



# El Colegio de la Frontera Sur

Almacenamiento de carbono en la biomasa arbórea y el  
suelo en los sistemas ganaderos de Centro, Tabasco

TESIS

presentada como requisito parcial para optar al grado de  
Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural  
Con orientación en Agricultura, Sociedad y Ambiente

Por

César Augusto de la Cruz López

2023



# El Colegio de la Frontera Sur

Villahermosa, Tabasco; 07 de marzo de 2023.

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de:

**César Augusto de la Cruz López**

hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada:

**“Almacenamiento de carbono en la biomasa arbórea y el suelo en los sistemas ganaderos de Centro, Tabasco”**

para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural.**

	Nombre	Firma
Director:	Dr. Gilberto Villanueva López	_____
Codirector:	Dr. Fernando Casanova Lugo	_____
Asesor	Dr. Pablo Martínez Zurimendi	_____
Sinodal adicional	Dr. Rodimiro Ramos Reyes	_____
Sinodal adicional	M. en C. Aarón Jarquín Sánchez	_____
Sinodal adicional	Dr. Manuel Jesús Cach Pérez	_____
Sinodal suplente	Dr. Deb Raj Aryal	_____



“Los científicos pueden plantear los problemas que afectarán al medio ambiente con base en la evidencia disponible. Pero su solución no es responsabilidad de los científicos, es de toda la sociedad”

*Mario Molina*



## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada con numero de apoyo # 788842 durante los estudios de posgrado.

A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) por la beca otorgada del programa de apoyo de tesis de maestría (PATM).

Al Consejo de Ciencia y Tecnología de Tabasco (CCyTET) por la beca otorgada dentro del programa de apoyo a la actividad académica de los recursos humanos para la ciencia y la tecnología en Tabasco.

Al TecNM campus I.T. Zona Maya por la infraestructura brindada para poder llevar a cabo con éxito esta investigación.

Al Dr. Gilberto Villanueva López por su apoyo constante y orientación durante mi proceso de formación en ECOSUR, y en especial a mi consejo tutelar el Dr. Fernando Casanova Lugo y al Dr. Pablo Martínez Zurimendi, por sus consejos y mentoría para seguir mejorando como persona y como profesionalista.

A mis sinodales: Dr. Rodimiro Ramos Reyes, M. en C. Aarón Jarquín Sánchez, Dr. Manuel Jesús Cach Pérez y Dr. Deb Raj Aryal por sus contribuciones para la mejorar del manuscrito.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

**Tabla de contenido**

Resumen y palabras clave ..... 4

Capítulo 1. Introducción..... 5

Capítulo 2. Artículo científico ..... 9

Capítulo 3. Conclusión ..... 37

Literatura citada..... 38

Anexos ..... 43

## Resumen y palabras clave

La integración de árboles con pastos y animales (SSP) en las actividades pecuarias es un modelo de producción que genera innumerables beneficios productivos, económicos y ambientales. En este último ámbito, uno de los servicios más importantes que brindan estos sistemas es la capacidad que tienen para almacenar carbono (C), lo que contribuye, en gran medida, a mitigar los gases de efecto invernadero (GEI), causantes del cambio climático. El presente estudio se realizó en los sistemas ganaderos (SG) de la ranchería “Las Matillas”, localizada en el municipio de Centro, Tabasco, con el objetivo de evaluar la capacidad que tienen los SSP, en relación con los SG basados en el monocultivo de pastos, para almacenar C en la biomasa y en el suelo. Se seleccionaron SG con prácticas silvopastoriles: árboles dispersos en potreros (ADP), cercas vivas (CV) y monocultivo de pastos (MP). Para alcanzar el objetivo mencionado se estimaron y cuantificaron las reservas de C del componente arbóreo y del suelo (hasta 100 cm de profundidad). Adicionalmente, se determinaron algunas propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios en estudio. Los resultados mostraron que los SG con ADP y CV almacenan la mayor cantidad de C total (387.00 y 362.57 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente) que, los MP (312.49 Mg C ha<sup>-1</sup>). Del mismo modo, se observó que en CV el almacenamiento de C de la biomasa arbórea fue mayor (30.52 Mg C ha<sup>-1</sup>). El carbono orgánico del suelo (COS) fue mayor en ADP que en CV y MP (362.52, 332.05 y 312.49 Mg C ha<sup>-1</sup>; respectivamente). Además, se observó que la presencia del componente arbóreo en los SG con ADP y CV modificó favorablemente las propiedades físicas y químicas del suelo (pH, densidad aparente, materia orgánica y contenido de C). Se concluye que los SSP almacenan cantidades importantes de C a nivel de sistema y que las propiedades físicas y químicas del suelo son mejores que los sitios basados en el MP, evidenciando su contribución al desarrollo de una ganadería más sostenible. Además, juegan un papel importante en la mitigación de los GEI, causantes de la huella ambiental del sector pecuario y de la aceleración del cambio climático.

**Palabras clave:** agroforestería, cambio climático, captura de carbono, ganadería, sistemas silvopastoriles.

## Capítulo 1. Introducción

El carbono (C) es uno de los principales componentes de los organismos vivos y uno de los principales recursos del planeta. En los ecosistemas terrestres, los reservorios más importantes de captación de C son la vegetación y el suelo (Terrer et al. 2021; Ferreiro-Domínguez et al. 2022). El aumento de los niveles de C y de otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, causado en gran parte por las actividades humanas entre las que cabe destacar a la ganadería, han dado lugar al cambio climático (CC), el cual tiene consecuencias negativas tanto para el ser humano como para el funcionamiento de los ecosistemas (Power 2009). La evidencia más notoria del CC es el calentamiento global, que provoca cambios en el funcionamiento de los ecosistemas y en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos causando, entre otros, diversos desastres naturales (Mondragón-Suárez et al. 2019; Utsumi y Kim 2022). Por ello, es necesario implementar estrategias que contribuyan a la disminución de los niveles de C en la atmósfera, no sólo a través de la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sino también por medio de su almacenamiento (Arcos-Navarro 2007; Soares et al. 2020; Laborde et al. 2021).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son sistemas multifuncionales en los que se combinan pastos, árboles y animales que pueden brindar una amplia gama de servicios ambientales como, la captación y almacenamiento de C y la conservación de biodiversidad, entre otros (Fornara et al. 2018; Opdenbosch y Hansson 2022). En los SSP se logra con éxito una mayor productividad del sistema gracias al uso eficiente de los recursos disponibles (Pent 2020).

En México, los suelos contienen, en promedio 1.8% de C orgánico (Segura-Castruita et al. 2005), aunque los que están degradados por la agricultura convencional retienen menos C. Según Contreras-Santos et al. (2021), los SSP logran almacenar mayor cantidad de C que las praderas. Por ejemplo, en los SSP establecidos en Michoacán el almacenamiento de C es mayor que en los monocultivos de gramíneas (López-Santiago et al. 2019). Esto es debido a una mayor diversidad vegetal en los SSP, lo cual favorece el almacenamiento de C (Aryal et al. 2018; Yang et al. 2019).

En los ecosistemas tropicales, el manejo de los diversos cultivos provoca variaciones en la capacidad de retención de C en el suelo, dependiendo de la especie y de la densidad de siembra (Morales-Coutiño 2010). Por tanto, la incorporación de árboles y arbustos en suelos agrícolas y pastizales abandonados es muy aconsejable, ya que restaura la capacidad de almacenar C (Silver et al. 2000). La acumulación de C en el suelo también está influenciada por la carga del componente animal, ya que el pastoreo extensivo modifica considerablemente las propiedades físicas y químicas de los suelos, resultando en un incremento en la densidad aparente y la temperatura del suelo, los cuales afectan al almacenamiento de C (Ferreiro-Domínguez et al. 2016; Abdalla et al. 2018; Aryal 2022).

De igual forma, se ha evidenciado que en pastizales con un manejo extensivo de pastoreo, existen variaciones en cuanto al almacenamiento del C orgánico (Abdalla et al. 2018). Además, estas malas prácticas son impulsoras del aumento de CO<sub>2</sub> ya que degradan los suelos provocando que éstos pasen de ser sumideros de CO<sub>2</sub> a fuentes de CO<sub>2</sub> (Enriquez et al. 2015).

En general, la intensificación de la agricultura de manera sostenible, como la que ofrecen los SSP, requiere de un manejo apropiado desde diversos puntos de vista. Para optimizar su rendimiento y captación de C hay que considerar una serie de variables que condicionan los rendimientos como: características del suelo, composición vegetal, concentración de minerales, pH y absorción del agua, en los cuales también intervienen la biomasa leñosa de los árboles y la hojarasca que renueva el C subterráneo (Brewer y Gaudin 2020). La presencia de especies arbóreas en SSP ha mostrado resultados favorables respecto a los contenidos de materia orgánica y C del suelo, los cuales se ven influenciados por el material orgánico depositado, el cual favorece el almacenamiento de C (Hoosbeek et al. 2018).

En América, según la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) la fermentación entérica y el manejo del estiércol representan un total de emisiones de 0.67 y 0.07 t de CO<sub>2</sub> eq, respectivamente, producto de las actividades primarias (agricultura). Además, se espera que el total de estas



emisiones aumente considerablemente en los próximos 20 años para Asia, América Latina y África (Beach et al. 2015).

El cambio de uso de suelo para establecer lugares de ganadería extensiva a nivel mundial representa un poco más de 200 millones de hectáreas. En México, la ganadería crece en torno al 4% anualmente con la finalidad de abastecer de alimentos a una población que va en aumento. Se estima que el cambio de uso de suelo en México contribuye con el 9% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Kolb y Galicia 2018; López-Santiago et al. 2019; Pozo-Leyva et al. 2019; Veldkamp et al. 2020).

En la actualidad, se han intensificado algunas estrategias con el propósito de mitigar las emisiones de GEI. Así, por ejemplo, alternativas limpias como los sistemas agroforestales (SAF) y los SSP han permitido reducir las emisiones de estos gases con éxito (Feliciano et al. 2018). En el sureste de México (Tacotalpa, Tabasco), el componente arbóreo de sistemas ganaderos con cercas vivas (CV) de *Gliricidia sepium* representa el 5.7 % del total de carbono almacenado, mientras que el suelo aporta 107 Mg C ha<sup>-1</sup> (Villanueva-López et al. 2015). Por otro lado, los SSP estudiados por Valenzuela-Que et al.(2022) logran almacenar un 58.8 % más de C comparado con los monocultivos de pastos. Además, recientemente se ha reportado que los sistemas ganaderos con árboles dispersos en potreros (ADP) son una alternativa útil para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> (López-Santiago et al. 2023).

En otro estudio realizado en Chiapas por Aryal et al. (2019), se observó que los SSP contribuyen significativamente a la conservación de especies arbóreas, siendo el C almacenado en el suelo mayor que en los sistemas de pastizales.

La producción de raíces finas en SSP también tiene una fuerte influencia en el C almacenado del suelo, demostrando ser una estrategia útil para mitigar los GEI (Morales-Ruiz et al. 2021). Así, la implementación de prácticas sostenibles en los sistemas ganaderos resulta ser una opción beneficiosa tal como establecen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Valenzuela-Que et al. 2022).

