica de los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo se utilizaron cuatro bloques distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con parcelas divididas, cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones (parcelas) y cada una con un área de 2500 m². Este diseño ha sido utilizado para otros trabajos similares en ganado de carne por el CIAT en el valle del Cauca, Colombia (Sotelo *et al.* 2017) y para la producción de leche en CATIE, Turrialba, Costa Rica (David, 2021).

Tabla 1. Tratamientos utilizados en la evaluación de la dinámica de los parámetros físicos, químicos, biológicos y el carbono abajo y sobre del suelo en sistemas de pasto Cayman (*Urochloa* híbrido CIAT BRO2/1752) en monocultivo y en socio con leñosas forrajeras.

Tratamiento	ID
Cayman <i>Urochloa</i> híbrido (CIAT BR02/1752) en monocultivo	PCM
Cayman <i>Urochloa</i> híbrido (CIAT BR02/1752) en socio con <i>Leucaena diversifolia</i>	PC+Ld
Cayman <i>Urochloa</i> híbrido (CIAT BR02/1752) en socio con <i>Tithonia diversifolia</i>	PC+Td

2.4. Variables evaluadas

2.4.1 Dinámica de los parámetros físicos, químicos y biológicos (macrofauna) del suelo

Fue evaluado el parámetro físico densidad aparente (g/cc); entre los parámetros químicos fueron el pH, Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Carbono orgánico (COS); y la parte biológica fue la macrofauna (lombrices y otros organismos). El muestreo de suelos se realizó en las parcelas que corresponden a las repeticiones de cada tratamiento utilizando la metodología establecida por el proyecto Red de carbono en el cual participaron CATIE, CIAT, Universidad de Wageningen y otros socios nacionales (Amézquita *et al.* 2008; Cárdenas 2018). Esta misma metodología fue utilizada para el estudio de línea de base (2018). La metodología implica establecer una calicata principal de 1 m de ancho por 1 m de largo por 0.20 m de profundidad, en el centro de cada repetición por tratamiento. En la calicata principal las profundidades muestreadas fueron 0-10 y 10-20 cm.

De cada profundidad, se obtuvo una muestra para densidad aparente usando el cilindro de volumen conocido para tres caras; la cara 1 con dirección al este, la cara 2 al sur y la cara 3 al norte. Para el cálculo de densidad aparente se utilizó método del cilindro y consistió en introducir un cilindro metálico al suelo, extraer la muestra de volumen conocido y secarla en un horno (a 105 °C, por 24 horas) para determinar su peso. Posteriormente, el peso se dividió entre el volumen de suelo (volumen interno del cilindro) (Andrade e Ibrahim 2003). Para el análisis químico en cada profundidad se obtuvo una muestra compuesta (1000 g) para cada repetición del tratamiento. En total por tratamiento se recolectaron 24 muestras para densidad aparente y 8 muestras análisis químico.

La macrofauna se contó y se identificó con el establecimiento de una calicata de 0.25 m de ancho por 0.25 m de largo por 0.20 m de profundidad que se estableció a 10 m de la cara 2 de la calicata principal, esto se realizó en cada repetición de cada tratamiento (Vázquez *et al.* 2017). Las profundidades consideradas fueron 0-10 cm y 10-20 cm en las cuales se realizaron los conteos de adultos, jóvenes y huevos de lombrices y de otros organismos presentes en el suelo.

2.5. Secuestro de carbono en el sistema

2.5.1. Carbono en suelo

El muestreo para determinar el carbono secuestrado del suelo se realizó con la misma metodología descrita en el apéndice (2.4.1). En total por tratamiento se tomaron 8 muestras para el análisis químico donde se determinó en C.O. (%). Para estimar el carbono orgánico del suelo se usó la ecuación sugerida por Andrade e Ibrahim (2003).

$$\text{COS} = \% \text{CO} \times d_a \times P_s$$

Donde:

COS: carbono orgánico de suelos (t/ha)

%CO: concentración de carbono orgánico en suelos

da: densidad aparente (g/cc). Se hizo el ajuste de la densidad aparente según el uso de la tierra sugerido por Buurman *et al.* (2004).

Ps: profundidad del suelo (cm)

2.5.2. Carbono en pasto

Para estimar el carbono secuestrado en el pasto Cayman, se tomó en cuenta el rendimiento de materia seca del pasto (kgMS/ha). Este dato fue generado en la investigación realizada por David (2021), la cual se desarrolló en el mismo ensayo de pasto Cayman en asocio con leñosas forrajeras en la zona húmeda de Costa Rica. Para estimar el carbono en la biomasa de la raíz se asumió el factor sugerido por Ricón - Carruyo (1998), quien indica que el 29% de la biomasa aérea corresponde a la biomasa de raíz.

2.5.3. Carbono en la biomasa de leñosas forrajeras

Los datos se registraron en planillas de campo y fueron pasadas a una base de datos en Excel. En cada una de las unidades experimentales de los tratamientos de pasto con leñosas se estableció en el centro una parcela rectangular de 100 m², donde se levantó información de todos los individuos (40 árboles), dentro de la parcela, las variables que se midieron en todos los individuos fueron diámetro basal a 0.30 m del suelo (D₃₀), altura de poda y altura total de cada árbol. La altura de los árboles en pie se determinó con la ayuda de una vara calibrada de 7.5 m, los diámetros de los árboles se midieron con una cinta diamétrica.

Debido a que no existe una ecuación alométrica para las especies evaluadas, se procedió a realizar un muestreo destructivo para la generación de esta. Se seleccionaron 24 árboles en cada especie, una muestra mayor a la usada en los estudios por López-Santiago *et al.* (2019); Oca-Cano *et al.* (2020); Díaz-Ríos *et al.* (2016); Iglesias y Barchuk (2010). Con los datos de (D₃₀) de cada árbol, se hizo una distribución de frecuencias de las clases diamétricas de cada especie utilizando el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.* 2019). Para la *Leucaena diversifolia* se seleccionaron 7 individuos para cada una de las clases diamétricas: 3.10 a 4.83 cm; 4.83 – 6.55 cm; y 6.55 – 8.28 cm respectivamente; y 3 individuos para la clase diamétrica 8.28 – 10 cm. Para *Tithonia diversifolia* se derribaron 1 individuo para la clase diamétrica 0.00 – 1.33 cm; 11 individuos para la clase diamétrica 2.65 – 3.98 cm; y 12 individuos para la clase diamétrica 2.65 – 3.98 cm. Esta es una adaptación de lo realizado por Arias-Giraldo *et al.* (2009) y Arcos Dorado (2016), quienes, en Colombia, evaluaron la biomasa aérea de *Leucaena leucocephala* para estimar carbono del componente leñoso.

Los árboles se cortaron al nivel del suelo, luego fueron separadas y pesadas las fracciones como hojas, ramas, tallos y semillas. Posteriormente, de cada uno de estos componentes se recolectaron muestras con la ayuda de una báscula de reloj, con un peso de 300 g, secadas en un horno de circulación de aire forzado a 65 °C durante 48 horas, y pesadas hasta alcanzar un peso constante para determinar la MS (%) de acuerdo con la metodología propuesta por Yepes *et al.* (2011) e Ibrahim *et al.* (2007).

Las variables que se evaluaron para la generación de la ecuación alométrica para cada especie fueron la altura del árbol, altura de poda (solo para *Leucaena diversifolia*), altura de tocón (solo para *Tithonia diversifolia*), D₃₀, g MS de cada fracción del árbol (tallos, ramas, hojas y semilla¹) y la sumatoria de MS de todas las fracciones. Posteriormente se utilizó un análisis de correlación de Pearson para identificar cuáles de las variables tenían mayor coeficiente de correlación y cuales tenían el p-valor menor a 0.05. Luego se realizaron análisis de Modelos Lineales Generales y Mixtos para identificar el mejor modelo según los Criterios de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información de Bayesiano (BIC) con el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.* 2019).

Con la ecuación generada, se estimó el rendimiento de materia seca de la biomasa de los individuos registrados en las parcelas de leñosas forrajeras. Obteniendo la materia seca de la biomasa de cada

¹ La fracción de semilla solo se evaluó en *Leucaena diversifolia*.

individuo se aplicó a la biomasa el Factor de fracción de carbono 0.5 sugerido por el IPCC (2003) y el resultado se extrapola a tC/ha.

En vista que no existen información sobre la biomasa radicular de las leñosas forrajeras, se tomó un valor conservador del 20% reportado. Este es un valor conservador sugerido para especies leñosas (Fonseca-González *et al.* 2021; Lin *et al.* 2017).

2.6. Análisis estadístico

Debido a que ninguno de los tratamientos presentó diferencia significativa ($p > 0.05$) en los parámetros físicos, químicos y biológicos, asimismo el secuestro de carbono en suelo y en leñosas forrajeras, el comportamiento de los tratamientos fue analizado por medio de estadística descriptiva.

En general, para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables de interés se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) bajo el enfoque de Modelos Lineales Generales y Mixtos (MLM) para los parámetros físicos y químicos. En el caso de los parámetros biológicos del suelo se utilizó para ajustar el modelo ANDEVA el enfoque de Modelos Generalizados Mixtos (MLGM). El enfoque mixto permitió identificar los diferentes factores del experimento como efecto fijos y aleatorios según su naturaleza, además de modelar la falta de independencia y homogeneidad de varianza mediante el ajuste de diferentes modelos. Para seleccionar el mejor de los modelos se utilizaron los criterios de información penalizada (Criterios de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información de Schwarz (BIC)). La comprobación de los supuestos distribucionales de los errores se realizó analizando los gráficos de diagnóstico del modelo. Finalmente, para las variables en las que se concluye que existen diferencias estadísticas entre tratamientos ($p < 0.05$), se realizó la prueba de comparaciones de medias LSD Fisher. Todos los análisis se hicieron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.* 2019).

2.6.1 Parámetros físicos y químicos del suelo

El modelo para estas variables toma en cuenta la estructura de correlación espacial (parcelas principales) y la estructura de correlación temporal (efecto del año). Además, se modeló la falta de homogeneidad de varianzas.

El modelo estadístico para los parámetros físicos y químicos fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + EPP_{ij} + P_k + T_j P_k + ESP_{ijk} + A_l + T_j A_l + P_k A_l + T_j P_k A_l + E_{ijkl} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Y_{ijk} Parámetros físicos y químicos del suelo

μ Media general

B_i Efecto aleatorio del i -ésimo bloque

T_j Efecto del j -ésimo tratamiento ($j = \text{Cayman, } Tithonia\ diversifolia, \text{ } Leucaena\ diversifolia$)

EPP_{ij} Error aleatorio asociado al ij -ésimo efecto de la parcela principal. Se supone distribuido normal con media cero y varianza constante entre las parcelas ij -ésimas parcelas principales

P_k Efecto de la k -ésima profundidad

$T_j P_k$ Efecto de la interacción entre el j -ésimo tratamiento en la k -ésima profundidad

ESP_{ijk} Error aleatorio asociado a la ijk -ésimo de la subparcela. Se supone distribuido normal con media cero y varianza constante entre las ijk -ésimas subparcelas

A_l Efecto del l -ésimo año

$T_j A_l$ Efecto de la interacción entre el j -ésimo tratamiento y el l -ésimo año

$P_k A_l$ Efecto de la interacción entre la k -ésima profundidad y el l -ésimo año
 $T_j P_k A_l$ Efecto de la interacción entre j -ésimo tratamiento, k -ésima profundidad y l -ésimo año
 E_{ijkl} Error residual asociado a la $ijkl$ -ésima observación. Se supone distribuido normal con media cero y varianza constante.
 Además, los diferentes niveles de error se suponen independientes.

2.6.2 Parámetros biológicos del suelo

Para los parámetros biológicos se ajustaron MLGM dado que se contabilizó el número de individuos (macrofauna), además, a diferencia del modelo de la Ecuación, en este no se contempla el efecto de la profundidad. El modelo ajustado toma en cuenta que la variable respuesta sigue una distribución Poisson (conteo), con función de enlace logaritmo.

