

Influencia del Uso del Suelo y la Profundidad sobre el Contenido de Carbono Orgánico en dos Sistemas de Producción Agropecuaria en el Altiplano Central de México Influence of Land Use and Depth on Organic Carbon Content in Two Agricultural Production Systems in the Central Highlands of Mexico

Tania Guadalupe Osorio-Montor¹ , Octavio A. Castelán-Ortega³ ,
Rodolfo Serrato-Cuevas² , Rolando Rojo-Rubio¹  y Francisca Avilés-Nova^{1†} 

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Temascaltepec. km 67.5, carretera Toluca-Tejupilco, Barrio de Santiago. 51300, Temascaltepec de González, Estado de México, México; (T.G.O.M.), (R.R.R.), (F.A.N).

[†] Autora para correspondencia: franavilesnova@yahoo.com.mx

² Universidad Autónoma del estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas; (R.S.C.). ³ Laboratorio de ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; (O.A.C.O.). El Cerrillo Piedras Blancas, Col. El Cerrillo. 50200, Toluca, Estado de México, México.

RESUMEN

El suelo es importante en la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), ya que actúa como un reservorio de Carbono (C), ofrece protección física a la materia orgánica (MO) y contribuye a la reducción de emisiones asociadas con la menor aplicación de fertilizantes. Sin embargo, la conversión de tierras a uso agropecuario, afectan la capacidad de captura de C orgánico del suelo (COS), lo cual provoca emisiones de GEI. El objetivo del estudio fue evaluar la influencia del uso del suelo y la profundidad sobre el contenido de COS en dos sistemas de producción agropecuaria en México. En los sistemas (S1 y S2) en cada uso del suelo (pastizal P, forestal F, agrícola A) se seleccionaron al azar cuatro puntos de muestreo durante nueve periodos. En cada punto se tomó una submuestra de suelo de 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad, para realizar una muestra compuesta con las 4 submuestras por profundidad. Se determinó el contenido de COS, Densidad Aparente, % humedad y pH. Los resultados del contenido de COS mostraron diferencia significativa entre sistemas ($p = 0.040$) y entre usos del suelo ($p = 0.02$). En el S1, el uso del suelo P presentó un contenido de $87.39 \text{ Mg C ha}^{-1}$, similar al uso A con $87.23 \text{ Mg C ha}^{-1}$, sin embargo, S1F contiene menor COS ($54.27 \text{ Mg C ha}^{-1}$). En el S2, el uso de suelo P presentó mayor contenido de COS con $70.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$, en comparación a los usos S2F ($58.64 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y S2A ($58.24 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Referente al efecto de la profundidad del suelo, existió diferencia significativa ($p < 0.0001$), el contenido promedio de COS en el S1 a 0-10 cm fue de $89.74 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y de 10-20 cm de $62.86 \text{ Mg C ha}^{-1}$, en el S2 el COS a 0-10 cm fue de $75.81 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y de 10-20 cm de $48.07 \text{ Mg C ha}^{-1}$. El mayor contenido de COS en ambos sistemas se presentó de 0-10 cm de profundidad.

Palabras clave: agricultura, COS, forestal, ganadería, gases de efecto invernadero.

SUMMARY

Soil is important in mitigating greenhouse gas (GHG) emissions, as it acts as a carbon (C) reservoir, provides physical protection to organic matter (OM), and contributes to reducing emissions associated with lower fertilizer application. However, land conversion to agricultural use affects the soil's organic carbon (SOC) sequestration capacity, leading to GHG emissions. The objective of this study was to evaluate the influence of land use and depth on SOC content in two agricultural production systems in Mexico. In systems S1 and S2, four sampling points were randomly selected for each land use (pasture P, forest F, and crop A) over nine



Cita recomendada:

Osorio-Montor, T. G., Castelán-Ortega, O. A., Serrato-Cuevas, R., Rojo-Rubio, R., & Avilés-Nova, F. (2026). Influencia del Uso del Suelo y la Profundidad sobre el Contenido de Carbono Orgánico en dos Sistemas de Producción Agropecuaria en el Altiplano Central de México. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-17. e2272. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2272>

Recibido: 10 de abril de 2025.

Aceptado: 17 de abril de 2026.