Por lo anteriormente planteado, y dada la variabilidad que existe entre las diferentes zonas del sureste mexicano, es necesario seguir explorando los reservorios de carbono de los sistemas ganaderos con la finalidad de entender su funcionalidad. El objetivo general de esta investigación es evaluar el potencial que tienen, tanto el componente arbóreo como los suelos, en los SSP para almacenar C en comparación con los sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pastos en la ranchería “Las Matillas”, 4ª sección del municipio de Centro, Tabasco. Partimos del supuesto de que el contenido de C almacenado en los sistemas ganaderos estará influenciado por la diversidad de especies arbóreas y por las propiedades físicas y químicas de los suelos.

### **Objetivo general**

- Evaluar el almacenamiento de carbono en los sistemas silvopastoriles y en los sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pastos en la ranchería Las Matillas” 4ª sección del municipio de Centro, Tabasco.

### **Objetivos específicos**

- Estimar el almacenamiento de carbono del componente arbóreo de los sistemas silvopastoriles en la ranchería “Las Matillas” 4ta. Sección del municipio de Centro, Tabasco.
- Cuantificar el almacenamiento del carbono orgánico del suelo en los sistemas silvopastoriles y en sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pasto.
- Determinar la influencia de los sistemas silvopastoriles sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en relación con sistemas ganaderos en monocultivo de pastos.

## Capítulo 2. Artículo científico

### ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA ARBÓREA Y EL SUELO EN SISTEMAS GANADEROS DEL TRÓPICO HÚMEDO

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA ARBÓREA Y EL SUELO EN SISTEMAS  
GANADEROS DEL TRÓPICO HÚMEDO**

**CARBON STORAGE IN TREE BIOMASS AND SOILS IN LIVESTOCK SYSTEMS OF THE HUMID  
TROPICS**

César Augusto De la Cruz-López<sup>1</sup>, Gilberto Villanueva-López<sup>2\*</sup>, Fernando Casanova-Lugo<sup>3</sup>, Pablo  
Martínez-Zurimendi<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural, El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>2</sup>Ganadería sustentable y cambio climático, El Colegio de la Frontera Sur, Carretera a Reforma Km 5.5 s/n, Ra. Guineo Segunda Sección. CP. 86280. Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México / I. T. Zona Maya, Othón P. Blanco, Quintana Roo, México.

<sup>4</sup>Agroecología, El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>5</sup>Sustainable Forest Management Research Institute UVA-INIA, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid, núm. 57, Palencia, España

\*Autor de correspondencia: [gwillanueva@ecosur.mx](mailto:gwillanueva@ecosur.mx)

## **RESUMEN**

El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad que tienen los sistemas silvopastoriles y los sistemas basados en el monocultivo de pasto, para almacenar carbono (C) en la biomasa arbórea y en el suelo. Se seleccionaron sistemas ganaderos con árboles dispersos en potreros (ADP), cercas vivas (CV) y monocultivo de pastos (MP) estableciendo parcelas completamente al azar, se midió el contenido de C en la biomasa aérea y subterránea de los árboles a través de modelos alométricos, se determinó la fracción de C del suelo de 0-100 cm en estratos de 10 cm y luego se estimó el contenido de carbono orgánico del suelo (COS).

Adicionalmente, se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo. Los resultados muestran que los ADP y CV almacenan una cantidad mayor de C total (387.00 y 362.57 Mg C ha<sup>-1</sup>) comparados con los MP (312.49 Mg C ha<sup>-1</sup>). El 90 % del total de C almacenado en ADP y CV se encuentra en el suelo. El componente arbóreo en sistemas ganaderos modificó favorablemente el pH, la densidad aparente del suelo, la materia orgánica, el contenido de carbono y nitrógeno. Se concluye que la diversidad arbórea es clave para el almacenamiento de C en la biomasa, que la profundidad de muestreo es esencial para medir adecuadamente el contenido de C total en el sistema y que la distribución vertical del COS se relaciona con el contenido de arcilla, favoreciendo la acumulación de C en las capas profundas del suelo.

**Palabras claves:** agroforestería, cambio climático, gases de efecto invernadero, servicios ambientales, sistemas silvopastoriles.

## **ABSTRACT**

The objective of the study was to evaluate the capacity of silvopastoral systems and systems based on grass monoculture to store carbon (C) in tree biomass and soil. Livestock systems with trees dispersed in paddocks (ADP), live fences (CV) and pasture monoculture (MP) were selected by establishing completely random plots, the C content in the aerial and underground biomass of the trees was measured through allometric models, the C fraction of the soil of 0-100 cm in 10 cm strata was determined and then the soil organic carbon (COS) content was estimated. Additionally, the physical and chemical properties of the soil were determined. The results show that ADP and CV store a higher amount of total C (387.00 and 362.57 Mg C ha<sup>-1</sup>) compared to MP (312.49 Mg C ha<sup>-1</sup>). 90% of the total C stored in ADP and CV is in the ground. The tree component in livestock systems favorably modified the pH, the bulk density of the soil, organic matter, carbon and nitrogen content. It is concluded that tree diversity is key to the storage of C in biomass, that sampling depth is essential

to properly measure the total C content in the system and that the vertical distribution of COS is related to clay content, favoring the accumulation of C in the deep layers of the soil.

**Key words:** agroforestry, climate change, greenhouse gases, environmental services, silvopastoral systems.

## INTRODUCCIÓN

Durante los próximos 80 años, se prevé que los cambios bruscos de temperatura aumenten sustancialmente en todo el mundo como parte del cambio climático (CC), por ello, se deben buscar prácticas agrícolas y ganaderas que intenten mitigar estos impactos y promuevan la conservación de los ecosistemas (Kauffman *et al.* 2022). No obstante, en algunas regiones, como las del trópico, la agricultura y, especialmente, la actividad ganadera son unas de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el cambio de uso del suelo es el origen a nivel global de una cuarta parte de las emisiones de GEI (Laborde *et al.* 2021, Lemes *et al.* 2021).

La transformación sin precedentes de la cobertura forestal en áreas de pastizales desde mediados del siglo XX ha contribuido a que las emisiones de GEI del sector pecuario aumenten 51 % a nivel mundial y 117 % en los países en desarrollo (Caro *et al.* 2014, Havlík *et al.* 2014). Los principales GEI con que contribuye la ganadería son las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); estos gases contribuyen, aproximadamente, entre el 12 y el 18 % de las emisiones totales a la atmosfera (Houghton y Nassikas 2017). Los desastres originados por el CC y los derivados de cambio de uso del suelo se suman la deforestación y a la degradación de suelos ocasionada por el establecimiento de pasturas para el desarrollo de la ganadería bovina de forma extensiva (Caro *et al.* 2014). A pesar de sus impactos ambientales desfavorables, la ganadería es una fuente importante de alimento y de sustento de millones de familias. La ganadería aporta más del 50% del requerimiento de proteína de la dieta de la población en forma de leche y carne y es la principal fuente de ingresos de millones de familias pobres, generando miles de empleos permanentes y temporales (Steinfeld y Wassenaar 2007).

Para el Estado de Tabasco, considerada hoy en día una entidad eminentemente ganadera, estos aspectos de agroecosistemas simplificados y el carácter insostenible de los sistemas ganaderos manejados de forma extensiva, aunados al escenario actual de cambio climático global, entre otros, están agudizando cada vez más las tendencias de deterioro de los sistemas de producción de alimentos de origen animal alejándolos de la sustentabilidad (Silván-Hernández *et al.* 2017, Villanueva-López *et al.* 2019).

En este sentido, es una prioridad evaluar nuevas alternativas de producción ganadera concebidos para proveer de servicios ecosistémicos sostenibles y con alto potencial productivo equilibrados con la conservación de los recursos y el medio ambiente, que permitan al sector ganadero disponer de estrategias de adaptación al CC. Los sistemas silvopastoriles (SSP) constituyen una alternativa de producción pecuaria sustentable, de bajas emisiones de GEI, competitiva, que implique la integración de árboles, pastos, y ganado bajo un sistema de manejo integral para mejorar la resiliencia agroecológica y comunitaria frente al CC, al combinar funciones productivas con servicios ambientales y pueden ser capaces de contribuir en esta dirección (Lemes *et al.* 2021, Sales-Baptista y Ferraz-de-Oliveira 2021). En climas tropicales estos sistemas proveen de fuentes de alimentos de mayor valor nutritivo y de fácil acceso para el ganado que los hace más productivos, rentables, duraderos y resilientes al CC, capaces de garantizar la seguridad alimentaria. Mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, debido a la fijación de N atmosférico a través de asociaciones simbióticas, o por la entrada de hojarasca por encima y de raíces por debajo del suelo, generadas por el arbolado y, que contribuyen a frenar la degradación del suelo (Aryal *et al.* 2019, Polanía-Hincapié *et al.* 2021, Xu *et al.* 2021). Contribuyen a la conservación de la biodiversidad tanto en la escala de parcela como de paisaje al proporcionar hábitat, recursos alimenticios, conectividad entre paisajes fragmentados y como corredores biológicos para una amplia gama de especies de plantas y animales que habitan en los paisajes ganaderos, brindando servicios ambientales e incluyendo la conservación de especies amenazadas en estos sistemas y la restauración de los paisajes ganaderos degradados (Dawud *et al.* 2016, Cárdenas *et al.* 2019). En las últimas décadas han sido reconocidos por su potencial para mitigar

el CC ya que pueden almacenar grandes cantidades de C en la biomasa aérea, hojarasca y reservorios del suelo, además de funcionar como sumideros de CO<sub>2</sub> dependiendo de las propiedades del clima y uso del suelo (Ferreiro-Domínguez *et al.* 2022, Aryal *et al.* 2019). Al respecto Valenzuela-Que *et al.* (2022) en encontró que los sistemas ganaderos con árboles dispersos en potreros de la sierra de Tabasco logran almacenar un 58.8 % más C que en los sitios basados en el monocultivo de pastos. De igual manera, Villanueva-López *et al.* (2015) en esta misma región encontró que los sistemas ganaderos con presencia de cercas vivas almacenan 119.82 Mg C ha<sup>-1</sup> superior a los 113.34 Mg C ha<sup>-1</sup> almacenados en sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pasto.