2.6.3 Biomasa de forrajeras

Para la biomasa de forrajeras (pasto y leñosas), a diferencia de la Ecuación 1, no se tomaron evaluaciones en los diferentes años por lo que este factor se omite del modelo ajustado. El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + EPP_{ij} + P_k + T_j P_k + E_{ijk} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

- Y_{ijk} Biomasa sobre el suelo en el i -ésimo bloque, j -ésimo tratamiento
- μ Media general
- B_i Efecto aleatorio del i -ésimo bloque
- T_j Efecto del j -ésimo Tratamiento (j =Cayman, *Tithonia diversifolia*, *Leucaena diversifolia*)
- P_k Efecto de la k -ésima profundidad
- $T_j P_k$ Efecto de la interacción entre el j -ésimo tratamiento en la k -ésima profundidad
- EPP_{ij} Error residual asociado a la $ijkl$ -ésima observación. Se supone distribuido normal con media cero y varianza constante.

3. Resultados y discusión

3.1. Relación de los sistemas forrajeros con los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo

Los resultados obtenidos en relación con la densidad aparente (Da) del suelo no mostraron diferencias significativas entre tratamientos ni en las interacciones ($p > 0.05$). Solamente se encontró un efecto significativo entre los años de estudio ($p \leq 0.05$; Tabla 2), donde la densidad aparente cambió de 1.03 ± 0.02 g/cc a 1.13 ± 0.02 g/cc entre el 2018 y 2022 respectivamente.

Tabla 2. Análisis de la densidad aparente del suelo.

ID	Densidad aparente (g/cc)
	p-value
Año	0.0001
Tratamiento	0.8029
Prof. (cm)	0.1523
Año: Tratamiento	0.5452
Año: Prof. (cm)	0.8653
Tratamiento: Prof. (cm)	0.9274
Año: tratamiento: Prof. (cm)	0.9132

A los primeros 10 cm de profundidad del suelo, los tres tratamientos presentaron valores muy similares de densidad aparente para los dos momentos en el tiempo (Tabla 3). Para el caso del perfil de 10-20 cm se encontraron valores mayores en el año 2022 con relación al año 2018.

Tabla 3. Densidad aparente del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

Densidad aparente (g/cc)									
Profundidad (cm)	PCM			PC+Ld			PC+Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
0-10	1±0.06	1.12±0.04	12	0.99±0.02	1.09±0.01	10.1	0.99±0.05	1.1±0.05	11.1
10-20	1.04±0.02	1.17±0.06	12.5	1.04±0.04	1.11±0.02	6.7	1.05±0.04	1.18±0.03	12.4
Promedio	1.02±0.04	1.145±0.05	12.25	1.015±0.03	1.1±0.02	8.4	1.02±0.05	1.14±0.04	11.75

*Medias ± Error estándar

La Da mostró un aumento en el tiempo con relación a los tratamientos; en el tratamiento de PCM el promedio pasó de 1.02 ± 0.04 g/cc a 1.15 ± 0.05 g/cc, mientras que en el caso de PC+Ld pasó 1.015 ± 0.03 g/cc a 1.11 ± 0.02 g/cc, y el de PC+Td pasó de 1.02 ± 0.05 g/cc a 1.14 ± 0.04 g/cc para el año 2018 y 2022 respectivamente (Figura 2).

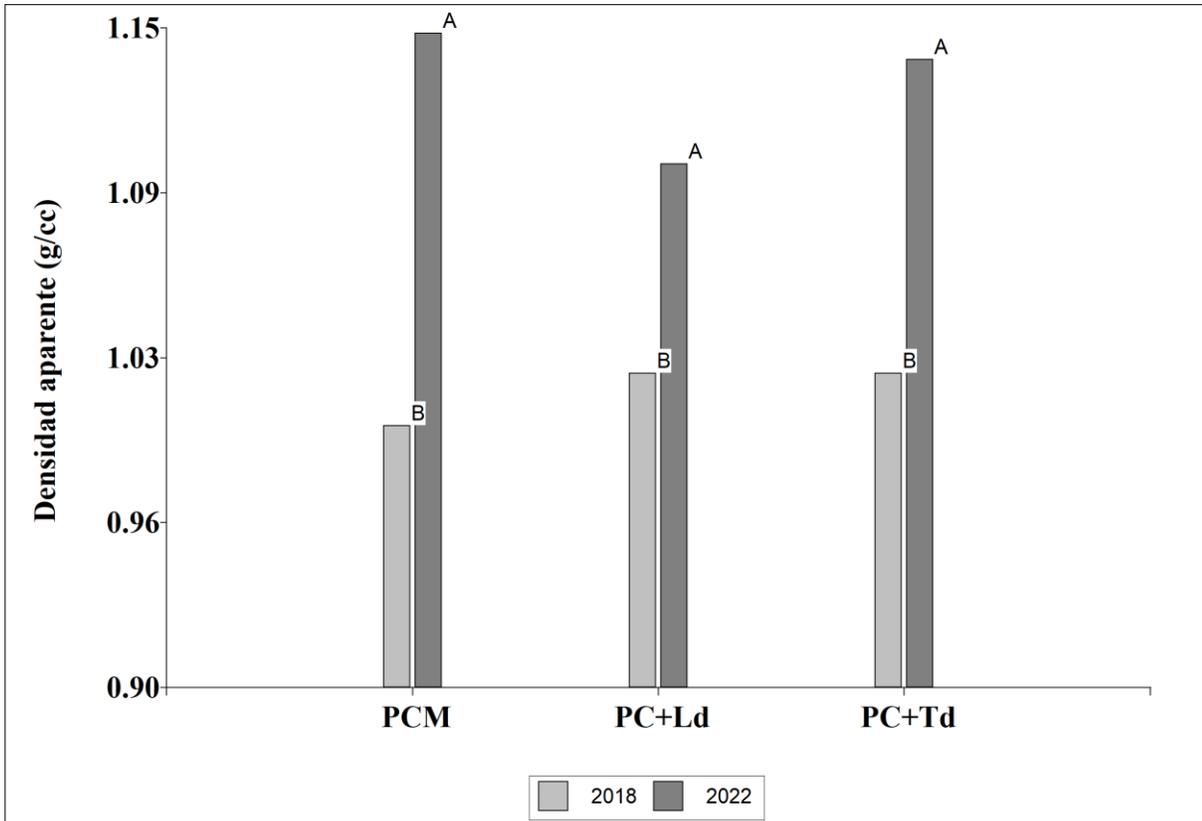


Figura 2. Efecto del año sobre la densidad aparente del suelo en los distintos sistemas forrajeros. Medias de tratamientos con letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0.05$) según la prueba de medias LSD Fisher.

La tendencia podría ser por el efecto del pisoteo de los animales en el pastoreo que deforman la superficie del suelo, lo cual tiene relación con lo reportado por Bigarín *et al.* (2010), en su investigación en sistemas silvopastoriles en una Llanura al Norte de México. Por otro lado, el estudio de Contreras-Santos *et al.* (2019) realizado en el municipio de Cereté, Córdoba, Colombia en cuatro sistemas silvopastoriles y una pradera en monocultivo con 24 años de establecimiento encontró valores de Da mayores que el presente estudio. Estos variaron entre 1.12 a 1.54 g/cc en la profundidad de 0-30 cm en pasturas sin árboles, en comparación con los del presente estudio que pasó de 1 a 1.17 g/cc para el tratamiento de PCM. En los sistemas con pasturas + arbustos forrajeros en profundidad de 0 a 30 cm obtuvieron valores de 1.22 a 1.24 g/cc, también mayores a los del presente estudio que presentó valores de 0.99 a 1.18 g/cc en los tratamientos de PC+Ld y PC+Td. Sánchez (2021), en un trabajo realizado en la zona húmeda de Perú en sistemas silvopastoriles de cuatro años de edad, encontró una Da similar a la del presente estudio que varió entre 0.90 y 1.04 g/cc de 0 a 30 cm de profundidad evaluados.

Los valores encontrados en esta investigación son también inferiores a los de Gálvez *et al.* (2019) en un sistema silvopastoril multiestrato y convencional en la zona húmeda tropical de Colombia cuyos valores en profundidades de 0 a 40 cm fueron de 1.04 a 1.12 g/cc. Ninguno de los estudios comparativos ha tomado en cuenta una línea base para conocer la dinámica de los cambios físicos, químicos y biológicos del suelo del suelo en el tiempo, mientras que la presente investigación cuenta con una línea base para poder comparar en el tiempo los cambios en el suelo según los tipos de sistemas bajo evaluación.

Con respecto al pH, este no presentó un efecto significativo entre tratamientos, ni en las interacciones ($p > 0.05$), pero sí hubo efecto significativo entre años ($p \leq 0.05$; Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de pH del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

ID	pH (H ₂ O)
	p-value
Año	0.0001
Tratamiento	0.3742
Profundidad (cm)	0.0367
Año: Tratamiento	0.9336
Año: Profundidad (cm)	0.1324
Tratamiento: Profundidad (cm)	0.9924
Año: tratamiento: Profundidad (cm)	0.8149

Los valores de pH tendieron a bajar un poco a mayor profundidad y en el tiempo en todos los tratamientos en donde la reducción varió entre -2.8 y -6.9%. Los valores promedios variaron entre 5.24 ± 0.00 a 5.45 ± 0.00 y 4.98 ± 0.00 a 5.40 ± 0.00 para el año 2018 y 2022 respectivamente (Tabla 5). Según Osorio (2012), estos rangos de pH son considerados fuertemente ácidos. Esto significa que, en estos suelos, para que exista una mayor disponibilidad de nutrientes, requerirán enmiendas para aumentar el pH.

Tabla 5. Características de pH en los distintos sistemas forrajeros.

pH (H ₂ O)									
Profundidad (cm)	PCM			PC + Ld			PC+Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
0-10	5.55±0.13	5.25±0.10	-5.4	5.35±0.26	4.98±0.15	-6.9	5.43±0.19	5.13±0.18	-5.5
10-20	5.35±0.10	5.2±0.21	-2.8	5.13±0.23	4.98±0.14	-2.9	5.28±0.19	5±0.11	-5.3
Promedio	5.45±0.12	5.23±0.16	-4.1	5.24±0.25	4.98±0.15	-5	5.36±0.19	5.4±0.15	-5.4

*Medias ± Error estándar

Los resultados de pH del presente estudio fueron similares a los encontrados por Arteaga *et al.* (2016) en un estudio en Pasto, Colombia. Los autores encontraron valores entre 5.23 a 5.77 en sistemas de pradera de pasto kikuyu (*Cenchrus clandestinus*) de 20 años de establecido, barrera multiestrato de Acacia (*Acacia decurrens*) en asocio quillotoco (*Tecoma stans*) y mora (*Rubus glaucus*) de 23 años de establecido, sistema de Acacia (*Acacia decurrens*), Acacia japonesa (*Acacia melanoxylon*) y Aliso

(*Alnus acuminata*), SSP banco de proteína con especies de Acacia (*Acacia decurrens*), Retamo (*Retama sphaerocarpa*), Chilca (*Baccharis* sp) y Quillotoco (*Tecoma stans*).

Mientras tanto, Contreras-Santos *et al.* (2021), encontraron diferencias entre los tratamientos de sistemas silvopastoriles y la pradera con solo gramíneas ($p < 0.05$), con seis años de establecidos, donde el tratamiento *Acacia mangium* + *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa presentó la mayor concentración de iones H^+ (5.83 ± 0.22), siendo una condición moderadamente ácida, lo que contrasta con lo obtenido con el tratamiento *Tectona grandis* + *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa (6.64 ± 0.08). Los otros tratamientos mostraron pH con valores entre 6.18 ± 0.16 y 6.31 ± 0.32 , también considerados ligeramente ácidos. La acidez del suelo podría tener relación al plan de fertilización con el uso anterior que fue caña de azúcar, en donde se realizó una aplicación de 500 kg/ha de una fórmula compuesta 15-3-31 por 18 años.