Artículo. Volumen 44.

Mayo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Alfredo Madariaga Navarrete

Editor Técnico:

Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

periods. At each point, a soil subsample was taken from depths of 0–10 cm and 10–20 cm, and a composite sample was created from the four subsamples per depth. SOC content, bulk density, moisture content, and pH were determined. The results for soil organic carbon (SOC) content showed a significant difference between systems ($p = 0.040$) and between land uses ($p = 0.02$). In S1, land use P presented a content of 87.39 Mg C ha⁻¹, similar to land use A with 87.23 Mg C ha⁻¹; however, S1F contains lower SOC (54.27 Mg C ha⁻¹). In S2, soil use P showed the highest SOC content with 70.44 Mg C ha⁻¹, compared to uses S2F (58.64 Mg C ha⁻¹) and S2A (58.24 Mg C ha⁻¹). Regarding the effect of soil depth, there was a significant difference ($p < 0.0001$). The average SOC content in S1 at 0–10 cm was 89.74 Mg ha⁻¹ and at 10–20 cm was 62.86 Mg C ha⁻¹. In S2, the SOC content at 0–10 cm was 75.81 Mg ha⁻¹ and at 10–20 cm was 48.07 Mg C ha⁻¹. The highest SOC content in both systems was found at a depth of 0–10 cm.

Index words: agriculture, SOC, forestry, livestock, greenhouse gases.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las emisiones antropogénicas netas de gases de efecto invernadero (GEI) fueron de $59 \pm 6,6$ GtCO₂-eq. en 2019, lo que representa un aumento de 54% (21 GtCO₂-eq) más que en 1990 (IPCC, 2022). La concentración de dióxido de carbono (CO₂), uno de los gases de efecto invernadero más abundante, alcanzó el promedio mundial en 2020 de 413.2 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (OMM, 2021). México emitió cerca de 804 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e), lo cual representa aproximadamente el 1.3% de las emisiones globales (BBVA Research, 2021).

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente principal en el ciclo global del C, ocupa 69.8% del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001) y actúa como reservorio de C dependiendo de su uso y manejo (Lal, 1997). El suelo es el principal reservorio de carbono en la biosfera, contiene tres veces más carbono que la vegetación y la atmósfera, este carbono almacenado aporta beneficios para los seres humanos y el medio ambiente. Lo cual es una solución eficaz en función de la adaptación al cambio climático y sus efectos, así mismo, luchar contra la desertificación, degradación de la tierra y la inseguridad alimentaria (FAO, 2022).

Se estima que el uso y cambio del uso del suelo emite 1.3 ± 0.5 petagramos de carbono por año (Pg C año⁻¹), que representa el 8% de las emisiones anuales (Potma *et al.*, 2018). La conversión de ecosistemas naturales a agroecosistemas gestionados crea reducción de las reservas de COS entre un 30% y 50% en 50 años en climas templados, y un 75% en 10 a 25 años en los trópicos (Lal, 2016). La cantidad de COS (Mg C ha⁻¹) es un balance entre las tasas de entrada y salida de este mineral, en el cual intervienen factores interrelacionados como clima, topografía, calidad de material vegetal a degradarse, biota, tiempo de duración de la cobertura vegetal y actividad antropogénica, los cuales controlan procesos que varían de forma temporal y espacial en el suelo (Peri *et al.*, 2022). Del año 1990 a 2015 se registró una pérdida neta de aproximadamente 129 millones de ha⁻¹ de bosque, que representa una tasa anual de pérdida de 0.13%, lo que significa liberación anual de cerca de 546.35 millones de toneladas de carbono por año (FAO y ITPS, 2015). Para revertir este proceso es necesario reducir la tasa de deforestación y promover la captura de CO₂ atmosférico por medio de la vegetación y acumularlo en la biomasa vegetal y el suelo.