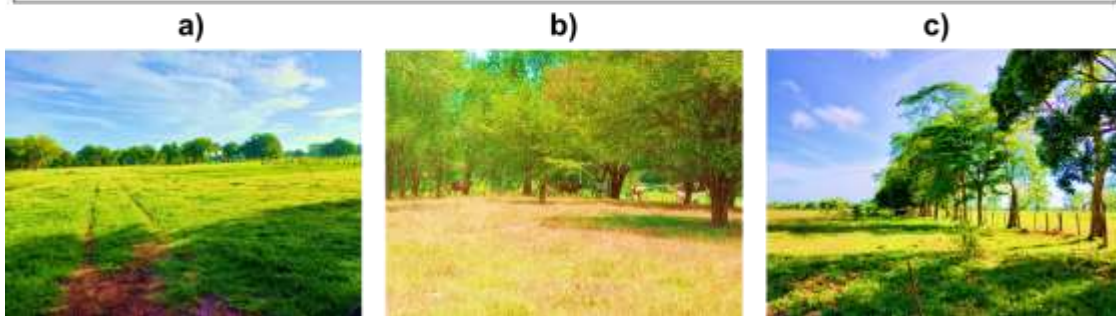
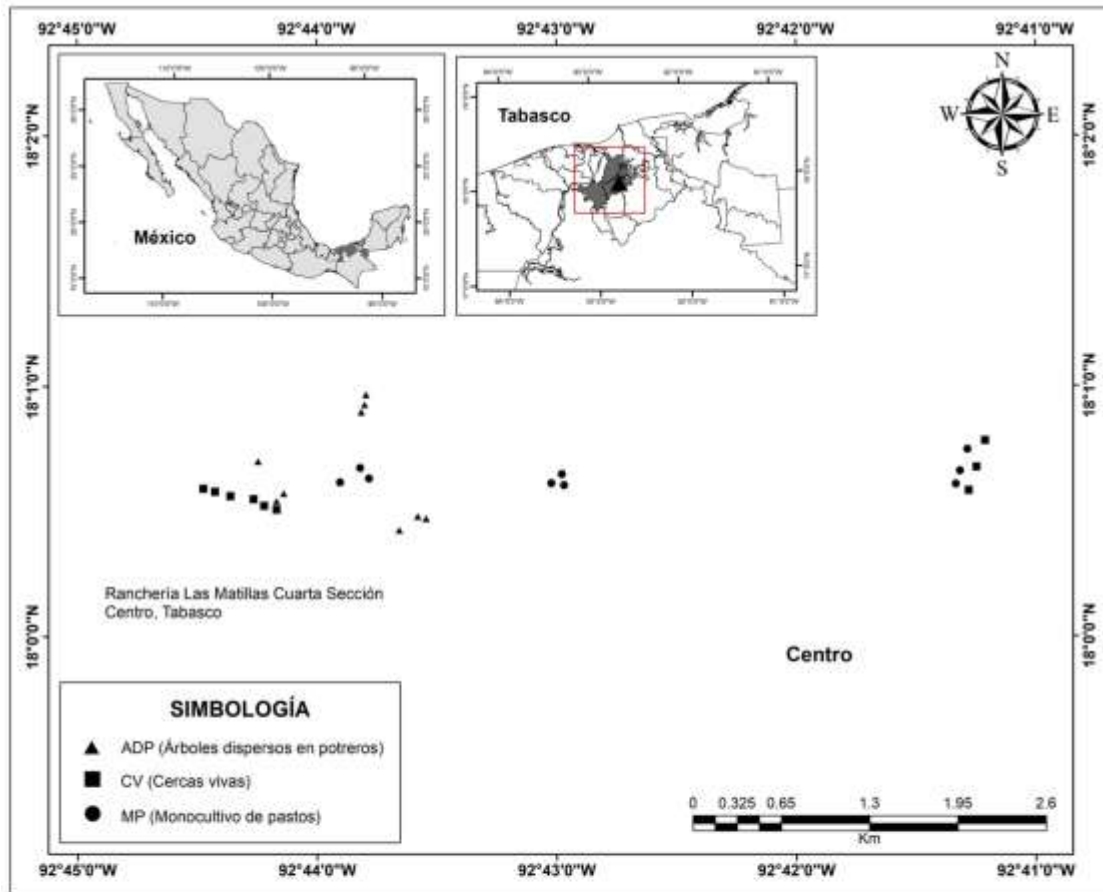
Debido a la variabilidad que existe entre una zona a otra en el trópico húmedo mexicano, hace la necesidad de explorar los almacenes de carbono en sistemas ganaderos, además de que a profundidades mayores (0 – 100 cm) muy poco se sabe del potencial para almacenar carbono en el suelo. Desde esta perspectiva, y dada la preocupación mundial sobre el CC, es necesario monitorear los almacenes de C en estos sistemas ganaderos para tener un panorama más claro del potencial de mitigación y adaptación al CC. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad que tienen los sistemas silvopastoriles y los sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pasto de Centro, Tabasco, para almacenar C en el suelo y en la biomasa arbórea, además de evaluar la influencia que tienen sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Con el propósito de que sean considerados como una estrategia en la política de C neutral. Partimos del supuesto de que el C almacenado en los reservorios de los sistemas ganaderos se verá influenciado por las características físicas y químicas de los suelos, así como por el componente arbóreo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

**Área de estudio.** El estudio se realizó en la ranchería “Las Matillas” 4<sup>a</sup> sección, en el municipio de Centro, Tabasco (Figura 1). La localidad de estudio se encuentra en la zona del trópico húmedo mexicano (18°0'11.30" N, 92°43'36.22" O), la cual presenta un clima húmedo con abundantes lluvias en verano (Am),



temperatura promedio que oscila entre los 26 y 28 °C y precipitación anual promedio entre los 1500 y 2500 mm. Los tipos de suelo que predominan en la zona son los gleysoles y vertisoles (INEGI 2018, Palma-López *et al.* 2018).



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de muestreo en la rancharía “Las matillas” en Centro, Tabasco; sistemas ganaderos a) monocultivo de pastos, b) árboles dispersos en potrero, c) cercas vivas. (Fotografías: De la Cruz López, César Augusto, 2022).

**Características y selección de los sistemas de estudio.** Se seleccionaron tres sistemas ganaderos tradicionales de la región: 1) sistemas ganaderos árboles dispersos en potrero (ADP), 2) con cercas vivas (CV) y, 3) en monocultivo de pastos (MP). En la Tabla 1 se muestran las principales características de dichos sistemas.

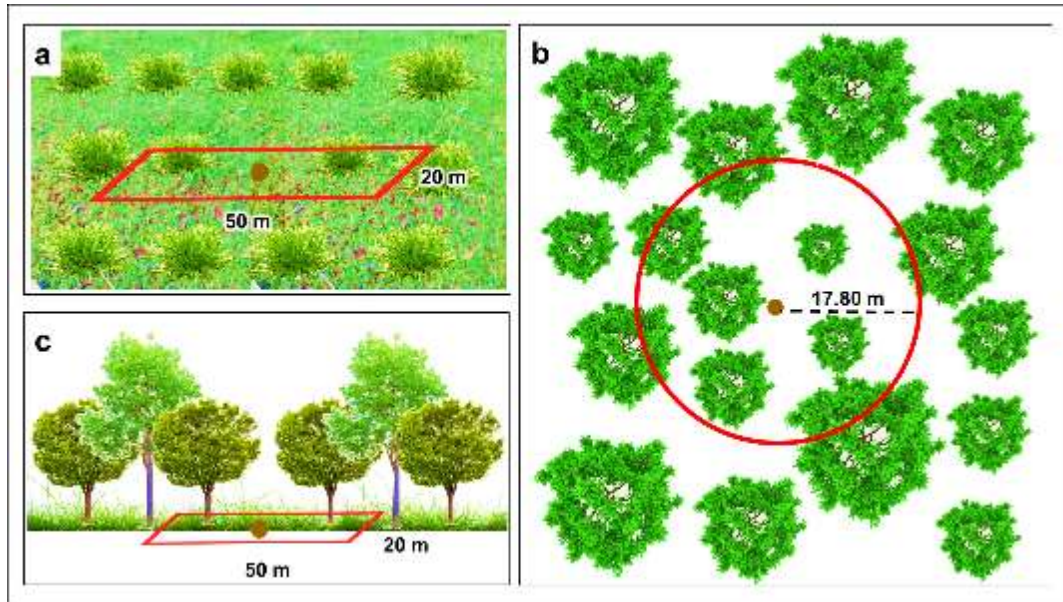
**Tabla 1.** Características biofísicas de los sistemas ganaderos en Centro, Tabasco. MP: Monocultivo de pastos, ADP: Árboles dispersos en potreros, CV: Cercas vivas.

Características	Sistema ganadero		
	MP	ADP	CV
Edad del sistema	15-25	25-30	20-30
Elevación (msnm)	5-8	5-6	6-8
Topografía del sitio	Plana	Plana	Plana
Objetivos de producción	Engorda de novillos	Engorda de novillos y doble propósito	Engorda de novillos
Tipo de sistema de pastoreo	intensivo	Semi intensivo	Semi intensivo
Días de pastoreo	15	15-20	20
Potreros rotacionales	Si	Si	Si
Densidad de árboles (ind ha <sup>-1</sup> )	-	116	-
Densidad de árboles (ind m <sup>-1</sup> )	-	-	114
Índice de dominancia (D)*	-	0	0.527
Índice de Shannon (H <sup>*</sup> )	-	0	1.194
Equitatividad (J)*	-	ND	0.527
Número total de especies (árboles)	-	1	8
Especies arbóreas	-	<i>Haematoxylum campechianum</i>	<i>Tabebuia rosea</i> , <i>Tectona grandis</i> , <i>Delonix regia</i> , <i>Cassia fistula</i> , <i>Stemmadenia donnell-smithii</i> , <i>Psidium guajava</i> , <i>Ceiba pentandra</i> y <i>Tabebuia chrysantha</i>
Especies de pastos	<i>Cynodon plectostachyus</i> , <i>Ischaemum aristatum</i> y <i>Paspalum notatum</i>	<i>I. aristatum</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>P. notatum</i> , <i>Axonopus compressus</i> , <i>Paspalum conjugatum</i> y <i>Pennisetum setaceum</i>	<i>I. aristatum</i> , <i>P. conjugatum</i> , <i>A. compressus</i> , <i>P. setaceum</i> y <i>P. notatum</i>
Tipo de suelo	Vertisol	Vertisol	Vertisol

\*Índices ecológicos de diversidad del componente arbóreo, ND: No detectado.

En el área de estudio por cada sistema ganadero se seleccionaron tres ranchos, en cada uno de los cuales se asignaron aleatoriamente tres parcelas para establecer un total de nueve parcelas (repeticiones) de muestreo. En los sistemas ganaderos con CV y MP la forma de las parcelas fue rectangular con un tamaño

de 1000 m<sup>2</sup> (50 m x 20 m). Para los sistemas ganaderos con ADP la forma de las parcelas fue circular con un radio de 17.80 m (Figura 2) (Villanueva-López *et al.* 2015). En cada una de las parcelas se realizó el inventario del componente arbóreo. Las muestras de suelo se tomaron en el centro de cada parcela. Para todos los sistemas ganaderos se mantuvo una distancia mínima entre parcelas de 30 m.