El pH es un indicador de acidez del suelo y es un factor que afecta directamente la biodisponibilidad de nutrientes, actividad de microorganismos y solubilidad de minerales en el suelo (Roa 2018). Para que exista una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas es importante manejar niveles de pH entre 6.0 a 6.5, caso contrario, si están por debajo se necesita hacer enmiendas. Los sistemas ganaderos de pasto Cayman asociado con las leñosas forrajeras permiten el incremento del reciclaje de nutrientes a través de su sistema radicular, el cual explora mayores profundidades en el suelo que las gramíneas y existe la posibilidad de recuperación de nutrientes en capas profundas que se han profundizado por procesos de lixiviación (Navas *et al.* 2020).

Con respecto a la concentración de los macronutrientes no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ni interacciones ($p > 0.05$), pero sí hay efecto significativo de año para el N y P ($p \leq 0.05$); igualmente hubo efecto de la profundidad para N, P y K ($p \leq 0.05$; Tabla 6). La concentración del nutriente se reduce conforme aumenta la profundidad.

Tabla 6. Análisis de los parámetros N, P y K del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

ID	N (%)	P (mg/l)	K (cmol(+)/l-)
	p-value		
Año	0.0554	0.0001	0.7146
Tratamiento	0.8794	0.3081	0.9994
Profundidad (cm)	0.0009	0.02	0.0011
Año: Tratamiento	0.3668	0.7138	0.2082
Año: Profundidad (cm)	0.4315	0.1764	0.2526
Tratamiento: Profundidad (cm)	0.8806	0.9837	0.5768
Año: tratamiento: Profundidad (cm)	0.4208	0.4841	0.945

Los valores de N y P presentaron tasas de cambio negativas (Tabla 7), excepto para el K en el tratamiento PC+Ld. En los casos negativos, esta tendencia podría tener relación a que en el manejo actual no existe un plan de fertilización para la retribución de los nutrimentos exportados del sistema. Se espera que conforme maduren los sistemas de pasto con leñosas forrajeras, las leñosas puedan mover nutrimentos de capas profundas del suelo a la superficie para cubrir la demanda de nutrimentos del pasto. De igual manera, con la información que siga generando este ensayo de largo plazo se identificarán los sistemas forrajeros que tengan el menor déficit en el balance de nutrientes del suelo.

Tabla 7. Características químicas del suelo (N, P y K) en los distintos sistemas forrajeros.

Profundidad (cm)	PCM			PC + Ld			PC + Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
Nitrógeno (%)									
0-10	0.28±0.05	0.26±0.03	-7.1	0.27±0.03	0.27±0.02	0	0.28±0.05	0.26±0.04	-7.1
10-20	0.24±0.04	0.17±0.02	-29.2	0.22±0.02	0.21±0.01	-4.5	0.22±0.02	0.19±0.03	-13.6
Promedio	0.3±0.05	0.22±0.03	-17.3	0.25±0.03	0.24±0.02	-2	0.25±0.04	0.23±0.04	-10
Fósforo (mg/l)									
0-10	15.08±1.52	11.45±0.94	-24.1	16.63±2.45	13.48±1.43	-18.9	16.93±1.02	12.95±0.47	-23.5
10-20	11.68±2.13	10.38±2.27	-11.1	14.6±2.54	11.23±1.68	-23.1	13.65±3.12	12.26±1.79	-10.2
Promedio	13.4±1.83	10.92±1.61	-18.4	15.62±2.50	12.36±1.56	-20.9	15.29±2.07	12.61±1.13	-17.6
Potasio (cmol(+)/l-)									
0-10	0.31±0.11	0.26±0.06	-16.1	0.26±0.14	0.29±0.08	11.5	0.3±0.10	0.2±0.07	-33.3
10-20	0.13±0.05	0.15±0.05	15.4	0.12±0.07	0.19±0.09	58.3	0.18±0.09	0.13±0.08	-27.8
Promedio	0.2±0.08	0.21±0.06	-6.8	0.19±0.11	0.24±0.09	26.3	0.24±0.10	0.17±0.08	-31.3

*Medias ± Error estándar

El P es relevante para los procesos de fotosintéticos (Rodríguez & Restrepo 2016), la fotosíntesis se activa cuando después de las podas en las especies forrajeras existe una mayor penetración de luz solar. Debido a este incremento de actividad fotosintética exige más disponibilidad metabólica de fósforo, destinada a la síntesis de compuestos que garantizan el crecimiento y desarrollo de la planta y en este caso, ese elemento se absorbe por las raíces, por lo que ésta puede ser la posible causa de su disminución en el suelo. Por otro lado, Fassbender (1993), menciona que los residuos vegetales que pasan al suelo tienen un alto contenido de P orgánico, que representa entre el 40 y 80 % del P total, razón por la que, con el tiempo, se sabrá el efecto del aporte de fósforo en el follaje de la leñosa al suelo. Fassbender (1987), indica que la tasa de transferencia del fósforo a partir de residuos vegetales y tasa de absorción por otras plantas es baja, y que las principales reservas de este mineral se encuentran en el suelo.

El tratamiento de PC+Td presentó tasas de cambio negativas de P en las dos profundidades, a pesar de que se reporta que la especie de *Tithonia diversifolia* tiene un alto valor para mejorar la fertilidad del suelo (De Oliveira *et al.* 2007). Asimismo, Crespo *et al.* (2011), manifiestan que esta especie tiene alto contenido de fósforo y rápida capacidad de descomposición en el suelo, razón por la cual es muy eficiente como abono verde. Los resultados muestran que se necesita más tiempo para ver esos cambios positivos en el suelo. Por otro lado, la disminución de este mineral podría estar relacionada a un sinergismo entre los hongos formadores de micorrizas y la planta. Esta sinergia podría ser la responsable en la captura del

fósforo o si existe una aportación a la presencia de ácidos orgánicos en las raíces de la planta (Calle & Murgueitio 2008).

Crespo *et al.* (1986), manifiestan que la disminución de potasio el tratamiento de PCM y PC+Td podría estar relacionado con las pasturas, debido que efectúan altas extracciones de este elemento. Estas extracciones se incrementan cuando la explotación es más intensa. Asimismo, el retorno de este elemento mineral con el follaje de las especies forrajeras no es suficiente para satisfacer las necesidades y las plantas tienden a utilizar partes de las reservas disponibles en el suelo (Fassbender 1987). Las pérdidas de potasio y los cambios ocurridos en los otros elementos minerales en el suelo estén influenciadas por la presencia del árbol y por depósito del follaje de los árboles por medio de las podas. Las plantas (leñosas forrajeras) su crecimiento ocurre bajo determinadas condiciones de suelo y clima, pero también influyen sobre ellos, lo que provoca que, de alguna manera, lo modifican (Libreros *et al.* 1994).

Se considera que el sistema es demasiado reciente para poder ver los cambios significativos entre tratamientos, con el tiempo se espera que los tratamientos de Cayman en asocio con leñosas forrajeras presenten mejores resultados que en monocultivo. En este sentido, Ibrahim *et al.* (2007) y Pezo (2019) señalan que el mejoramiento de pasturas y el aumento de la cobertura arbórea en las pasturas degradadas pueden incrementar el secuestro de carbono a nivel de finca y la fertilidad de los suelos, la biomasa radicular y aérea. Por otro lado, Carvalho *et al.* (2003) en un estudio en un sistema silvopastoril de *Acacia mangium* y *Urochloa decumbens* destacaron que conforme aumenta la edad del sistema los árboles tienen efecto en la fertilidad del suelo en capas superficiales y profundas.

Con respecto a la concentración de Ca y Mg no se encontró diferencia significativa entre tratamientos e interacciones ($p > 0.05$); pero sí hubo efecto significativo de la profundidad para ambos nutrientes ($p \leq 0.05$; Tabla 8).

Tabla 8. Análisis de Ca y Mg del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

ID	Ca (cmol(+)/l-)	Mg (cmol(+)/l-)
	p-value	
Año	0.4507	0.0661
Tratamiento	0.297	0.771
Profundidad (cm)	0.0001	0.003
Año: Tratamiento	0.6394	0.6073
Año: Profundidad (cm)	0.1005	0.4276
Tratamiento: Profundidad (cm)	0.8416	0.8463
Año: tratamiento: Profundidad (cm)	0.7849	0.9189

La concentración de Ca tendió a reducirse según aumenta la profundidad en todos los tratamientos, pero tuvo un cambio positivo en el tiempo, en la mayoría de los tratamientos, que varió entre 4.5 y 14.3%, excepto en la profundidad 0-10 cm para los tratamientos de pasto con leñosas forrajeras en donde hubo una disminución entre -4.9 y -11.7% (Tabla 9). El Mg presentó una tasa de cambio positiva en las dos profundidades de los tres tratamientos y el promedio fue mayor en el tratamiento de PC+Ld (56.7%).

Tabla 9. Características químicas del suelo (Ca y Mg) en los distintos sistemas forrajeros

Calcio(cmol(+)/l-)									
Profundidad (cm)	PCM			PC + Ld			PC + Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
0-10	5.37±0.39	5.61±0.18	4.5	4.8±0.53	4.24±0.43	-11.7	5.3±0.52	5.04±0.51	-4.9
10-20	3.78±0.23	4.32±0.57	14.3	3.14±0.63	3.52±0.47	12.1	3.42±0.48	3.74±0.40	9.4
Promedio	4.6±0.31	4.97±0.38	8.5	3.97±0.58	3.88±0.45	-2.3	4.36±0.5	3.39±0.46	0.7
Magnesio (cmol(+)/l-)									
0-10	1.29±0.21	1.47±0.23	14	1.23±0.57	2.24±0.35	82.1	1.24±0.24	1.32±0.35	6.5
10-20	0.84±0.06	1.21±0.30	44	0.87±0.39	1.05±0.32	20.7	0.82±0.12	0.9±0.21	9.8
Promedio	1.1±0.14	1.34±0.27	25.8	1.05±0.48	1.65±0.34	56.7	1.03±0.18	1.11±0.28	7.8

*Medias ± Error estándar

De acuerdo con Álvarez (2002), los contenidos de Ca y Mg son importantes porque ayudan a reducir la acidez de los suelos. Los cationes de estos nutrientes se presentan de muchas formas, que difieren de su disponibilidad para las plantas. Así mismo, Schroth y Sinclair (2003) mencionan que estos nutrientes están disponibles como fracciones intercambiables y solubles en el suelo y ayudan al desarrollo estructural de las plantas.

Saborío-Montero *et al.* (2015) manifiestan que se debe realizar una fertilización adecuada de acuerdo con las necesidades nutricionales del terreno, para optimizar la producción de pasturas, lo cual podría tener un impacto positivo en la rentabilidad de los sistemas de producción ganadera. Esta decisión debe realizarse en relación a los análisis de suelos y la demanda del cultivo o pasto.

Con respecto al carbono orgánico del suelo no presentó diferencia significativa entre tratamientos ni interacciones (($p > 0.05$), pero sí hubo efecto significativo del año y profundidad ($p \leq 0.05$; Tabla 10).

Tabla 10. Carbono orgánico del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

ID	COS (%)
	p-value
Año	0.0492
Tratamiento	0.8448
Profundidad. (cm)	0.0006
Año: Tratamiento	0.8124
Año: Profundidad (cm)	0.3563
Tratamiento: Profundidad (cm)	0.8613
Año: tratamiento: Profundidad (cm)	0.4641

El valor de carbono orgánico del suelo presentó tasas de cambio negativas, los promedios variaron entre -5.6% a -12.6% y donde el tratamiento PC+Ld tuvo el menor cambio negativo (Tabla 11). La tendencia podría tener relación con que en el manejo actual no existe un plan de fertilización para la retribución de los nutrientes exportados del sistema. El carbono orgánico del suelo tiende a disminuir a mayor

profundidad, lo que también podría estar relacionado a las modificaciones en la cobertura del suelo en los primeros 30 cm del suelo (Hairiah *et al.* 2011). Los cambios de uso del suelo provocan pérdidas de COS y generan emisiones de GEI (PNUMA-ORPALC / FS-UNEP Centre 2014).

Tabla 11. Carbono orgánico del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

Carbono Orgánico (%)									
Profundidad (cm)	PCM			PC+Ld			PC+Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
0-10	3.02±0.66	2.98±0.39	-1.3	2.89±0.33	2.84±0.24	-1.7	3.14±0.50	2.84±0.45	-9.6
10-20	2.4±0.45	1.79±0.18	-25.4	2.27±0.12	2.03±0.14	-10.6	2.33±0.24	1.94±0.30	-16.7
Promedio	2.7±0.56	2.39±0.29	-12	2.58±0.23	2.44±0.19	-5.6	2.74±0.37	2.39±0.38	-12.6

*Medias ± Error estándar

Por medio de análisis de componentes principales (gráfico bi-plot), se encontró que los primeros dos componentes explican el 80% de la variación de los datos para los años 2018 y 2022. En el mismo se identificó que existe una alta correlación entre COS y el N, lo cual contribuirá a mayor materia orgánica y secuestro de carbono en el suelo (Figura 3). Arteaga (2016) señala la relación importante que guardan el N, la MO y el Carbono del suelo. Asimismo, explica la contribución del material de las podas de leñosas y las excretas del ganado en el contenido de MO, CO y N en sistemas silvopastoriles.

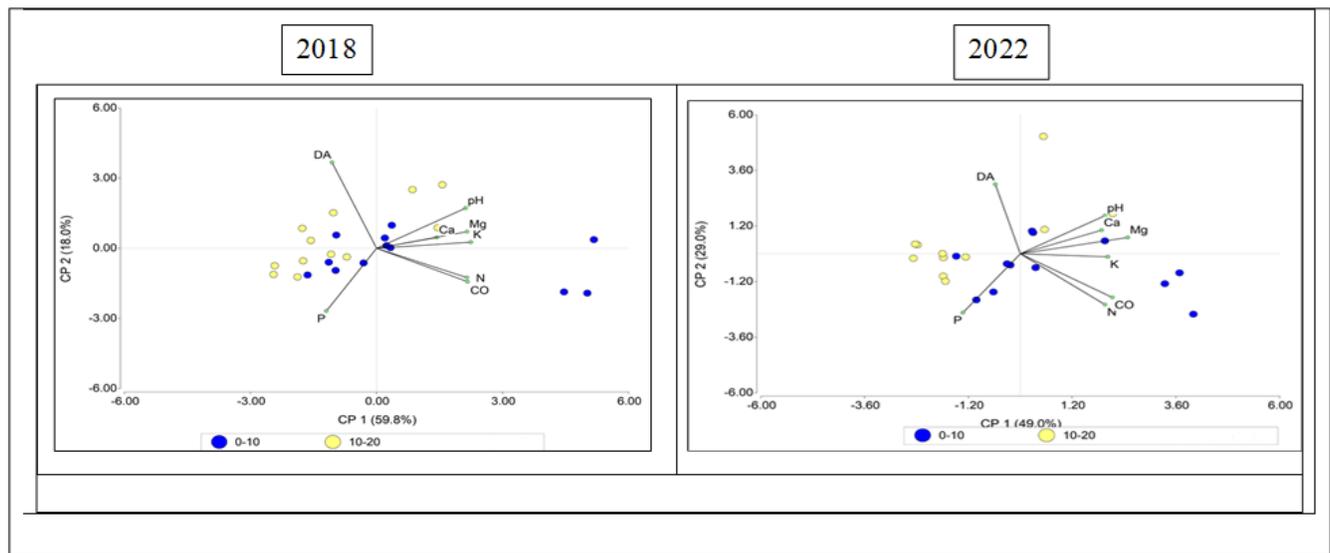


Figura 3. Exploración de las relaciones entre parámetros físicos y químicos del suelo en los años 2018 y 2022 del ensayo con forrajeras.

3.2. Parámetros biológicos (macrofauna)

Los tratamientos no mostraron diferencia significativa ($p > 0.05$) para la macrofauna del suelo (riqueza y densidad). Pero hubo efecto significativo para año y para la interacción Año: Tratamiento con respecto a la densidad total de la macrofauna ($p \leq 0.05$; Tabla 12). La mayor actividad de lombrices en el suelo fue muy reflejada en los primeros 10 cm del suelo con el 90.47%.

Tabla 12. Macrofauna (riqueza y densidad) del suelo en los distintos sistemas forrajeros.

ID	Riqueza de macrofauna	Densidad total de macrofauna
		p-value
Año	0.8124	0.0053
Tratamiento	0.988	0.9219
Año: Tratamiento	0.8296	0.0104

En los tratamientos de pasto con leñosas forrajeras hubo un incremento en el tiempo, siendo mayor para el tratamiento PC+Ld, mientras con el tratamiento de PCM la población de lombrices decayó en el tiempo (Figura 4).

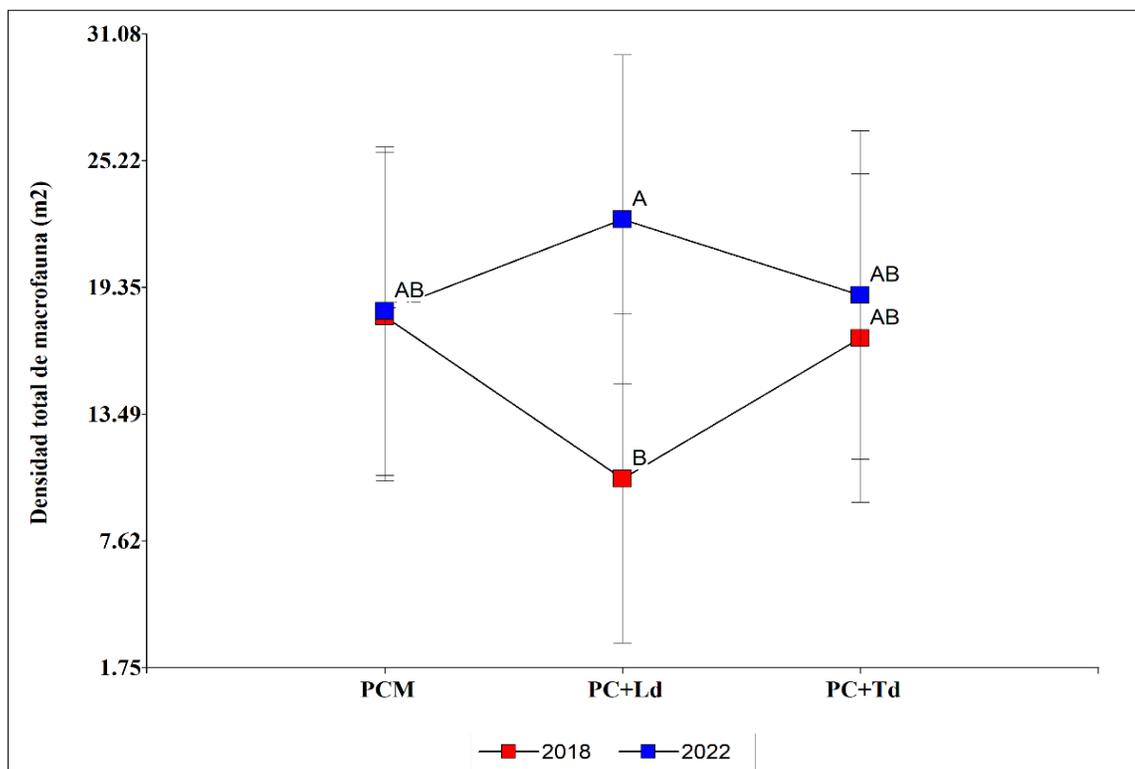


Figura 4. Relación Año: Tratamiento de la macrofauna. Medias de tratamientos con letras diferentes difieren significativamente ($p < 0.05$) según la prueba de medias LSD Fisher.

Al comparar la cantidad de lombrices al inicio (2018) y 4 años después se nota un incremento en la población en los sistemas evaluados, siendo superior el silvopastoril de PC+Ld en comparación a los otros tratamientos (Figura 4) con valores promedio de densidad de lombrices de 10.50 ± 7.61 a $22.50 \pm 5.61 / m^2$ en los primeros 20 cm de profundidad entre el año 2018 y 2022 respectivamente (Anexo 3). La diferencia puede estar relacionada a la existencia de más sombra en el tratamiento PC+Ld, esta ayuda a aumentar la humedad y tiende a disminuir la temperatura del suelo, lo que puede estar generando un ecosistema más favorable para la reproducción y desarrollo de lombrices (Camero-Rey y Rodríguez-

Díaz 2014). Rodríguez *et al.* (2002a) confirman que la influencia de la hojarasca de *Leucaena leucocephala*) ayuda con un ambiente más idóneo para la actividad de la macrofauna en el suelo.

Estos resultados encontrados en el presente estudio son superiores a los hallados por Camero-Rey *et al.* (2015) y Cabrera-Dávila *et al.* (2017), quienes, en Alajuela, Costa Rica evaluaron la densidad de las lombrices, la producción y el valor nutricional del forraje producido en dos sistemas silvopastoriles de *Erythrina berteroana* asociada con *Urochloa brizantha* CV. Toledo CIAT 26110 y *Urochloa brizantha* CV. Toledo CIAT 26110 como monocultivo, todos con dos años de establecidos. La densidad de lombrices/m² varió de 5.94 a 19.68, en donde el menor valor fue para el sistema en monocultivo. En el año 2022 existe una mayor densidad de macrofauna total (principalmente lombrices) dejando claro que la presencia y abundancia de lombrices permiten la modificación de la estructura del suelo y además ayudan a la descomposición de la materia orgánica del suelo. Es por eso que las lombrices tienen efectos importantes en todo el ecosistema que vive sobre el suelo (Domínguez *et al.* 2009). La presencia de las lombrices en el suelo es importante, ya que de ellas depende la fertilidad y estabilidad del suelo, tienen la capacidad de degradar los componentes orgánicos, actúan sobre la porosidad del suelo, además, influyen en los procesos de aireación y remoción del suelo, por otro lado, facilita la agregación de partículas del suelo a través de las excreciones e interviene en la humificación de la materia orgánica (Adi-Saab Arrieche 2012).

Las lombrices juegan un papel importante en los servicios ecosistémicos en el suelo, son considerados como ingenieros físicos y bioquímicos, debido a que construyen canales y airean el medio edáfico; y promueven la descomposición de la materia orgánica y causan interacciones entre bacterias y hongos (Lavelle *et al.* 2016). Las lombrices pueden ser suministros de nutrientes naturales y podrían compensar el uso y el costo de fertilizantes sintéticos, ello influye en la integridad y en la productividad del sistema (Sánchez *et al.* 2011). El conocimiento de la macrofauna del suelo en ecosistemas ganaderos es de interés debido a las funciones que desempeña para en mayor cantidad y calidad de los pastos, convirtiéndose en un indicador biológico importante para valorar la calidad del suelo (Ramírez-Suárez *et al.* 2018).

3.3. Secuestro de carbono en los sistemas de pasto en asocio con leñosas forrajeras

3.3.1. Carbono en suelo

El carbono en suelo no presentó efectos significativos ($p > 0.05$) entre los tratamientos. Se observó que el PCM y PC+Ld presentaron una reducción de carbono entre años en el perfil de 10-20 cm de profundidad, el tratamiento PC+Td presentó un cambio positivo. También, se encontró que la mayor acumulación de carbono está en los primeros 10 cm del suelo en los tres tratamientos. El stock de carbono acumulado (ambas profundidades) varió entre 53.7 ± 6.37 y 56.37 ± 8.87 tC/ha para el año 2018 y entre 53.31 ± 5.56 y 59.33 ± 8.42 tC/ha para el 2022, en ambos casos, el mayor valor correspondió para el tratamiento PC+Td (Tabla 13).