**Figura 2.** Sistemas ganaderos: a) monocultivo de pastos, b) árboles dispersos en potreros y c) cercas vivas.

**Muestreo de suelos.** En cada parcela se elaboró de forma manual una calicata de 1 × 1 × 1 m. En cada una se tomó una muestra inalterada de suelo en una pared de la calicata en estratos de 10 cm (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 y 90-100 cm) que sirvió para determinar el carbono orgánico del suelo (COS) y la densidad aparente del suelo (DA). Al finalizar el muestreo, el suelo de cada profundidad en cada parcela fue mezclado hasta estar completamente homogenizado y se tomó una submuestra de aproximadamente 500 g. Las muestras del suelo fueron depositadas en bolsas de polietileno etiquetadas con los datos del sistema (parcela, profundidad y fecha de muestreo) y trasladadas al Laboratorio de Ecofisiología Vegetal y Sistemas Agroforestales de El Colegio de la Frontera Sur-Villahermosa para ser secadas bajo sombra, molidas y pasadas por un tamiz de 2 mm de abertura.

**Análisis de laboratorio de suelos.** Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas del TecNM campus I.T. Zona Maya. A cada una de las muestras se les determinó el pH en una relación 1:2 y la textura del suelo (hidrómetro de Bouyoucos) según los métodos descritos en la NOM-021(SEMARNAT 2000). La DA se determinó por el método de la probeta (Cristóbal-Acevedo *et al.* 2015). El contenido de carbono (% C) y nitrógeno (% N) mediante el método de combustión seca con un analizador elemental CHNS/O (Perkin Elmer 2400 Serie II). El contenido de materia orgánica (MO) se estimó a partir del contenido de %C por el factor de conversión 1.724 propuesto por Díaz-Romeu y Hunter (1982). Finalmente se calculó la relación C/N dividiendo los contenidos de C entre los contenidos de N del suelo.

**Biomasa arbórea.** En cada parcela se midió el diámetro de todos los árboles a la altura del pecho (DAP>10 cm). Éste se midió a una altura de 1.3 m, desde el nivel de suelo, utilizando cinta diamétrica. La altura total de los árboles se midió utilizando una pistola láser Criterion RD 1000 (Laser Technology Inc. USA). Se identificaron los árboles por su nombre científico y común. Posteriormente, a nivel de especie, se identificaron los datos de densidad de madera en la base de datos global propuesta por Zanne *et al.* (2009).

La biomasa aérea de cada árbol (BA) se cuantificó aplicando la ecuación 1 para árboles tropicales propuesta por Chave *et al.* (2014):

$$BA (kg) = 0.0673(\rho \times D^2 \times H)^{0.976} \quad (1)$$

Donde: BA es la biomasa aérea de cada árbol (kg),  $\rho$  es la densidad de madera de la especie ( $g\ cm^{-3}$ ), D es el diámetro a la altura del pecho (cm) y H es la altura total del árbol (m). El stock de AGB ( $Mg\ ha^{-1}$ ) se estimó aplicando la ecuación 2.

$$AGB (Mg\ ha^{-1}) = \frac{\sum BA\ por\ árbol\ (Kg)}{\text{Área de muestreo (m}^2)} \times 10\ 000 \quad (2)$$

Donde: AGB es la biomasa aérea de los árboles por hectárea ( $Mg\ ha^{-1}$ ) y BA la biomasa aérea de cada árbol de la parcela (kg).

La biomasa de las raíces se estimó utilizando la ecuación 3 propuesta por Cairns *et al.* (1997):

$$BR (Mg\ ha^{-1}) = \exp(-1.085 + 0.926 \ln (AGB)) \quad (3)$$

Donde: BR es la biomasa de raíces de los árboles ( $Mg\ ha^{-1}$ ) y AGB es la biomasa aérea ( $Mg\ ha^{-1}$ )

**Carbono en la biomasa arbórea.** Se estimó multiplicando los valores de biomasa de cada árbol por el factor 0.5 sugerido para las especies arbóreas en regiones tropicales.

**Almacenes de carbono orgánico del suelo (COS).** El almacenamiento de COS hasta los 100 cm de profundidad en cada sistema se calculó utilizando los resultados de laboratorio de DA, el contenido de % C de cada estrato y la profundidad de muestreo. Posteriormente se sumaron los COS en cada profundidad analizada. El COS en cada rango de profundidad se calculó mediante la siguiente ecuación 4 propuesta por Aryal *et al.* (2018):

$$COS (Mg\ C\ ha^{-1}) = \frac{CC \times DA \times PM \times 10000}{100} \quad (4)$$

Dónde: COS ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) es el carbono orgánico del suelo; CC es el contenido del carbono (% C); DA es la densidad aparente del suelo ( $g\ cm^{-3}$ ); PM es el espesor del estrato de suelo considerado (m).

**Almacenamiento de carbono a nivel de sistema.** Se estimó empleando la ecuación 5 para condiciones de climas tropicales (Schmitt-Harsh *et al.* 2012):

$$C\ almacenado (Mg\ C\ ha^{-1}) = AGB + BR + COS \quad (5)$$

Dónde: C almacenado es igual a la sumatoria de los reservorios de C del sistema; AGB es la biomasa aérea ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ); BR es la biomasa de la raíz ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ); y el COS es el C orgánico del suelo ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ).

**Análisis de datos.** Se comprobaron los supuestos de normalidad de los datos con la prueba de Kolmogórov-Smirnov. La homogeneidad de varianzas se analizó a partir de la prueba de Levene. Los datos del presente estudio no presentaron una distribución normal, por tanto se les aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con la finalidad de comparar las diferencias entre medias. Se realizó el análisis de correlación de Spearman entre el COS y las variables físicas y químicas del suelo. Se estimaron los índices de biodiversidad (índice de Simpson, índice de Shannon y el índice de Pielou) (Tabla 1) con el software 4.0. En la prueba

estadística se tuvo un nivel de significancia del 95%. Todos los datos estadísticos fueron procesados con el software Statistica versión 8.0 para Windows.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Almacenamiento de C del componente arbóreo.** El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los sistemas ganaderos evaluados ( $H = 9.03$ ,  $P = 0.025$ ). La mayor cantidad se almacenó en el sistema ganadero con CV en relación con los sistemas ganaderos con ADP (Tabla 2), pero en ambos sistemas fue mayor en la biomasa aérea. Esta diferencia podría atribuirse a una mayor riqueza y diversidad de los árboles en los sistemas ganaderos con CV como lo muestran el índice de diversidad ( $H'$ ) (Tabla 1).

**Tabla 2.** Almacenamiento de carbono ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) en el componente arbóreo (biomasa aérea y raíz) en sistemas ganaderos de Centro, Tabasco.

Componente	Sistema ganadero		
	MP	ADP	CV
<b>Biomasa aérea</b>	-	$20.77 \pm 3.63^b$	$25.77 \pm 3.78^a$
<b>Biomasa raíz</b>	-	$3.71 \pm 0.64^b$	$4.75 \pm 0.84^a$
<b>Biomasa total</b>	-	$24.48 \pm 4.22^b$	$30.52 \pm 4.60^a$

Medias y error estándar ( $\pm$ ) con una letra común entre columnas no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). MP: monocultivo de pastos, ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas.

Nuestros resultados muestran que el almacenamiento de C en el componente arbóreo de los sistemas ganaderos con CV fue mucho mayor a lo encontrado por Villanueva-López *et al.* (2015) ( $6.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) en sistemas ganaderos con CV de *Gliricidia sepium* en Tacotalpa, Tabasco. Esta diferencia probablemente se deba a una mayor diversidad y tamaño de las especies identificadas en esta investigación (Tabla 1) (Aryal *et al.* 2018). Mientras que el C almacenado en el componente arbóreo en los sistemas ganaderos con ADP constituido únicamente por la especie *H. campechianum*, es la tercera para lo reportado por Valenzuela-Que *et al.* (2022) ( $89.28 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) en sistemas ganaderos con ADP de: *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata*, *C.*

*pentandra*, *Citrus sinensis*, *Persea americana*, *Mangifera indica*, *Bursera simaruba*, *Vatairea lundellii*, *Garcinia intermedia* y *Diphysa robinoides* en Tacotalpa. Estas diferencias coinciden con lo reportado por diversos estudios que señalan que, a mayor riqueza y diversidad de especies arbóreas, y dimensiones de los árboles aumenta considerablemente el almacenamiento de C (Wang *et al.* 2023).

**Almacenamiento de COS en sistemas ganaderos.** El almacenamiento de COS hasta los 100 cm de profundidad entre sistemas ganaderos no presentó diferencias significativas ( $H = 1.64$ ,  $P = 0.440$ ). Sin embargo, se observó que este fue mayor en los sistemas ganaderos con ADP, seguido por aquellos que tenían CV y en MP (Tabla 3). De igual manera, la distribución vertical del COS almacenado entre profundidades tampoco mostró diferencias significativas MP ( $H = 8.51$ ,  $P = 0.483$ ), ADP ( $H = 13.94$ ,  $P = 0.124$ ) y CV ( $H = 6.98$ ,  $P = 0.639$ ), siguiendo una tendencia de distribución unimodal (Tabla 3); Osei *et al.* (2017) señala que, en las capas mas profundas del suelo (después de los 40 cm de profundidad) la distribución del COS no se verá influenciado por el tipo de vegetación sobre el suelo, la distribución del COS pudiera estar atribuido a las características de los sitios en estudio, pues al terminar la temporada de lluvias, los suelos permanecen por largos periodos inundados, por lo que es probable que el COS en la superficie del suelo se vea afectado en mayor medida que en las capas más profundas del suelo, influyendo en la distribución vertical del COS (Hobley *et al.* 2015).

**Tabla 3.** Carbono orgánico del suelo en sistemas ganaderos a diferentes profundidades de Centro, Tabasco.

Profundidad (cm)	Sistemas ganaderos (Mg C ha <sup>-1</sup> )		
	MP	ADP	CV
10	22.66 ± 3.11 <sup>aA</sup>	24.42 ± 0.83 <sup>aA</sup>	24.01 ± 1.89 <sup>aA</sup>
20	23.49 ± 1.81 <sup>aA</sup>	19.49 ± 2.56 <sup>aA</sup>	35.56 ± 9.14 <sup>aA</sup>
30	24.83 ± 2.13 <sup>aA</sup>	27.87 ± 6.72 <sup>aA</sup>	31.42 ± 4.16 <sup>aA</sup>
40	28.8 ± 2.19 <sup>aA</sup>	40.98 ± 16.44 <sup>aA</sup>	35.01 ± 6.74 <sup>aA</sup>
50	34.93 ± 11.16 <sup>aA</sup>	39.91 ± 15.4 <sup>aA</sup>	40.48 ± 4.47 <sup>aA</sup>
60	27.36 ± 3.15 <sup>aA</sup>	29.36 ± 3.02 <sup>aA</sup>	35.66 ± 3.03 <sup>aA</sup>
70	35.95 ± 5.3 <sup>aA</sup>	41.78 ± 10.6 <sup>aA</sup>	37.31 ± 6.53 <sup>aA</sup>
80	35.33 ± 11.35 <sup>aA</sup>	55.25 ± 11.73 <sup>aA</sup>	37.65 ± 4.47 <sup>aA</sup>
90	44.01 ± 10.5 <sup>aA</sup>	40.29 ± 2.67 <sup>aA</sup>	27.86 ± 10.73 <sup>aA</sup>
100	35.13 ± 15.59 <sup>aA</sup>	43.17 ± 5.04 <sup>aA</sup>	27.09 ± 13.96 <sup>aA</sup>
<b>Σ COS a 100 cm</b>	<b>312.49<sup>a</sup></b>	<b>362.52<sup>a</sup></b>	<b>332.05<sup>a</sup></b>

Medias y error estándar ( $\pm$ ) con una letra común en minúsculas entre filas no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). Las literales en mayúsculas indican una comparación entre profundidades (columnas). COS: Carbono orgánico del suelo; MP: monocultivo de pastos, ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas.