Tabla 13. Dinámica del secuestro de carbono (tC/ha) en el suelo en los distintos sistemas forrajeros.

Profundidad (cm)	PCM			PC+Ld			PC+Td		
	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)	Año 2018	Año 2022	Dif (%)
0-10	29.06±5.61	34.09±4.58	17.3	29.26±3.5	30.87±3.23	5.5	31.21±4.12	32.13±3.58	2.9
10-20	26.06±6.59	19.61±0.81	-24.8	24.44±2.8	22.44±2.03	-8.2	25.16±4.76	27.2±4.84	8.1
Total	55.12±11.02	53.7±5.39	-2.6	53.7±6.37	53.31±5.56	-0.7	56.37±8.87	59.33±8.42	5.3

*Medias ± Error estándar

Es importante mencionar que en la presente investigación, el contenido de carbono en suelo a los cuatro años de establecimiento del sistema es superior a lo encontrado en otros trabajos en sistemas de pastos en monocultivo y sistemas silvopastoriles como los de Gamarra *et al.* (2017); Lol *et al.* (2013); Miranda *et al.* (2007); Arias *et al.* (2001) y Giraldo *et al.* (2006) en los cuales varió entre 8 y 42 tC/ha. El estudio de Miranda *et al.* (2007), en un sistema silvopastoril de *L. leucocephala*, *Andropogon gayanus* y pasturas naturales sin árboles de 11 años de edad, encontró valores de carbono almacenado en 15 cm de profundidad similares a los del presente estudio (profundidad 10-20 cm) y variaron entre 19.5 y 24 tC/ha respectivamente.

Esta situación podría estar asociada a ventajas que ofrecen las condiciones edáficas, climáticas y las edades de los sistemas. Feliciano *et al.* (2018) y López-Santiago *et al.* (2019), señalan que conforme se aumenta la edad de los sistemas, mayor será la acumulación de carbono. El segundo estudio realizado en Michoacán, México encontraron que el silvopastoril de *Leucaena leucocephala* con más de 20 años de establecimiento acumuló 91.6 tC/ha en 30 cm del suelo. Dichos valores son superiores a los del presente estudio. Ibrahim *et al.* (2007), Arias-Giraldo *et al.* (2009) y Aryal (2019) también encontraron resultados superiores a los de esta investigación en sistemas silvopastoriles, pasturas degradadas y pasturas mejoradas sin árboles con edades de 1 hasta 50 años, encontraron un mayor secuestro de carbono en el perfil de 0 a 30 cm, el cual varió entre 53 y 559.27 tC/ha.

Feliciano *et al.* (2018) destacan el potencial de secuestro de carbono abajo y arriba del suelo de los sistemas silvopastoriles, incluso señalan que los sistemas silvopastoriles en climas tropicales presentaron una mayor tasa de fijación de carbono que otros sistemas agroforestales (transición de pastizales a sistemas silvopastoriles o barbechos mejorados), los valores reportados fueron entre 1.9 a 4.4 tC/ha/año. Por lo tanto, los sistemas silvopastoriles tienen potencial para compensar las emisiones de la actividad ganadera. MLA (2020) indica que Australia está promoviendo en su estrategia país la ganadería con árboles para la meta de una ganadería carbono neutro en el 2030.

3.3.2. Carbono en pasto

El carbono almacenado por el pasto presentó diferencia significativa entre tratamientos ($p \leq 0.05$); el PCM fue mayor que PC+Td, pero similar con PC+Ld (Tabla 14).

Tabla 14. Carbono almacenado en el pasto (tC/ha) en los sistemas de pastura de Cayman en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras.

Sumidero de carbono	PCM	PC+Ld	PC+Td
Pasto	16.13±2.64 a	10.71±1.80 ab	9.73±1.75 b

*Medias ± Error estándar. Letras diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) según la prueba de comparación de medias de LSD Fisher.

Los resultados del presente estudio fueron superiores a los encontrados por Ibrahim *et al.* (2007), en un estudio de sistemas silvopastoriles en asocio con pasturas mejoradas y pasturas degradadas en Matiguás, Nicaragua, donde evaluaron carbono y encontraron valores entre 9 y 9.44 tC/ha. Por otro lado, Rojas *et al.* (2009) encontró valores entre 2.3 y 5.8 tC/ha inferiores a los del presente estudio en un sistema silvopastoril de pasturas de *Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) con especies maderables nativas de cocobolo (*Dalbergia retusa* Hemsl.), guachipelín (*Diphysa robinoides* Benth.) y cenízaro (*Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth). Las pasturas tienen un gran potencial para atenuar los efectos del cambio climático mediante el secuestro de carbono, si estas son bien manejadas pueden ser más importante que los bosques en la generación de créditos de carbono (Albrecht y Kandji 2003; Petteri 2002).

3.3.3. Carbono en las leñosas forrajeras

3.3.3.1. Generación de ecuaciones alométricas

Para la estimación de biomasa se generaron dos modelos alométricos para las leñosas *Leucaena diversifolia* y *Tithonia diversifolia* (Tablas 10 y 11). Se corrieron varios modelos, para *Tithonia diversifolia* el mejor modelo fue AIC (351.68), BIC (355.09) y un R² ajustado de (0.23). El D₃₀ de los 24 árboles muestreados varió de 1.21 a 3.98 cm, la altura total varió de 0.44 a 1.51 m, y su altura de estaca de 0.29 a 0.48 m. La biomasa seca total varió de 0.15 a 3.11 kg por árbol (Anexo 1). Para *Leucaena diversifolia* el mejor modelo fue AIC (406.95), BIC (412.17) y un R² ajustado de (0.90). En los árboles con un año sin poda, el D₃₀ de los 24 árboles muestreados varió de 3.1 a 10 cm, la altura total de 3.5 a 8.1 m, y su altura de poda de 1.26 a 1.67 m. La biomasa seca total varió de 2.52 a 26.80 kg por árbol (Anexo 2).

3.3.3.2. Modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de la biomasa las leñosas forrajeras

En el caso de la *Tithonia diversifolia*, la biomasa total fue explicada solamente por la altura total (H) de la planta, esto podría estar relacionado a que es una leñosas con muchos tallos y con diámetros muy pequeños. La altura de estaca y D₃₀ no fue significativa (p>0.05; Tabla 15). El coeficiente de determinación es bajo (0.23), pero aun así se decidió utilizar este modelo para la estimación del carbono, porque en la literatura no existe ecuación específica para esta especie. En el sistema se mantiene estable el tallo, por lo tanto, se podría proponer como buena práctica el manejo de mayores alturas de podas para favorecer el secuestro de carbono, esto en caso de que no se afecte el rendimiento de biomasa (Pasquier-Flores *et al.* 2006 y Noda *et al.* 2007).

Para la *Leucaena diversifolia*, el modelo para la predicción de la biomasa de materia seca fue explicada por la altura total (H) de la planta y el diámetro del tallo a la altura de 30 cm y presentó un coeficiente de determinación (R²) de 0.90 (Tabla 15).

Tabla 15. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en las leñosas forrajeras.

Leñosa forrajera	Modelo	AIC	BIC	R ²	R ² ajustado
<i>Tithonia diversifolia</i>	Biomasa_total= -9.30+863.21+ H	351.68	355.09	0.26	0.23
<i>Leucaena diversifolia</i>	Biomasa_total= -8561.60-1388.50(H)+ 333.34(D ₃₀)	406.95	412.17	0.90	0.90a

3.3.3.3. Aporte de carbono de las fracciones de las leñosas forrajeras

La fracción del tallo registró el mayor aporte del carbono total de las fracciones de *Leucaena diversifolia* con el (44%), seguido por las ramas, raíces y hojas, la contribución de las semillas fue muy baja (0.5 %). Por otro lado, para el caso *Tithonia diversifolia* ocurrió lo mismo, siendo el tallo la fracción que más carbono aportó (51%; Tabla 16).

Tabla 16. Aporte de carbono por las fracciones de las leñosas forrajeras.

Tratamiento	%					Carbono Total (tC/ha)
	Tallo	Ramas	Raíces	Hojas	Semilla	
PCM						
PC+Ld	44	28	18	9.5	0.5	13
PC+Td	51	24	17	8		1.44

Los resultados de la presente investigación son similares a los encontrados por Sreejesh *et al.* (2013), en un estudio sobre la predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis L.f.* con 10 años de edad en la zona Norte de Costa Rica, donde encontraron un aporte de carbono en tallo del (46%), por otro lado, reportan un (40%) de carbono en la fracción de las raíces; superior al presente estudio, lo que podría estar relacionado a que conforme el árbol crece el aporte relativo a la biomasa aérea del fuste y las ramas aumenta.

3.3.3.4. Carbono total del sistema

El carbono total del sistema varió entre 53.7 ± 6.37 a 74.9 ± 13.15 tC/ha entre el año 2018 y 2022 respectivamente. Para el año 2022 el tratamiento con mayor valor fue PC+Ld con 74.9 ± 13.15 tC/ha, luego el PC+Td con 70.32 ± 11.08 tC/ha y después el PCM con $69.83.2 \pm 8.03$ tC/ha. Los tres tratamientos presentaron tasas de cambio positiva en el carbono total del sistema, siendo el tratamiento de PC+Ld el que presentó la mayor tasa de cambio positiva (39.5%), el PCM y la PC+Td presentaron tasas cambio muy similares 26.68% y 25% respectivamente (Tabla 17).

El carbono total en suelo varió entre 53.7 ± 6.37 y 59.33 ± 8.42 tC/ha, siendo mayor el tratamiento de PC+Td con 59.33 ± 8.42 tC/ha. También, se encontró que todos los tratamientos almacenan el mayor porcentaje de carbono en el suelo y el tratamiento de PC+Td presentó el mayor valor con el 84% (Figura 5).

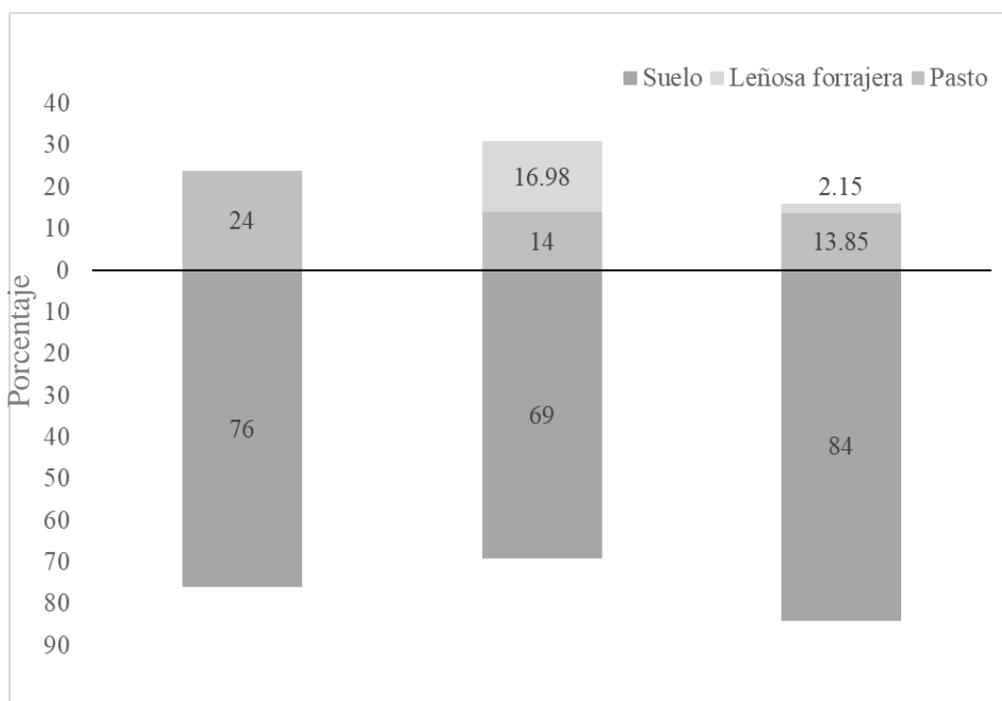


Figura 5. Aporte de los componentes en el carbono total de los sistemas de pasto Cayman en monocultivo y en asocio con leñosas forrajeras.

El carbono arriba del suelo varió entre 10.99 ± 2.65 y 21.59 ± 7.80 tC/ha, en donde el mayor valor fue para el tratamiento PC+Ld. El mayor aporte fue del componente pasto en todos los sistemas con un valor que varió entre 9.73 ± 1.75 y 16.13 ± 2.64 tC/ha (Tabla 17).

Tabla 17. Secuestro de carbono (tC/ha) en el suelo y arriba del suelo en los sistemas de pasto Cayman en monocultivo y asocio con leñosas forrajeras.

Sumideros de carbono	PCM 2018	PCM 2022	Dif (%)	PC+Ld 2018	PC+Ld 2022	Dif (%)	PC+Td 2018	PC+Td 2022	Dif (%)
Pasto		16.13 ± 2.64			10.71 ± 1.80			9.73 ± 1.75	
Leñosa					10.88 ± 6.08			1.26 ± 0.90	
Suelo 0-20 cm	55.12 ± 12.2	53.7 ± 5.39	-2.57	53.7 ± 6.37	53.31 ± 5.26	-0.72	56.37 ± 8.88	59.33 ± 8.42	5.25
Total	55.12 ± 12.2	69.83 ± 8.03	26.68	53.7 ± 6.37	74.9 ± 13.15	39.5	56.37 ± 8.88	70.32 ± 11.08	25

Existen trabajos con SSP pasto + *Leucaena leucocephala*, como los de López – Santiago *et al.* (2019) y Aryal *et al.* (2018), que encontraron valores de secuestro de carbono abajo del suelo superiores y que variaron entre 73.4 y 98.3 tC/ha. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la edad de los sistemas. Feliciano *et al.* (2018) y López-Santiago *et al.* (2019), señalan que conforme aumenta la edad o maduración del SSP la acumulación de carbono en el sistema tiende a incrementarse. Esta tendencia es posible que logre su estabilización, es una pregunta que aún falta por responder con mejor precisión. Además, es necesario identificar opciones de manejo para que los sistemas continúen secuestrando carbono, especialmente sobre el suelo, por medio del manejo estratégico de podas de las leñosas forrajeras.

El carbono secuestrado sobre el suelo, que presentaron los tres tratamientos, fue superior al encontrado por Elizeche *et al.* (2016) y Jiménez Ruiz *et al.* (2019) para el Chaco seco en un sistema silvopastoril constituido por pastos de las especies *Megathyrsus maximus* cv Gaton (*Gaton panic*) y árboles (*Prosopis alba*). Ellos reportaron valores de 8.23 a 9.8 tC/ha en el componente leñoso sobre el suelo. Cabe mencionar que en este estudio no se tomó en cuenta la hojarasca de las leñosas forrajeras, que podría constituir un sumidero adicional de carbono, pues la hojarasca constituye la ruta de entrada principal de materia orgánica y nutrientes al suelo (Sánchez *et al.* 2008; Petit *et al.* 2009).

Según Aryal *et al.* (2014) y Mattsson *et al.* (2015), la acumulación de carbono es fuertemente controlada por la composición y estructura de la vegetación dentro del ecosistema. La mayor acumulación de carbono, específicamente en *Leucaena diversifolia* puede atribuirse a mayores cantidades de material leñoso (Montagnini y Nair 2004; Amézquita *et al.* 2010; Nair 2012).

En esta investigación, en términos generales, el tratamiento PC+Ld tuvo el mejor desempeño. Dicha tendencia es similar a lo reportado por David (2021), quien en su estudio encontró que este mismo tratamiento mostró una mayor oferta y calidad de forraje (pasto + follaje de leñosa), lo cual se tradujo en una mayor producción de leche en comparación a los otros tratamientos evaluados. Los resultados logrados a la fecha en términos de producción animal y ambiente (secuestro de carbono) indican que el asocio de PC+Ld constituye una opción promisoría para los sistemas de producción con ganadería bovina en condiciones de trópico húmedo y con suelos ácidos. De igual manera, es prioritario continuar con otras investigaciones para evaluar este SSP en condiciones de trópico seco y subhúmedo en asocio con otras especies de gramíneas e incluso con mayor densidad de individuos de *Leucaena diversifolia*. En los escenarios anteriores, es pertinente la evaluación financiera ex ante o ex post para conocer su factibilidad en comparación a los escenarios de costo ascendente de los insumos alimenticios externos y fertilizantes.

4. Conclusiones

La densidad aparente del suelo no presentó diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, se observó un aumento de la densidad aparente en relación con el año en todos los tratamientos, siendo el tratamiento de PCM quien tuvo el mayor aumento en comparación con los tratamientos de las leñosas forrajeras entre el año 2028 y 2022.

Por otro lado, en los parámetros químicos no hubo diferencia significativa entre los tratamientos, pero a mayor profundidad hubo disminución para los parámetros, el mayor para Fósforo (- 29.9). El parámetro que tuvo la mayor tasa de cambio positiva fue el Mg (56.7%). Ambos casos relacionados con el tratamiento de PC+Ld.

Se identificó que existe una alta correlación entre COS y el N, lo cual contribuye con mayor materia orgánica y secuestro de carbono en el suelo.

Los parámetros biológicos del suelo no presentaron diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, en el tiempo hubo un aumento de macrofauna (principalmente lombrices) y más acentuado en el tratamiento de PC+Ld.

El tratamiento que mayor stock de carbono total presentó fue PC+Ld con 75 ± 13.15 tC/ha respecto al resto de los tratamientos. La tasa de cambio mayor en el tiempo fue para el tratamiento de PC+Ld con valor de (40%).

La mayor cantidad de carbono de los sistemas se encuentra abajo del suelo con valores arriba del 70%, el tratamiento PC+Td presenta la mayor acumulación con el 84%.

5. Recomendaciones

El ensayo debería de tener un plan a largo plazo para entender el efecto y tendencias de los tratamientos sobre los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, así como el potencial de secuestro de carbono. Además, de manera paralela, conocer la sinergia de la parte productiva-económica con la parte ambiental de los sistemas forrajeros.

Los resultados de esta investigación aportan información técnica para desarrollar herramientas de adopción de estos sistemas forrajeros bajo el enfoque de la intensificación sostenible de la ganadería. Sería importante conocer la contribución del aporte económico del carbono fijado en los costos anuales de mantenimiento de los sistemas.

Generar nuevos diseños de PC + Ld con mayor densidad de la especie leñosa como estrategia para aumentar el secuestro de carbono del sistema.

Se recomienda realizar un balance de nutrientes para corregir las necesidades existentes en el suelo e identificar el sistema con el mejor balance.

Estudiar el balance de carbono de los sistemas forrajeros, esto se podría hacer con modelos de simulación ya que se tiene información de la parte de producción animal (leche), calidad de forrajes, secuestro y fijación de carbono de los componentes.

6. Bibliografía

- Acosta, A; Díaz, T. 2014. Lineamientos de política para el desarrollo sostenible del sector ganadero (en línea). Organización para las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Ciudad de Panamá, Oficina Subregional de la FAO para Mesoamérica. Ciudad de Panamá, junio del 2014. Las. 1-94 p. Disponible en <https://www.fao.org/publications/card/es/c/84c0a556-26d2-480a-8313-30d2c6878c4f/>.
- Adi-Saab Arrieche, R. 2012. Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico la Estancia, Madrid, Cundinamarca, 2012. Utilizando indicadores de calidad de suelos. Tesis MSc. Pontificia Universidad Javeriana. [en línea] disponible en: <https://goo.gl/3rX653>.
- Albrecht, A; Kandji, S. 2003. Carbon sequestration in tropical agro-forestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3): 15-27.
- Alonso, J. 2011. Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45(2).
- Álvarez, JE. 2002. Pastos y forrajes para el trópico colombiano. Universidad de Caldas.
- Alvim, MJ.; Paciullo, SC.; Carvalho, MM. & Xavier, DF. 2004. Influence of different percentages of trees cover on the characteristics of a *Brachiaria decumbens* pasture. International Symposium on Silvopastoral Systems. Mérida, Universidad Autónoma de Yucatán, p.179.
- Amézquita, MC; Amézquita, E; Casasola, F; Ramírez, GL; Giraldo, H; Gómez, ME; Llanderal, T; Velásquez, J; Ibrahim, MA. 2008. C stocks and sequestration. In Mannedje, L; Amézquita, MC; Buurman, P; Ibrahim, M (eds.). *Carbon Sequestration in Tropical Grassland Ecosystems*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Academic Publishers. p. 49-68.
- Amézquita, MC; Murgueitio, E; Ibrahim, M; Ramírez, B. 2010. Secuestro de carbono en pastizales y sistemas silvopastoriles comparado con bosques nativos en ecosistemas de América tropical. Secuestro de carbono en pastizales: gestión, políticas y economía. En: Abberton M, Conant R, Batello C (eds) *Actas del taller sobre el papel del secuestro de carbono de los pastizales en la mitigación del cambio climático*, Roma, págs. 153–155. <http://www.fao.org/docrep/013/i1880e/i1880e06.pdf>.
- Andrade, HJ; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10(39-40):109-116.
- Arcos Dorado, JC. 2016. «BALANCE DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES INTENSIVOS CON LEUCAENA (*Leucaena leucocephala*) EN LA HACIENDA “EL CHACO”, TOLIMA, COLOMBIA». Tesis MSc Ibagué-Tolima. Colombia. Universidad del Tolima. 1-69 p.
- Arias, K; Ruiz, C; Milla, M; Fabio, H & Escobar, A. 2001. Almacenamiento de Carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales en Yaracuy, Venezuela. *Livest. Res. Rural Develop.* 13:5
- Arias-Giraldo, LM; Camargo, JC; Dossman, MA; Echeverry, MA; Rodríguez, JA; Molina, CH; Molina, EJ; Melo, ID. 2009. Estimación de biomasa aérea y desarrollo de modelos alométricos para

Leucaena leucocephala en sistemas silvopastoriles de alta densidad en el valle del Cauca, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente* (58):32-39.