Los resultados presentados en esta investigación son menores a los aportados por Valenzuela-Que *et al.* (2022), quienes reportaron valores de 257.45 Mg C ha<sup>-1</sup> a 30 cm de profundidad en sistemas ganaderos con ADP. De igual manera, los valores obtenidos en los sistemas ganaderos con CV y en MP (332.05 y 312.49 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente) son tres veces mayores que los reportados por Villanueva-López *et al.* (2015) (107 Mg C ha<sup>-1</sup>) en sistemas ganaderos con CV constituidas por árboles de *Gliricidia sepium* asociadas con pasto *Brachiaria decumbens* y en sistemas ganaderos en MP (119 Mg C ha<sup>-1</sup>) en esta misma región tropical. Asimismo, son mayores a lo reportado por López-Santiago *et al.* (2019) (73.4 Mg C ha<sup>-1</sup>) en sistemas en MP en Michoacán. Estas diferencias respecto a las variaciones del COS podrían atribuirse al efecto de la altitud pues los estudios antes citados la elevación oscila entre 300 – 900 msnm, mientras que para nuestra área de estudio oscila entre los 5 – 8 msnm (Tabla 1), se ha demostrado que a medida que aumenta la altitud, acrecienta el COS, del mismo modo en que disminuye la altitud resultará es una reducción del COS (Bojko *et al.* 2017, Huamán-Carrión *et al.* 2021), adicional a esto podemos agregar que estas diferencias podrían atribuirse a una mayor profundidad de muestreo: en nuestro estudio los muestreos se realizaron hasta 100 cm de profundidad, mientras que en los estudios antes mencionados la profundidad de muestreo fue hasta los 30 cm. Nuestros hallazgos son consistentes con lo reportado por Ferreiro-Domínguez *et al.* (2022) y Cardinael *et al.* (2017) quienes encontraron mayor almacenamiento de COS cuando los sitios son evaluados hasta los 100 cm de profundidad. Otros estudios (Villanueva-López *et al.* 2015, Beckert *et al.* 2016, Aryal *et al.* 2018, Valenzuela-Que *et al.* 2022) han demostrado que la presencia del componente arbóreo en sistemas ganaderos con prácticas SSP y sistemas agroforestales, tienen un gran potencial de secuestro de C en comparación con los sistemas ganaderos en MP. De igual manera, Osei *et al.* (2017) y Aryal *et al.* (2019)



señalan que en los SSP existen dos impulsores principales que propician el almacenamiento de COS y que se relacionan con la presencia del componente arbóreo, el aporte de C de las raíces de los árboles y la caída de la hojarasca. Según estos autores, en los SSP existe una mayor descomposición del C en comparación con sistemas ganaderos basados en MP debido a que los árboles tienen un sistema radical más grande y grueso y que con facilidad logran alcanzar una mayor profundidad incorporando material orgánico al suelo. En otros estudios también han evidenciado que los suelos vertisoles como los encontrados en nuestra área de estudio, tienen una alta capacidad de almacenar COS debido a sus características y al tamaño de las partículas (limo y arcilla) que propician una mayor acumulación de COS en las capas más profundas del suelo y que mientras aumenta el contenido de arcilla, aumenta la capacidad de almacenar COS (Lakaria *et al.* 2012, Mathieu *et al.* 2015, Beckert *et al.* 2016, Mendoza-Vega *et al.* 2021, Choudhury 2023).

**Propiedades físicas y químicas de los suelos en sistemas ganaderos.** Los resultados mostraron diferencias significativas para las variables de pH ( $H = 25.78$ ,  $P = 0.0001$ ), DA ( $H = 22.11$ ,  $P = 0.0001$ ), N ( $H = 25.15$ ,  $P = 0.0001$ ) y relación C/N ( $H = 24.24$ ,  $P = 0.0001$ ), mientras que para las variables % MO ( $H = 1.66$ ,  $P = 0.435$ ) y % C no hubo diferencias ( $H = 1.66$ ,  $P = 0.435$ ) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Propiedades físicas y químicas de los suelos en sistemas ganaderos en Centro, Tabasco.

Parámetros	Sistema ganadero		
	MP	ADP	CV
pH	4.12 ± 0.04 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.09 <sup>b</sup>	4.92 ± 0.12 <sup>a</sup>
DA (g cm <sup>3</sup> )	1.40 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.26 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.28 ± 0.02 <sup>b</sup>
MO (%)	1.02 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.24 ± 0.09 <sup>a</sup>	1.27 ± 0.13 <sup>a</sup>
C (%)	0.59 ± 0.09 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.1 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.11 <sup>a</sup>
N (%)	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>b</sup>
Relación C/N	3.77 ± 0.35 <sup>c</sup>	5.20 ± 0.5 <sup>b</sup>	7.91 ± 0.6 <sup>a</sup>
Textura	Franco arcillosos	Franco arcillosos	Franco arcillosos

Medias y error estándar ( $\pm$ ) con una letra común entre filas no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). MP: monocultivo de pastos, ADP: árboles dispersos en potreros, CV: cercas vivas, DA: densidad aparente, MO: materia orgánica, C: carbono, N: nitrógeno.

A pesar de que los valores de pH en los sistemas ganaderos con CV fueron mayores que en los sistemas ganaderos con ADP y en MP (4.92, 4.25 y 4.12, respectivamente), son clasificados fuertemente ácidos en los tres sistemas (SEMARNAT 2000). Nuestros resultados son similares a los reportados por Vásquez *et al.* (2021) quienes reportaron valores de 4.37 y 4.09 en SSP, lo que indica que la presencia del componente arbóreo en SSP juega un papel fundamental en la regulación del pH, atribuido a la descomposición de hojarascas y a otros procesos que ocurren en la matriz del suelo, sin embargo, valores por debajo del 2% de MO, tiene un efecto significativo en la disminución del pH (Cruz-Macías *et al.* 2020, Polanía-Hincapié *et al.* 2021, Xu *et al.* 2021). Otro factor que provoca la acidificación de los suelos en zonas tropicales es la frecuencia en la que ocurren las lluvias, característica primordial de la zona en estudio, esto acompañado de la baja disponibilidad de bases intercambiables ( $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ) que provocan la acidificación de los suelos (Osorio 2012).

Con respecto a la DA, esta fue significativamente mayor en los sistemas ganaderos en MP en relación a los sistemas ganaderos con CV y con ADP (1.4, 1.28 y 1.26  $\text{g cm}^{-3}$ , respectivamente) (Tabla 4), y son similares a los valores de 1.15 y 1.3  $\text{g cm}^{-3}$  reportados por Valenzuela-Que *et al.* (2022) y Villanueva-López *et al.* (2015) para sistemas ganaderos con ADP y con CV respectivamente. Lo anterior, significa que los suelos en los sistemas ganaderos en MP son más compactos que los sistemas ganaderos con CV y ADP. Estos valores más altos de DA están correlacionados con los menores contenidos de MO, relación C/N, y al suelo (textura franco-arcillosa) (Tabla 4) que afectan considerablemente las estimaciones de COS (Villanueva-López *et al.* 2015, Morales Ruiz *et al.* 2021, Valenzuela-Que *et al.* 2022). Mientras que los valores más bajos de DA en los sistemas ganaderos con CV y ADP probablemente se debieron a la estrecha relación entre la combinación de árboles y pastos en los arreglos SSP marcando un efecto positivo en la reducción de la compactación del suelo en sistemas ganaderos (Polanía-Hincapié *et al.* 2021) y que la contribución de la descomposición de raíces y de todo el material orgánico depositado sobre el suelo influye considerablemente en valores bajos de DA (Suzuki *et al.* 2022).

La MO fue considerablemente mayor en los sistemas ganaderos con ADP y CV con respecto a los sistemas ganaderos en MP (1.24 %, 1.27 % y 1.02 % respectivamente) (Tabla 4). El mayor contenido de MO en los sistemas ganaderos con ADP y CV probablemente se deba a la presencia del componente arbóreo. Esto es consistente con lo reportado por Villanueva-López *et al.* (2015) y Poudel *et al.* (2022) quienes señalan que el componente arbóreo en sistemas ganaderos influye considerablemente en el aumento de MO, respecto a sitios basados en el MP (de Souza Almeida *et al.* 2021). De igual manera, Vásquez *et al.* (2021) también han reportado mayores contenidos de MO (6.74 %) en SSP.

El % C del suelo entre sistemas ganaderos no mostró diferencias significativas, sin embargo, fue ligeramente mayor en los sistemas ganaderos con ADP y CV que en MP (Tabla 4). Estos valores son similares a los aportados por Morales-Ruiz *et al.* (2021) y Valenzuela-Que *et al.* (2022), quienes muestran que los sistemas ganaderos con ADP y CV presentan un % C más altos que los sistemas ganaderos en MP, atribuido a la caída de hojarasca, lo que constituye una entrada más de C por su proceso de descomposición y reciclaje de nutrientes en el suelo. No obstante, el % C en el suelo también puede variar respecto a las prácticas de manejo y uso de suelo (Schmidt *et al.* 2011, Lozano-García y Parras-Alcántara 2014). Nuestros resultados coinciden con lo reportado por López-Santiago *et al.* (2019) quienes reportaron que los porcentajes más altos de % C también fueron mayores en bosques tropicales (3.7 %) que en MP (3.1 %). Según López-Santiago *et al.* (2019) y Morales-Ruiz *et al.* (2021) esto puede atribuirse al recambio de raíces finas en el suelo que contribuye a un aumento del contenido de C, mejorando así el almacenamiento de COS.