- Arteaga, JC; Navia, JF; Castillo, JA. 2016. Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia (en línea). *Revista de Ciencias Agrícolas* 33(2):62. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>.
- Aryal, DR; De Jong, BH; Ochoa-Gaona, S. 2014. Carbón existencias y cambios en los bosques secundarios tropicales del sur de México. *Agric Ecosyst Environ* 195: 220–230.
- Aryal, DR; Gómez-González, RR; Hernández-Nuriasmú, R; Morales-Ruiz, DE. 2018. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 93(1):213-227. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0310-y>
- Aryal, DR; Rodrigo, RRG. 2018. Reservas de carbono y diversidad de árboles en sistemas silvopastoriles arbóreos dispersos en Chiapas, México. :213-227.
- Barzeueta-Unda, S; Velepucha-Cuenca, K; Solano, M; Hurtado-Flores, L. 2020. Secuestro de carbono orgánico del suelo en pastizales de la provincia El Oro, Ecuador. *Ciencia Unemi* 13(32):14-26. DOI: <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss32.2020pp14-26p>.
- Betancourt, H; Pezo, D a; Cruz, J; Beer, J. 2007. Impacto bioeconómico de la degradación de pasturas en fincas de doble propósito en El Chal, Petén, Guatemala Bioeconomic impact of pasture degradation in double purpose farms in El Chal, Petén, Guatemala. *Pastos y Forrajes* 30(1):1-8.
- Botero, J. 2003. Agroforestería para la producción animal en América Latina, Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. Extraído el 5 de noviembre de 2011, de: <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y4435S/y4435s07.htm>
- Bugarín, J; JI, B; Lemus, C; Murray, R; Hernández, A; H, O; Aguirre, J. 2010. Comportamiento De Algunas Propiedades Físicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la llanura Norte de Nayarit (en línea). 31(2):48-55. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362010000200007.
- Cabrera-Dávila, GDC; Socarrás-Rivero, AA; Hernández-Vigoa, G; De León-Lima, D; Menéndez-Rivero, YI; Sánchez-Rondón, J. 2017. Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra, en Cuba. *Pastos y Forrajes* 40(2):118-126.
- Calle, Z; Murgueitio, E. 2008. El botón de oro: arbusto de gran utilidad para sistemas ganaderos de tierra caliente y de montaña. *Carta Fedegán*, 108, 54 -63.
- Camero-Rey, A; Rodríguez-Díaz, H. 2014. Características químicas del suelo, producción forrajera y densidad poblacional de lombrices en un sistema silvopastoril en la zona Huetar Norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 28(1):91-104.
- Cárdenas, A; Moliner, A; Chiquinquirá, H; Ibrahim, M. 2018. Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforestry systems*.
- Carvalho, MM; Xavier, DF; Alvim, MJ. 2003. Arborização melhora a fertilidade do solo em pastagens cultivadas. Comunicado técnico. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 4 p.

- CATIE. 2006. Datos meteorológicos (en línea). Consultado 7 marzo 2006. Disponible en <http://www.catie.ac.cr>.
- Chacón Navarro, M; Reyes Rivero, C; Segura Guzmán J. 2015. Estrategia para la ganadería baja en carbono en Costa Rica. Informe final. Estrategia y Plan de Acción (en línea). Costa Rica, s.e. 110 p. Disponible en <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-11006.pdf>.
- Contreras Santos, JL; Martínez Atencia, J; Cadena Torres, J; Fallas Guzmán, CK. 2019. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense* 44(1):29-41. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>.
- Contreras-Santos, JL; Martínez-Atencia, J; Falla-, CK. 2021. Carbono acumulado en raíces de especies vegetales en sistemas silvopastoriles en el Norte de Colombia (en línea). 55 (1):1-17. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15359/rca.55-1.3>.
- Crespo G, Ruiz TE; Álvarez, J. 2011. Efecto del abono verde de *Tithonia* (*T. diversifolia*) en el establecimiento y producción de forraje *P. purpureum* cv. Cuba CT-169 y en algunas propiedades del suelo. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45(1),79-82.
- David Lagos, KL. 2021. Evaluación productiva del pasto Cayman (*Urochloa* híbrido cv. CIAT BRO2/1752) en sistemas silvopastoriles en el trópico húmedo de Costa Rica (en línea). Tesis MSc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE). 41 p. DOI: <https://doi.org/https://hdl.handle.net/10568/111497>.
- De Oliveira, PS. 2007. Produção e qualidade de *Tithonia diversifolia* (hemsl.) gray, em função de espaçamentos e estádios de desenvolvimento da planta, para uso potencial como adubo verde. *Unimar Ciencia* 16:67
- Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; González, L; Tablada, M; Robledo, C. InfoStat versión 2019 (en línea). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultado 6 nov. 2021. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Ríos, M de J; Vázquez-Alarcón, A; Uribe-Gómez, M; Sánchez Vélez, A; Lara Bueno, A; Cruz León, A. 2017. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (16):3235-3249. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.393>.
- Domínguez, AM. 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas* 18(2):20-31.
- Elizeche, K; Mandelburguer, D; Fariña, D; Estigarribia, E; Monges, C; González, D; De Lemos, D; De Lemos R; Bocado, K. 2016. Desarrollo de capacidades para mejorar la toma de decisiones relacionadas con el medio ambiente. SEAM (Secretaría del Ambiente. Paraguay). SEAM. 122 p.
- Enríquez, ML; Sáenz, JC; Ibrahim, M. 2007. Riqueza, abundancia y diversidad de aves y su relación con la cobertura arbórea en un agropaisaje dominado por la ganadería en el trópico subhúmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 45:49-57.

- FAO. 2010. Agricultura “climáticamente inteligente”: políticas, prácticas y financiación para la seguridad alimentaria, adaptación y mitigación. Roma. 54 p.
- Fassbender, H.W; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos. IICA. San José, Costa Rica. 420 p.
- Fassbender, HW. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Dpto. de Recursos Renovables. Serie materiales de enseñanza No. 29. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 475 p.
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Segunda edición. Serie de materiales de enseñanza No. 29. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 491 p
- Feliciano, D; Ledo, A; Hillier, J; Nayak, DR. 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254(December 2017):117-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.032>.
- Fonseca González, W; Ávila Arias, C; Murillo Cruz, R; Rojas Vargas, M. 2021. Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia forestal* 24(1):31-44. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201x.15961>.
- Gálvez Cerón, AL; Edmundo, AGJ; Julian, AMJ; Rodolfo, REF. 2019. Implementación y evaluación de un sistema silvopastoril en el Chocó biogeográfico colombiano (en línea). 11, núm. 2:1-21. Disponible en <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/513/5132514008/html/>.
- Gamarra, C; Lezcano, MI; Ortíz, M; Galeano, M y Cardús, A. 2017. Relación carbono nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9 (46): 5-26.
- Giraldo, A; Zapata, M; Montoya, E. 2007. Carbon capture and flow in a silvopastoral system of the Colombian Andean zone (en línea). *Asociación Latinoamericana de Producción Animal* 7:241-245. Consultado 13 ago. 2021. Disponible en www.alpa.org.ve/ojs/index/php.
- Giraldo, L.A; Zapata, M & Montoya, E. 2006. Estimación de la captura de carbono en silvopastoreo de *Acacia mangium* asociada con *Brachiaria dictioneura* en Colombia. *Pastos y Forrajes* 29:421
- Gudynas, E. 2015. Situación actual de los recursos naturales. *Leisa revista de agroecología* 31(3): 36-38.
- Hairiah, K; Agus, F; Velarde, S; Norrdwijk, M van; 2011. Medición de carbono de los usos de la tierra. *In Peter, WDM (ed.)*. Washington, DC, Banco Mundial. p. 28.
- Hernández, M. & Sánchez, S. 2006. Evolución de la composición química y la macrofauna edáfica en sistemas silvopastoriles. IV Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. Centro de Convenciones de Plaza América, Varadero, Cuba.
- Herrera, RS. 2003. Principios básicos de fisiología, métodos de muestreo y la calidad de los pastos. En: *Fisiología, establecimiento y producción de biomasa de pasto, forrajes y otras especies para la ganadería tropical*. Ed. Instituto de Ciencia Animal- La Noria, México. p. 26
- Herrero, M; Gerber, P; Vellinga, T; Garnett, T; Leip, A; Opio, C; Westhoek, HJ; Thornton, PK; Olesen, J; Hutchings, N; Montgomery, H; Soussana, JF; Steinfeld, H; McAllister, TA. 2011. Livestock

and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:779-782.

- Holmann, F; Argel, P; Rivas, L; White, D; Estrada, RD; Burgos, C; Pérez, E; Ramírez, G; Medina, A. 2004. ¿Vale la pena recuperar pasturas degradadas? Una evaluación desde la perspectiva de productores y extensionistas en Honduras (en línea). CIAT, DICTA, I (ed.). Honduras, s.e. 24 p. Disponible en file:///D:/Descargas/2022/Vale_Pena_Recuperar_Pasturas_degradadas.pdf%3Bjsessionid=9B2D34BB0252DD09D7B15F2AD80DF0D0.pdf.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería de las Américas* (45):27-36.
- Ibrahim, M; Guerra, L; Casasola, F; Neely, C. 2010. Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits (en línea). *Integrated Crop Management* v. 11 :189-196. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/013/i1880e/i1880e09.pdf>.
- Iglesias, MR; Barchuk, AH. 2010. Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). *Ecología Austral* 20(1):71-79.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change). 2003. Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4 (Agriculture, Forestry and Other Land Uses). Eds S Eggleston; L Buen día; K Miwa; T Ngara; K Tanabe. IGES, Hayama, JP. 679p.
- Jiménez, JA. 2007. Diseño de sistemas de producción ganaderos sostenibles con base a los sistemas silvopastoriles para mejorar la producción animal y lograr la sostenibilidad ambiental. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 103 p.
- Lavelle, P; Spain, AV; Blouin, M; Brown, G; Decaëns, T; Grimaldi, M. 2016. Ecosystem Engineers in a self-organized soil: a review of concepts and future research questions. *Soil Sci.* 181 (3/4):91-109. doi:<http://10.1097/SS.0000000000000155>.
- Libreros, H; Benavides, J; Kass, D; Pezo, D. 1994. Productividad de una plantación asociada de poró (*Erythrina poeppigiana*) y king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*). II. Movilización de minerales. En: Árboles y arbustos forrajeros en América Central. (Ed. J.E. Benavides). Serie Técnica. Informe Técnico No. 236. CATIE. Turrialba, Costa Rica. Vol. 2, p. 475.
- Lin, K; Lyu, M.; Jiang, M; Chen, Y; Li1, Y; Chen, G; Xie, J; Yang, Y. 2017. Improved allometric equations for estimating biomass of the three *Castanopsis carlesii* H. forest types in subtropical China. *New Forests*, 48,115-135. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9559-z>
- Lok, S; Fraga, S; Noda, A; García, M. 2013. Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 47(1):75-82.
- López-Santiago, JG; Casanova-Lugo, F; Villanueva-López, G; Díaz-Echeverría, VF; Solorio-Sánchez, FJ; Martínez-Zurimendi, P; Aryal, DR; Chay-Canul, AJ. 2019. Carbon storage in a silvopastoral

system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems* 93(1):199-211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>.

- Mattsson, E; Ostwald, M; Nissanka, SP; Pushpakumara, DKN. 2015. Cuantificación de existencias de carbono y diversidad de árboles de huertos familiares en una zona seca del distrito de Moneragala, Sri Lanka. *Agrofor Syst* 3: 435–445. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9780-8>.
- McDaniels, P. 2001. Características de los suelos del ensayo de sistemas con café. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- Miranda, T; Machado, R; Machado, H; Duquesne, P. 2007. Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica. *Estudio de caso. Pastos y Forrajes*, 30 (4): 483-491.
- MLA (Meat & Livestock Australia, AU). 2020. The Australian Red Meat Industry's Carbon Neutral by 2030 Roadmap. 44 p.
- Montagnini, F; Nair, PKR. 2004. Secuestro de carbono: un beneficio ambiental subexplotado de los sistemas agroforestales. *Agrofor Syst* 61–62 (1–3): 281–295. <https://doi.org/10.1023/b:agfo.0000029005.92691.79>
- Nair, P; Kumar, B; Nair, V. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J Plant Nut. Soil Sci.* 172:10
- Nair, PKR. 2012. Estudios de secuestro de carbono en agroforestería sistemas: una verificación de la realidad. *Agrofor Syst* 86: 243-253. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>.
- Navas, A; Aragón, LF; Triana, JF. 2020. Efecto del componente arbóreo sobre la dinámica de crecimiento y calidad nutricional de una pradera mixta en trópico alto. *Rev Med Vet.*;no. 41: 71-82. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss41.7>
- Noda, Y; Martín, G; Machado, R; García, DE; Medina, M. 2007. Efecto de dos frecuencias y alturas de corte en la producción de biomasa de morera (*Morus alba* Linn.). *Zootecnia Trop.* 25(4):261-268.
- Oca-Cano, EM; Salvador-García, Á; Nájera-Luna, JA; Corral-Rivas, S; de Jesús Graciano-Luna, J; Méndez-González, J. 2020. Allometric equations for estimating the above-ground biomass and carbon in *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill. *Colombia Forestal* 23(2):89-98. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.15836>.
- Osorio, NW. 2012. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes (en línea). *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal* 1(4):4-7. Disponible en http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH_del_suelo_y_nutrientes_0.pdf.
- Pasquier Flores, F; Rojas Vallecillo, M. 2006. Efecto de diferentes densidades de siembra y alturas de corte sobre la producción de biomasa y composición química de *Cratylia argentea* (en línea). s.l., Universidad Nacional Agraria de Nicaragua. 38 p. Disponible en <http://repositorio.una.edu.ni/1347/1/tnf01p284.pdf>.
- Petit, AJ; Casanova, F; Solorio, FJ. 2009. Asociación de especies arbóreas forrajeras para mejorar la productividad y el reciclaje de nutrimentos. *Agricultura Técnica en México* 35(11): 107-116.

- Petteri, S. 2002. Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta Veracruzana* 4(2): 51 – 58.
- Pezo, D. 2019. Intensificación sostenible de los sistemas ganaderos frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Estado del arte. DOI: <https://doi.org/10.18235/0001722>.
- PNUMA-ORPALC / FS-UNEP Centre. 2014. La agricultura andina frente al cambio climático. Documento del proyecto Microfinanzas para la adaptación basada en Ecosistemas (MEbA). Panamá.
- Ramírez-Suárez, WM; Hernández-Chávez, MB; Zurita-Rodríguez, AA; Navarro-Boulandier, M. 2018. Performance of the edaphic macrofauna in animal husbandry systems, in a productive entity of the Yaguajay municipality, Cuba. (en línea). *Pastos y Forrajes* 41(4):241-247. Disponible en <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=135550376&lang=es&site=ehost-live>.
- Rincon-Carruyo, X; Clavero, T; Márquez, E; Rincon Urdaneta, E; Quintero, C. 1998. Crecimiento y producción de cultivares de pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris* L) en macetas. I. Fase de establecimiento (en línea). *Facultad de agronomía y ciencias veterinarias* :359-367. Disponible en <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26210/0>.
- Ríos, N; Cárdenas, AY; Andrade, HJ; Ibrahim, M; Jiménez, F; Sancho, F; Ramírez, E; Reyes, B; Woo, A. 2007. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 45:66-71.
- Roa Triana, J. 2018. Análisis del efecto del establecimiento de un sistema silvopastoril de un banco forrajero con *Tithonia diversifolia* sobre las características físicas y químicas del suelo en el pie de monte llanero colombiano (en línea). s.l., Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. 56 p. Disponible en https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/1027/1/TRABAJO_DE_GRADO.pdf.
- Rodríguez Baltodano, FM. 2011. Efecto de los árboles aislados sobre características del suelo en sistemas silvopastoriles en Rivas, Nicaragua (en línea). Tesis MSc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 54 p. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7722>.
- Rodríguez, I; Crespo, G; Rodríguez, C; Castillo, E & Fraga, S. 2002a. Comportamiento de la macrofauna del suelo en pastizales con gramíneas naturales puras o intercaladas con leucaena para la ceba de toros. *Rev. cubana Cienc. agríc.* 36:181.
- Rodríguez, LP; Restrepo Tamayo, JC. 2016. Evaluación de algunas características fisicoquímicas del suelo y microclima de un bosque secundario para su futura adecuación en sistema silvopastoril. Tesis MSc. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 56 p.
- Rojas, J; Ibrahim, M; Andrade, H. 2009. Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria* 10(2):214-223. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol10_num2_art:144.

- Sáenz, J; Villatoro, F; Ibrahim, M; Fajardo, D; Pérez, M. 2007. Relación entre las comunidades de aves y la vegetación en agropaisajes dominados por la ganadería en Costa Rica, Nicaragua y Colombia. *Agroforestería en las Américas* 45:37-48.
- Sánchez Castro, Y. 2021. Propiedades físicas y químicas de los suelos en sistemas silvopastoriles en Amazonas y San Martín (en línea). s.l., Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. 86 p. Disponible en <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4749>.
- Sánchez, CS; Crespo, LG; Hernández, CM; García, OY. 2008. Acumulación y descomposición de la hojarasca en un pastizal de *Panicum maximum* y en un sistema silvopastoril asociado con *Leucaena leucocephala*. *Zootecnia Tropical* 26(3): 269-273.
- Sánchez, S; Hernández, M. 2011. Comportamiento de comunidades de lombrices de tierra en dos sistemas ganaderos Behavior of earthworm communities in two livestock production systems. *Pastos y Forrajes* 34(3):359-366.
- Schroth, G; Sinclair, FL. 2003. *Trees, crops and soil fertility: Concepts and research methods*. CABI. 437 p.
- Saborío-Montero, A; Marín-Taylor, O; Arguedas-Sánchez, R; Ramírez-Fallas, & SM. 2015. Fertilidad química de suelos en fincas de ganado lechero ubicadas en la Cordillera Volcánica de Guanacaste, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED* 7(2):157-163.
- Sotelo, M; Gutiérrez Solís, JF; Peters, M; Hincapie, B; Burkart, S. 2017. Cattle production under grazing with improved forages in the lowland tropics of Colombia. *TROPENTAG 2017*.
- Sreejesh, KK; Thomas, TP; Rugmini, P; Prasanth, KM; Kripa, P K. 2013. Carbon Sequestration Potential of Teak (*Tectona grandis*) Plantations in Kerala. *Research Journal of Recent Sciences*, 2, 167-17
- Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M; de Haan, C. 2009. *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. s.l., s.e.
- Szott, L; Ibrahim, M; Beer, J. 2000. The hamburger connection hangover: cattle pasture land degradation and alternative land use in Central America. *Serie Técnica, Informe técnico no. 313*. Turrialba, CR, CATIE. 71 p.
- Thangata, P; Hildebrand, P. 2012. Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: Mechanisms for 'reducing emissions from deforestation and forest degradation' (REDD+). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158:172-183.
- Vázquez, E; Teutscherová, N; Chagüezá, Y; Botero, C; Benito M; Gutiérrez, JF; Sotelo, M; Arango, J; Pulleman, M. 2017. Soil macrofauna as indicator o soil quality in improved silvopastoral systems in the tropics. *TROPENTAG 2017*.
- VijayaVenkataRaman, S; Iniyan, S; Goic, R. 2012. A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 878- 89.7
- Walkley, A; Black, CA. 1938. An examination of the Degtjareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.

Yepes, AP; Navarrete, D; Duque, AJ; Phillips, JF; Cabrera, K; Álvarez, E; García, MC & Ordoñez, MF. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimación+nacional+y+subnacional_1.pdf.

7. Anexos

Anexo 1. Valores dasométricos para la generación de la ecuación alométrica de la especie de *Tithonia diversifolia*

Clase dasométrica	No. Árbol	Altura total (m)	Altura de estaca (m)	D ₃₀ (cm)	Tallo (g)	Ramas (g)	Hojas (g)	Biomasa total (Kg)
Clase 1: 0.00 - 1.33	6	0.7	0.4	1.21	348.33	24	9	0.38133
	16	0.85	0.31	1.69	104	27	14	0.145
	1	0.44	0.38	2.66	80	52	13	0.145
	4	0.54	0.44	2.29	290	16.13	13.5	0.31963
	23	0.64	0.37	1.77	215.78	118.72	54	0.3885
Clase 2: 1.33 - 2.65	9	0.45	0.4	2.09	503.33	29	20	0.55233
	25	1.26	0.33	2.01	265	250	80.21	0.59521
	27	0.63	0.41	2.54	132.09	475	58	0.66509
	2	0.66	0.48	2.2	609.67	151.67	37	0.79834
	22	1.32	0.4	2.43	498.6	438.1	158.75	1.09545
	8	0.8	0.34	2.62	820	200.67	81.27	1.10194
	24	1.51	0.36	1.96	799.25	948.93	352.37	2.10055
	3	0.44	0.38	2.66	175.45	17	17	0.20945
	13	0.96	0.3	3.26	159.5	48	13	0.2205
	19	1	0.4	3.83	181.25	45	13	0.23925
	28	0.6	0.48	3.98	264.58	38	22	0.32458
Clase 3: 2.65 - 3.98	19	1.25	0.43	2.9	287.7	99.05	17	0.40375
	27	0.5	0.29	3.06	274.4	163.8	17	0.4552
	13	0.67	0.43	3.63	446.43	52	26	0.52443
	9	0.44	0.41	3.41	678.3	31	36	0.7453
	17	0.66	0.41	3.51	703.73	136.5	54	0.89423
	3	1.05	0.39	2.88	1127.7	227.65	70.7	1.42605
	15	0.92	0.46	3.01	1351.1	420.75	71.19	1.84304
	9	0.75	0.36	2.71	1335.4	1334.4	439.53	3.10936

Anexo 2. Valores dasométricos para la generación de la ecuación alométrica de la especie de *Leucaena diversifolia*.

Clase dasométrica	No. Árbol	Altura total (m)	Altura de estaca (m)	D ₃₀ (cm)	Tallo (g)	Ramas (g)	Hojas (g)	Semilla (g)	Biomasa total (Kg)
	4	5.82	1.55	4	1094.8	1209.03	213.78	0	2.52
	24	3.5	1.49	3.1	759.5	459.25	87.4	0	1.31
Clase 1: 3.10 a 4.83	28	5.4	1.46	4.3	1053.15	1056.4	240.73	0	2.35
	12	5.7	1.26	4.4	1527.25	1639.3	397.28	93	3.66

	16	4.61	1.46	3.8	955.35	586.5	269.43	46	1.86
	18	5.85	1.67	4.2	1373.52	1244.85	374.65	0	2.99
	22	4.8	1.5	4.4	1209.37	1315.57	229.83	0	2.75
Clase 2: 4.83 - 6.55	7	7.05	1.5	6.5	3093.72	5153.43	1121.35	12.01	9.38
	8	6	1.51	5	1817.55	1732.75	534.08	63	4.15
	19	6.85	1.36	5.5	1974.7	2641.95	331.62	0	4.95
	20	7.55	1.45	5.2	2650.5	3791.85	786.12	0	7.23
	25	7.05	1.45	5.3	1571.7	975.1	289.1	0	2.84
	19	5.95	1.5	4.8	1311	688.05	230.05	0	2.23
	25	7.4	1.48	6.1	2688.3	3633.75	944.47	0	7.27
Clase 3: 6.55 - 8.28	3	7.1	1.46	8.28	6287.95	9055.2	2104.8	91.2	17.54
	12	8	1.5	7.4	3716.53	9111.45	2153.05	91	15.07
	15	7.16	1.52	7.9	4199.85	5638.97	1779.97	166	11.78
	21	7.7	1.41	6.9	2191.7	4767.35	1048.72	0	8.01
	14	7.95	1.48	7.3	4395.28	5917.5	1160.73	0	11.47
	1	8.1	1.55	7.3	3993.3	5890.77	1179.35	0	11.06
	17	6.85	1.5	7.8	3928.05	5212.08	1671.42	0	10.81
Clase 4: 8.28 - 10	12	7.9	1.58	10	8485.47	14118.5	2952.25	90	25.65
	2	8	1.5	9.2	6291.25	11131.1	3211.87	261.03	20.90
	26	7.3	1.48	9.1	6632.3	16086.3	3740.03	344.84	26.80

Anexo 3. Densidad total de macrofauna (m²)

Densidad total de lombrices (m ²)		
Tratamiento	2018	2022
PCM	18±7.61	18.5±7.61
PC+Ld	10.5±7.61	22.5±7.61
PC+Td	17±7.61	19±7.61