Para el caso del N los resultados muestran que los sistemas ganaderos en MP y con ADP presentan diferencias respecto al sistema ganadero con CV, siendo este último sistema el de menor contenido de N en el suelo (Tabla 4). En el sistema ganadero con ADP pudiera atribuirse a la alta densidad de la especie *H. campechianum*, la cual es una leguminosa que contribuye a mayores contenidos de N en el suelo, derivado del proceso de simbiosis con bacterias que forman nódulos en las raíces, sumado que además de la translocación del N que existe en la biomasa aérea y que al caer la hojarasca se fija a suelo (Dawud *et al.*

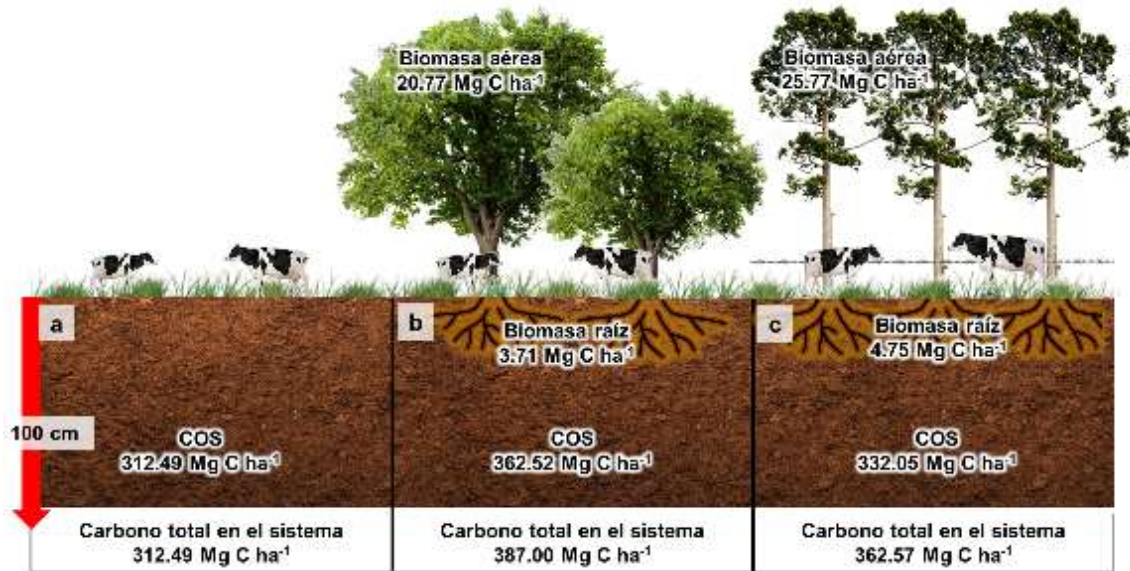
2016, Don-Gil y Isaac 2022). Sin embargo en MP, los niveles de N en el suelo son atribuidos al pastoreo extensivo de la zona, esto a razón de que el componente animal en su ingesta de pastos ocasiona la muerte rápida de las raíces y acelera su descomposición, permitiendo un rebrote, que aumenta la densidad de raíces producidas, estimulando la mineralización del N, esto ocasionado por los exudados y a la actividad de los microorganismos en el suelo (Pandey *et al.* 2010, An y Li 2015)

La relación C/N entre sistemas ganaderos mostró diferencias significativas, siendo ligeramente mayor en los sistemas ganaderos con ADP y CV que en MP (Tabla 4) (Tabla 5). La mayor relación C/N en los sistemas ganaderos con ADP en esta investigación, podría estar relacionada con la presencia de *H. campechianum* una especie leguminosa característica de la zona de estudio. Esto es consistente con lo reportado por Dawud *et al.* (2016), quien señaló que la relación C/N se ve influenciada por el componente arbóreo. Además, estos mismos autores reportaron que en bosques y suelos forestales con alta diversidad la relación C/N es mayor, similar a lo que ocurre en CV, en donde existe una mayor diversidad de especies arbóreas, que por la acción de la deposición de N atmosférico y la fijación de N, más aún cuando las especies son leguminosas. Mientras que, la disminución de la relación C/N del suelo está relacionada con el aumento del contenido de partículas de arcillas debido a la retención y conversión microbiana del C orgánico (Schneider *et al.* 2021). Cabe destacar que bosques y pastizales donde se registran valores de pH del suelo extremadamente ácidos, están fuertemente relacionados con valores bajos de relación C/N, debido a variables climáticas que afectan la actividad de los microorganismos y la baja disponibilidad de bases intercambiables (Rowe *et al.* 2006, Osorio 2012).

**Almacenamiento de C total en sistemas ganaderos del trópico húmedo.** Los resultados muestran que los sistemas ganaderos con la presencia del componente arboreo (ADP y CV) almacenan a nivel de sistema (C biomasa aérea + C biomasa de raíces + COS) la mayor cantidad de C total, comparados con aquellos sitios basados en el MP (Figura 3), esto debido al aporte sustancial de la caída de hojarasca, lo cual se ve reflejado en un aporte significativo de materia orgánica, que facilita un mayor contenido de COS (Valenzuela

Que-*et al.* 2022). Se ha reportado que especies arbóreas leguminosas tienen la capacidad de mejorar los niveles de MO en el suelo, debido a la capacidad de fijación de N atmosférico (Munroe e Isaac 2014). El cual es consistente con nuestra investigación, en donde los ADP tuvieron los valores más altos de C a nivel de sistema, el cual lo podemos atribuir a la dominancia de *H. campechianum* en los sitios de estudio y de otras características funcionales (tamaño de los árboles, área basal y diámetro del tallo, entre otros) en CV, que permiten una mayor capacidad de asimilación de la MO, ya que favorece y aumenta la actividad de los microorganismos del suelo, que se ve reflejado en un aumento de COS (Aryal *et al.* 2018). Existe una relación con respecto a las variables de pH y MO a quienes se les atribuyen que favorecen el almacenamiento de C, esto pudiera estar atribuido al recambio de raíces, a la deposición del desecho de los animales en pastoreo y a la descomposición de los residuos de pastos sobre el suelo que regulan las variables antes mencionadas (Tabla 5). Del mismo modo la producción de raíces y su descomposición en MP son fuentes de MO que favorece el contenido de C en el suelo y a su acumulación, adicionalmente el desecho animal que ingresa al suelo tiene un aporte sustancial al sistema (Morales-Ruiz *et al.* 2021)

El COS representa en los sistemas ganaderos con ADP el 93.67 % del C total para el sistema, mientras que, en los sistemas ganaderos con CV, el 91.58 %; la biomasa del componente arbóreo aporta 6.33 % y 8.42 % en ADP y CV respectivamente. Estos resultados son similares a lo reportado por Villanueva-López *et al.* (2015) y Aryal *et al.* (2018) quienes en SSP en Tabasco, y Chiapas encontraron que el reservorio suelo aporta el más del 90 % del total de C, mientras que la biomasa aporta el 6.7 %.



**Figura 3.** Almacenamiento de carbono total (Mg C ha<sup>-1</sup>) en sistemas ganaderos a) monocultivo de pastos, b) árboles dispersos en potreros y c) cercas vivas

**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de Spearman entre el COS y las propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas ganaderos en Centro, Tabasco.

Sistema ganadero	Variables	Coefficiente de correlación (rho)	P-valor
<b>Monocultivo de pastos</b>	pH	0.238	0.206 <sup>ns</sup>
	DA	-0.023	0.905 <sup>ns</sup>
	%MO	0.075	0.695 <sup>ns</sup>
	%C	0.075	0.695 <sup>ns</sup>
	%N	0.072	0.707 <sup>ns</sup>
	Relación C/N	0.035	0.854 <sup>ns</sup>
<b>Árboles dispersos en potreros</b>	pH	0.075	0.692 <sup>ns</sup>
	DA	0.520	0.003 <sup>*</sup>
	%MO	0.010	0.960 <sup>ns</sup>
	%C	0.010	0.960 <sup>ns</sup>
	%N	0.328	0.077 <sup>ns</sup>
	Relación C/N	-0.403	0.027 <sup>*</sup>
<b>Cercas vivas</b>	pH	-0.327	0.078 <sup>ns</sup>
	DA	0.087	0.649 <sup>ns</sup>
	%MO	0.126	0.507 <sup>ns</sup>
	%C	0.126	0.507 <sup>ns</sup>
	%N	0.004	0.983 <sup>ns</sup>
	Relación C/N	0.226	0.229 <sup>ns</sup>

\*Significativa (<0.05), ns: no significativo. DA: densidad aparente, MO: materia orgánica, C: carbono, N: nitrógeno.

El análisis de correlación entre el COS almacenado y las propiedades físicas y químicas del suelo mostró que en ADP existe una relación positiva entre las variables DA, MO, N y relación C/N que contribuyen a mejorar las reservas de C en el suelo, y que estas pudieran ser atribuidas a la presencia del componente arbóreo (Tabla 5). De igual manera, la mayor cantidad de C almacenado en los sistemas ganaderos con ADP y CV, es debido a la presencia del componente arbóreo y a la caída de hojarasca, que contribuyen a un mejor contenido de C en el suelo (Villanueva-López *et al.* 2015, Valenzuela Que *et al.* 2022). Al respecto, Aryal *et al.* (2018) señalan que el almacenamiento de C a nivel de sistema llega a ser de hasta 144.45 Mg C ha<sup>-1</sup> cuando existe una mayor diversidad y densidad de árboles. Otros estudios en SSP y remanentes de bosques tropicales de Michoacán, alcanzan valores altos (120.7 y 120.9 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente) en comparación con los alcanzados en MP (78.2 Mg C ha<sup>-1</sup>) (López-Santiago *et al.* 2019).

Nuestros hallazgos y los diversos estudios citados indican que la combinación entre el componente arbóreo y los forrajes en SSP es una vía prometedora respecto a los almacenes de C en los sistemas ganaderos, además de favorecer la preservación de la biodiversidad. Por ello, es importante promover con los productores ganaderos la importancia de adoptar SSP que, de manera conjunta con el uso y manejo de la tierra, sean una estrategia para el desarrollo de una ganadería sostenible, resiliente, competitiva y de bajas emisiones GEI, además de proveer de bienes y servicios que, a mediano plazo, eleven la calidad de vida.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados de este estudio muestran que los sistemas ganaderos con ADP almacenaron la mayor cantidad de C seguido de los sistemas ganaderos con CV y en MP. La mayor cantidad de C se almacenó en el suelo, seguido del componente arbóreo, en este último componente el C logra acumularse en la biomasa aérea y, en menor medida en la raíz. Además, del aporte sustancial de la diversidad de especies en el almacenamiento de C total en el sistema, este también estuvo fuertemente influenciado por el tipo de suelo vertisol, probablemente por su alto contenido de arcillas que muestran una alta capacidad para almacenar

COS en sistemas ganaderos del trópico húmedo. Asimismo, la profundidad de muestreo del suelo hasta los 100 cm fue un factor que influyó considerablemente en la determinación del almacenamiento de total de C directamente relacionada con el contenido de arcillas, lo que favoreció una mayor acumulación de C. Finalmente, las propiedades físicas y químicas del suelo fueron mejores en los sistemas ganaderos con ADP y CV atribuido a la presencia del componente arbóreo que mejoraron considerablemente el pH, DA, MO y el contenido de C, particularmente el mayor aporte de N en ADP se debió a la dominancia de la especie *H. campechianum*, una importante leguminosa, que fija cantidades significantes de N al suelo. Esto refuerza la necesidad de implementar prácticas silvopastoriles en sitios basados en el MP, como la inclusión de leguminosas y especies de gramíneas que propicien una mejora del almacenamiento de C.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada al primer autor con número de apoyo 788842, durante sus estudios de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural en El Colegio de la Frontera Sur, al Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas del TecNM campus IT Zona Maya. Un reconocimiento al grupo de productores que pertenecen al programa sembrando vida y a los becarios de jóvenes construyendo el futuro (Matillas-Ismate) y en especial al técnico social el M. en C. José Javier Isidro Hernández por su amable y generosa disposición a colaborar en el desarrollo de comunidades sustentables.



## LITERATURA CITADA

- An H, Li G (2015) Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. *Journal of Arid Land*, 7(3), 341–349. <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0049-x>
- Aryal DR, Gómez-González RR, Hernández-Nuriasmú R, Morales-Ruiz DE (2019) Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93(1), 213–227.
- Aryal DR, Gómez Castro H, Del Carmen García N, José Ruiz O de J, Molina Paniagua LF, Jiménez Trujillo JA, Venegas Venegas JA, Pinto Ruiz R, Ley de Coss A, Guevara Hernández F (2018) Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9: 2-29.
- Beckert MR, Smith P, Lilly A, Chapman SJ (2016) Soil and tree biomass carbon sequestration potential of silvopastoral and woodland-pasture systems in Northeast Scotland. *Agroforestry Systems*, 90: 371–383.
- Bojko O, Kabala C, Mendyk Ł, Markiewicz M, Pagacz-Kostrzewa M, Głina B (2017) Labile and stabile soil organic carbon fractions in surface horizons of mountain soils – relationships with vegetation and altitude. *Journal of Mountain Science*, 14(12), 2391–2405.
- Cairns M, Brown S, Helmer E, Baumgardner G (1997) Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111: 1–11.
- Cárdenas A, Moliner A, Hontoria C, Ibrahim, M (2019) Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforestry Systems*, 93: 229–239.
- Cardinael R, Chevallier T, Cambou A, Béral C, Barthès BG, Dupraz C, Durand C, Kouakoua E, Chenu C (2017) Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236: 243–255.
- Caro D, Davis SJ, Bastianoni S, Caldeira K (2014) Global and regional trends in greenhouse gas emissions from livestock. *Climatic Change*, 126: 203–216.
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, Henry M, Martínez-Yrizar A, Mugasha WA, Muller-Landau HC, Mencuccini M,

- Nelson BW, Ngomanda A, Nogueira EM, Ortiz-Malavassi E, ... Vieilledent G (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20: 3177–3190.
- Choudhury BU (2023) Controls on vertical distribution of organic carbon in the intermontane valley soils (Barak, Northeast India). *Soil and Tillage Research*, 225: 1-10.
- Cristóbal-Acevedo D, Hernández-Acosta E, Maldonado-Torres R, Álvarez-Sánchez ME (2015) Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana*, 33: 199–208.
- Cruz-Macías W O, Rodríguez-Larramendi L A, Salas-Marina MÁ, Hernández-García V, Campos-Saldaña R A, Chávez-Hernández M H, Gordillo-Curiel A (2020) Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(3), 475–480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Dawud SM, Raulund-Rasmussen K, Domisch T, Finér L, Jaroszewicz, B, Vesterdal L (2016) Is Tree Species Diversity or Species Identity the More Important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH? *Ecosystems*, 19: 645–660.
- de Souza Almeida LL, Frazão L A, Lessa, TAM, Fernandes LA, de Carvalho Veloso ÁL, Lana AMQ, de Souza, I A, Pegoraro RF, Ferreira E A (2021) Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, 205, 104785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
- Díaz-Romeu R, Hunter A (1982) Metodología de muestra de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Serie Materiales de Enseñanza N 12, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 61 págs. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11554/3115>
- Ferreiro-Domínguez N, Palma JHN, Paulo JA, Rigueiro-Rodríguez A, Mosquera-Losada MR (2022) Assessment of soil carbon storage in three land use types of a semi-arid ecosystem in South Portugal. *Catena*, 213: 1-10.
- Havlík P, Valin H, Herrero M, Obersteiner M, Schmid E, Rufino MC, Mosnier A, Thornton PK, Böttcher H, Conant RT, Frank S, Fritz S, Fuss S, Kraxner F, Notenbaert A (2014) Climate change mitigation

- through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 3709–3714.
- Hobley E, Wilson B, Wilkie A, Gray J, Koen T (2015) Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. *Plant and Soil*, 390(1–2), 111–127.
- Houghton RA, Nassikas AA (2017) Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 31: 456–472.
- Huamán-Carrión ML, Espinoza-Montes F, Barrial-Lujan AI, Ponce-Atencio Y (2021) Influence of altitude and soil characteristics on organic carbon storage capacity of high Andean natural pastures. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83–90.
- INEGI (2018) Marco geostadístico nacional: aspectos geográficos, Tabasco. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen\\_27.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_27.pdf)
- Don-Gil K, Isaac ME (2022) Nitrogen dynamics in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42: 1-18.
- Kauffman JB, Beschta RL, Lacy PM, Liverman M (2022) Livestock Use on Public Lands in the Western USA Exacerbates Climate Change: Implications for Climate Change Mitigation and Adaptation. *Environmental Management*, 69(6), 1137–1152.
- Laborde D, Mamun A, Martin W, Piñeiro V, Vos R (2021) Agricultural subsidies and global greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 12: 1-9.
- Lakaria BL, Singh M, Sammi Reddy K, Biswas AK, Jha P, Chaudhary RS, Singh AB, Subba Rao A (2012) Carbon addition and storage under integrated nutrient management in soybean–wheat cropping sequence in a vertisol of Central India. *National Academy Science Letters*, 35: 131–137.
- Lemes AP, García AR, Pezzopane JRM, Brandão FZ, Watanabe YF, Cooke RF, Sponchiado M, de Paz CCP, Camplesi AC, Binelli M, Gimenes LU (2021) Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. *Scientific Reports*, 11: 1-17.
- 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: 199–211.
- Lozano-García B, Parras-Alcántara L (2014) Variation in soil organic carbon and nitrogen stocks along a toposequence in a traditional mediterranean olive grove. *Land Degradation & Development*, 25: 297–304.
- Mathieu JA, Hatté C, Balesdent J, Parent É (2015) Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: a worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Global Change Biology*, 21: 4278–4292.
- Mendoza-Vega J, Messing I, Ku-Quej VM, Pool-Novelo L, Chi-Quej J (2021) Land evaluation and carbon flux estimation to reinforce natural protected areas: a case study in Southern Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 80: 1-17.
- Morales-Ruiz DE, Aryal DR, Pinto Ruiz R, Guevara Hernández F, Casanova Lugo F, Villanueva López G (2021) Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation and Development*, 32: 738–756.
- Munroe JW, Isaac ME (2014) N<sub>2</sub>-fixing trees and the transfer of fixed-N for sustainable agroforestry: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 417–427. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0190-5>
- Osei AK, Kimaro AA, Peak D, Gillespie AW, Van Rees KCJ (2017) Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. *Agroforestry Systems*. 92: 251-262.
- Osorio NW (2012) pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 4–7.
- Palma-López DJ, Jiménez Ramírez R, Zavala-Cruz J, Bautista-Zúñiga F, Reyes Gavi F, Palma-Cancino YF (2018) Updating the classification of soils in Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/33/27>
- Pandey CB, Singh GB, Singh SK, Singh RK (2010) Soil nitrogen and microbial biomass carbon dynamics in native forests and derived agricultural land uses in a humid tropical climate of India. *Plant and Soil*, 333(1–2), 453–467. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0362-x>

- Polanía-Hincapié KL, Olaya-Montes A, Cherubin MR, Herrera-Valencia W, Ortiz-Morea FA, Silva-Olaya AM (2021) Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 386: 1-10.
- Poudel S, Bansal S, Podder S, Paneru B, Karki S, Fike J, Kumar S (2022) Conversion of open pasture to hardwood silvopasture enhanced soil health of an ultisol. *Agroforestry Systems*. 96: 1237-1247.
- Sales-Baptista E, Ferraz-de-Oliveira MI (2021) Grazing in silvopastoral systems: multiple solutions for diversified benefits. *Agroforestry Systems*, 95: 1–6.
- Schmidt MWI, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning DAC, Nannipieri P, Rasse DP, Weiner S, Trumbore SE (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Schmitt Harsh M, Evans TP, Castellanos E, Randolph, JC (2012) Carbon stocks in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agroforestry Systems*, 86: 141–157.
- Schneider F, Amelung W, Don A (2021) Origin of carbon in agricultural soil profiles deduced from depth gradients of C:N ratios, carbon fractions,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values. *Plant and Soil*, 460: 123–148.
- SEMARNAT (2000) NOM - 021, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de La Federación.
- Steinfeld H, Wassenaar T (2007) The Role of Livestock Production in Carbon and Nitrogen Cycles. *Annual Review of Environment and Resources*, 32: 271–294.
- Silván-Hernández O, De la Cruz-Burelo F, Macías-Valadez M, Pampillón-González L (2017) Theoretical and technical biomass resource assessment from swine and cattle manure in Tabasco: A case study in southeast Mexico. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 83–92.
- Suzuki LEAS, Reinert DJ, Fenner PT, Secco D, Reichert JM (2022) Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density. *Journal of South American Earth Sciences*, 120: 1-10.

- Valenzuela-Que FG, Villanueva-López G, Alcudia-Aguilar A, Medrano-Pérez OR, Cámara-Cabrales L, Martínez-Zurimendi P, Casanova-Lugo F, Aryal DR (2022) Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. *Soil Use and Management*, 38: 1237–1249.
- Vásquez HV, Valqui L, Bobadilla LG, Arbizu CI, Alegre JC, Maicelo JL (2021) Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon*, 7: 1–7.
- Villanueva-López G, Martínez-Zurimendi P, Casanova-Lugo F, Ramírez-Avilés L, Montañez-Escalante PI (2015) Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry Systems*, 89: 1083–1096.
- Villanueva-López G, Lara-Pérez LA, Oros-Ortega I, Ramírez-Barajas PJ, Casanova-Lugo F, Ramos-Reyes R, Aryal DR (2019) Diversity of soil macro-arthropods correlates to the richness of plant species in traditional agroforestry systems in the humid tropics of Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286, 106658.
- Wang C, Li X, Hu Y, Zheng R, Hou Y (2023) Nitrogen addition weakens the biodiversity multifunctionality relationships across soil profiles in a grassland assemblage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342: 1–9.
- Xu T, Zhang M, Ding S, Liu B, Chang Q, Zhao X, Wang Y, Wang J, Wang L (2021) Grassland degradation with saline-alkaline reduces more soil inorganic carbon than soil organic carbon storage. *Ecological Indicators*, 131: 1-8.
- Zanne AE, López-González G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J (2009) Global Wood Density Database. Dryad Digital Repository. Dryad, Dataset. 12: 351-366.

### **Capítulo 3. Conclusión**

Los resultados de este estudio muestran que los sistemas silvopastoriles con árboles dispersos en potreros, seguido por los sistemas con cercas vivas almacenaron la mayor cantidad de carbono total. Además de almacenar cantidades importantes de carbono, mejoraron favorablemente las propiedades físicas y químicas del suelo en comparación con aquellos sistemas ganaderos basados en el monocultivo de pastos.

Tales diferencias se atribuyen al aporte sustancial de la cantidad de biomasa del componente arbóreo; y a la caída de hojarasca al suelo y la descomposición de raíces que contribuyen a un mejor contenido de carbono en el suelo. De este modo la biomasa del componente arbóreo en ADP y CV contribuyen en el total de C del sistema con el 6.33 % y 8.42 % respectivamente. Por otra parte, en los tres sistemas ganaderos evaluados, el suelo es el reservorio que aporta la mayor cantidad de carbono al sistema (>90 %). Además de que las características físicas y químicas del suelo influyen considerablemente en la distribución vertical del COS, favoreciendo así su acumulación en las capas más profundas del suelo y que la diversidad y dimensiones de los árboles presentes en los sistemas silvopastoriles con árboles dispersos en potreros y cercas vivas tienen un alto potencial para almacenar grandes cantidades de carbono y que de esto dependerá el aporte sustancial de C al sistema de parte del componente arbóreo.

Lo anterior, evidencia que los sistemas silvopastoriles además de contribuir al desarrollo de una ganadería más sostenible son una opción que contribuye para mitigar los efectos del cambio climático. Sin embargo, dada la preocupación a nivel mundial sobre este fenómeno, es necesario continuar monitoreando los almacenes de C en los sistemas ganaderos que cuenten con la presencia del componente arbóreo, ya que estos esfuerzos nos permitirán generar información para tener un panorama más claro sobre las estrategias que podrían seguir siendo útiles con el paso de los años, y con alto potencial de adaptación y mitigación al cambio climático.

## Literatura citada

Abdalla M, Hastings A, Chadwick DR, Jones DL, Evans CD, Jones MB, Rees RM, Smith P. 2018. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agric Ecosyst Environ.* 253:62–81. doi:10.1016/j.agee.2017.10.023.

Arcos-Navarro G. 2007. Calentamiento global. *CienciaUAT.* 2(2):10–14. <https://revistaciencia.uat.edu.mx/index.php/CienciaUAT/article/view/443>.

Aryal DR. 2022. Grazing intensity in grassland ecosystems: implications for carbon storage and functional properties. *CABI Rev.* 2022. doi:10.1079/cabireviews202217032.

Aryal DR, Gómez-González RR, Hernández-Nuriasmú R, Morales-Ruiz DE. 2019. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agrofor Syst.* 93(1):213–227. doi:10.1007/s10457-018-0310-y.

Aryal DR, Gómez Castro H, Del Carmen García N, José Ruiz O de J, Molina Paniagua LF, Jiménez Trujillo JA, Venegas Venegas JA, Pinto Ruiz R, Ley de Coss A, Guevara Hernández F. 2018. Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Rev Mex Ciencias For.* 9(48). doi:10.29298/rmcf.v8i48.184.

Beach RH, Creason J, Ohrel SB, Ragnauth S, Ogle S, Li C, Ingraham P, Salas W. 2015. Global mitigation potential and costs of reducing agricultural non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions through 2030. *J Integr Environ Sci.* 12(sup1):87–105. doi:10.1080/1943815X.2015.1110183.

Brewer KM, Gaudin ACM. 2020. Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. *Soil Biol Biochem.* 149:107936. doi:10.1016/J.SOILBIO.2020.107936.

Contreras-Santos JL, Martínez-Atencia J, Raghavan B, López-Rebolledo L, Garrido-Pineda J. 2021. Sistemas silvopastoriles: mitigación de gases de efecto invernadero, bosque seco tropical - Colombia. *Agron Mesoam.* doi:10.15517/am.v32i3.43313.



Enriquez AS, Chimner RA, Cremona MV, Diehl P, Bonvissuto GL. 2015. Grazing intensity levels influence C reservoirs of wet and mesic meadows along a precipitation gradient in Northern Patagonia. *Wetl Ecol Manag.* 23(3):439–451. doi:10.1007/s11273-014-9393-z.

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? *Agric Ecosyst Environ.* 254:117–129. doi:10.1016/j.agee.2017.11.032.

Ferreiro-Domínguez N, Palma JHN, Paulo JA, Rigueiro-Rodríguez A, Mosquera-Losada MR. 2022. Assessment of soil carbon storage in three land use types of a semi-arid ecosystem in South Portugal. *Catena.* 213(March):106196. doi:10.1016/j.catena.2022.106196.

Ferreiro-Domínguez N, Rigueiro-Rodríguez A, Rial-Lovera KE, Romero-Franco R, Mosquera-Losada MR. 2016. Effect of grazing on carbon sequestration and tree growth that is developed in a silvopastoral system under wild cherry (*Prunus avium* L.). *Catena.* 142:11–20. doi:10.1016/j.catena.2016.02.002.

Fornara DA, Olave R, Burgess P, Delmer A, Upson M, McAdam J. 2018. Land use change and soil carbon pools: evidence from a long-term silvopastoral experiment. *Agrofor Syst.* 92(4):1035–1046. doi:10.1007/s10457-017-0124-3. <http://link.springer.com/10.1007/s10457-017-0124-3>.

Hoosbeek MR, Remme RP, Rusch GM. 2018. Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua. *Agrofor Syst.* 92(2):263–273. doi:10.1007/s10457-016-0049-2.

Kolb M, Galicia L. 2018. Scenarios and story lines: drivers of land use change in southern Mexico. *Environ Dev Sustain.* 20(2):681–702. doi:10.1007/s10668-016-9905-5.

Laborde D, Mamun A, Martin W, Piñeiro V, Vos R. 2021. Agricultural subsidies and global greenhouse gas emissions. *Nat Commun.* 12(1):2601. doi:10.1038/s41467-021-22703-1.

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. *Agrofor Syst.* 93(1):199–211. doi:10.1007/s10457-018-0259-x.

López-Santiago JG, Villanueva-López G, Casanova-Lugo F, Aryal DR, Pozo-Leyva D. 2023. Livestock systems with scattered trees in paddocks reduce soil CO<sub>2</sub> fluxes compared to grass monoculture in the humid tropics. *Agrofor Syst.* 97(2):209–221. doi:10.1007/s10457-022-00799-8.

Mondragón-Suárez JH, Sandoval-Villalbazo A, Breña-Ramos F. 2019. Calentamiento global: una secuencia didáctica. *Rev Mex Física E.* 65:52–57. doi:10.31349/RevMexFisE.65.52.

Morales-Coutiño TA. 2010. Carbono en sistemas ganaderos en un paisaje de conservación REBIMA Chiapas, México. El Colegio de la Frontera Sur. [https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1459/1/100000016415\\_documento.pdf](https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1459/1/100000016415_documento.pdf).

Morales-Ruiz DE, Aryal DR, Pinto-Ruiz R, Guevara-Hernández F, Casanov-Lugo F, Villanueva-López G. 2021. Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *L Degrad Dev.* 32(2):738–756. doi:10.1002/ldr.3761.

Opendbosch H, Hansson H. 2022. Farmers' willingness to adopt silvopastoral systems: investigating cattle producers' compensation claims and attitudes using a contingent valuation approach. *Agrofor Syst.* doi:10.1007/s10457-022-00793-0.

Pent GJ. 2020. Over-yielding in temperate silvopastures: a meta-analysis. *Agrofor Syst.* 94(5):1741–1758. doi:10.1007/s10457-020-00494-6.

Power G. 2009. Calidad y medio ambiente. *Ing Ind.* 27(28):101–122.

Pozo-Leyva D, López-González F, Olea-Pérez R, Balderas-Hernández P, Arriaga-Jordán CM. 2019. Nitrogen utilisation efficiency in small-scale dairy systems in the highlands of Central Mexico. *Trop Anim Health Prod.* 51(5):1215–1223. doi:10.1007/s11250-019-01812-6.

Segura-Castruita MA, Sánchez-Guzmán P, Ortiz-Solorio CA, Del Carmen Gutiérrez-Castorena M. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Publ en Terra Latinoam*. 23:21–28. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57323103.pdf>.

Silver WL, Ostertag R, Lugo AE. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restor Ecol*. 8(4):394–407. doi:10.1046/j.1526-100X.2000.80054.x.

Soares MB, Freddi O da S, Matos E da S, Tavanti RFR, Wruck FJ, de Lima JP, Marchioro V, Franchini JC. 2020. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. *Catena*. 185(November 2019):104279. doi:10.1016/j.catena.2019.104279.

Terrer C, Phillips RP, Hungate BA, Rosende J, Pett-Ridge J, Craig ME, van Groenigen KJ, Keenan TF, Sulman BN, Stocker BD, et al. 2021. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub>. *Nature*. 591(7851):599–603. doi:10.1038/s41586-021-03306-8.

Utsumi N, Kim H. 2022. Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall. *Nat Clim Chang*. 12(5):436–440. doi:10.1038/s41558-022-01344-2.

Valenzuela-Que FG, Villanueva-López G, Alcudia-Aguilar A, Medrano-Pérez OR, Cámara-Cabrales L, Martínez-Zurimendi P, Casanova-Lugo F, Aryal DR. 2022. Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. *Soil Use Manag*. 38(2):1237–1249. doi:10.1111/sum.12799.

Veldkamp E, Schmidt M, Powers JS, Corre MD. 2020. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nat Rev Earth Environ*. 1(11):590–605. doi:10.1038/s43017-020-0091-5.

Villanueva-López G, Martínez-Zurimendi P, Casanova-Lugo F, Ramírez-Avilés L, Montañez-Escalante PI. 2015. Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agrofor Syst*. 89(6):1083–1096.

doi:10.1007/s10457-015-9836-4.

Yang Y, Tilman D, Furey G, Lehman C. 2019. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nat Commun.* 10(1):718. doi:10.1038/s41467-019-08636-w. <http://www.nature.com/articles/s41467-019-08636-w>.

## Anexos

Comprobante de envío de artículo científico:

Artículo enviado a la Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios.

Revista incluida en el catálogo internacional Journal Citation Reports (JCR) – Web of Science 2021.

**RV: [ERA] Acuse de recibo de envío**

**De:** Dr. Efraín de la Cruz Lázaro <editorera1@ujat.mx>

**Enviado:** lunes, 23 de enero de 2023 10:20 p. m.

**Para:** Gilberto Villanueva Lopez <gvillanueva@ecosur.mx>

**Asunto:** [ERA] Acuse de recibo de envío

No suele recibir correos electrónicos de editorera1@ujat.mx. [Por qué esto es importante](#)

Gilberto Villanueva López:

Gracias por enviar el manuscrito "ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA ARBÓREA Y EL SUELO EN SISTEMAS GANADEROS DEL TRÓPICO HÚMEDO: Reservorios de carbono en sistemas ganaderos" a Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://era.ujat.mx/index.php/rera/authorDashboard/submission/3597>

Nombre de usuario/a: gvillanueva69

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro

Ecosistemas y Recursos Agropecuarios <http://era.ujat.mx>



EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR  
ECOSUR

La información en este correo electrónico es confidencial y legalmente puede ser privilegiada. Está dirigida únicamente al destinatario o destinatarios indicados en la cabecera del mismo y nadie más está autorizado a tener acceso a este correo electrónico. Si usted no es el destinatario a quién está dirigida, le está prohibido o puede ser ilícito el copiar, distribuir o tomar