En América Latina y el Caribe la producción ganadera emite 18890 Gt CO₂eq (FAO, 2022), el sector agrícola, acompañado de los cambios de uso de la tierra y la deforestación, representa el 47% de las emisiones (GBM, 2022). La superficie forestal (gran sumidero de carbono) es afectada, debido a la búsqueda de extensión de tierra para incrementar el área dedicadas a pastoreo. Esta práctica involucra tala de árboles, pérdida de biodiversidad, disminución en los índices de captura de carbono y degradación del suelo y con el tiempo degradación de la misma pastura (Durango *et al.*, 2017). En el estado de México, el cambio de uso de suelo y el manejo agropecuario han generado alteraciones importantes en las reservas de carbono orgánico, particularmente en zonas forestales y de pastoreo; investigaciones en regiones cercanas han demostrado que los suelos forestales almacenan hasta el doble de COS en comparación con los agrícolas, evidenciando el impacto del uso del suelo sobre este reservorio (Vela, López y Rodríguez, 2012). Asimismo, en el sur del estado, como en Temascaltepec, se ha documentado que

la degradación por sobrepastoreo reduce significativamente la materia orgánica y la calidad del suelo (Avilés-Nova, Valdés y Ríos, 2025). En este contexto, evaluar el COS bajo diferentes usos de suelo permite generar información local clave para la mitigación del cambio climático y la restauración de sistemas productivos.

Teniendo en cuenta las condiciones de manejo de los suelos, su importancia como organismo vivo, mitigante de cambio climático y la necesidad de información que aporte a la mejora de los sistemas agropecuarios del país, el objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del uso de suelo: Pastizal (P), Forestal (F) y Agrícola (A) y la profundidad del suelo: 0-10 cm y 10-20 cm en el contenido de COS en dos sistemas de producción agropecuaria en el municipio de Temascaltepec, edo. México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Temascaltepec, Edo. Méx. En dos sistemas de producción agropecuaria (S1 y S2), S1 "El Tule" y S2 "El Peñón", los cuales se encuentran a 1840 y 1885 m de altitud respectivamente, con clima semi cálido-subhúmedo, precipitación media anual de 1200 mm y temperatura media anual de entre 18 y 20 °C. Los suelos se clasifican como Luvisol para El Tule con vegetación de bosque de coníferas y como Cambisol para El Peñón con vegetación de encino (INEGI, 2024).

Características de los Sistemas

Los sistemas de producción agropecuaria (S1 y S2), presentaron tres usos de suelo: Pastizal (P), Forestal (F) y agrícola (A) (Figura 1).

La vegetación característica y propiedades físicas y químicas de los dos sistemas en cada uso de suelo se muestran en el Cuadro 1 y 2. Las características biofísicas de los sistemas de producción se presentan en el Cuadro 3.

Sitios de Estudio

Los sitios de estudio se identificaron a través de las siguientes nomenclaturas (Cuadro 4).

Muestreo de Suelos y Análisis de Laboratorio

El trabajo de campo se realizó en nueve periodos de muestreo de febrero a diciembre de 2023: M1 febrero, M2 marzo, M3 mayo, M4 junio, M5 julio, M6 agosto, M7 octubre, M8 noviembre y M9 diciembre. Los sitios de muestreo se definieron al realizar recorridos en el área de estudio donde se consideró el uso de suelo y la vegetación característica en cada sistema de producción. Una vez definidos los sitios, en cada uno se excavaron manualmente cuatro calicatas de 50 × 50 × 30 cm, ubicadas al azar. Posteriormente, se recolectaron muestras representativas de cada calicata a diferentes profundidades: 0-10 cm y 10-20 cm, las cuales se homogenizaron para conformar una muestra compuesta por cada profundidad (0-10 y 10-20 cm) de cada uso de suelo de los sistemas de producción. En total se analizaron 54 muestras compuestas para 9 meses de muestreo.

Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de polietileno etiquetadas con los datos del sistema, uso del suelo, profundidad y fecha y se trasladaron al laboratorio de Suelos del Centro Universitario UAEM Temascaltepec. Las muestras de suelo se secaron a la sombra a temperatura ambiente y se tamizaron a través de un tamiz malla #120 antes de analizar sus características físicas y químicas.

El carbono orgánico total se evaluó por el método propuesto por Walkey y Black (1934). Posteriormente, la estimación del C total (%) se determinó a partir de la ecuación 1:

$$\%CO = \left(\frac{(B - T)}{g} \right) * 0.39 \quad (1)$$

Dónde: % CO= C total; B= volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el testigo (ml); T= volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml); g= peso de la muestra empleada (g).

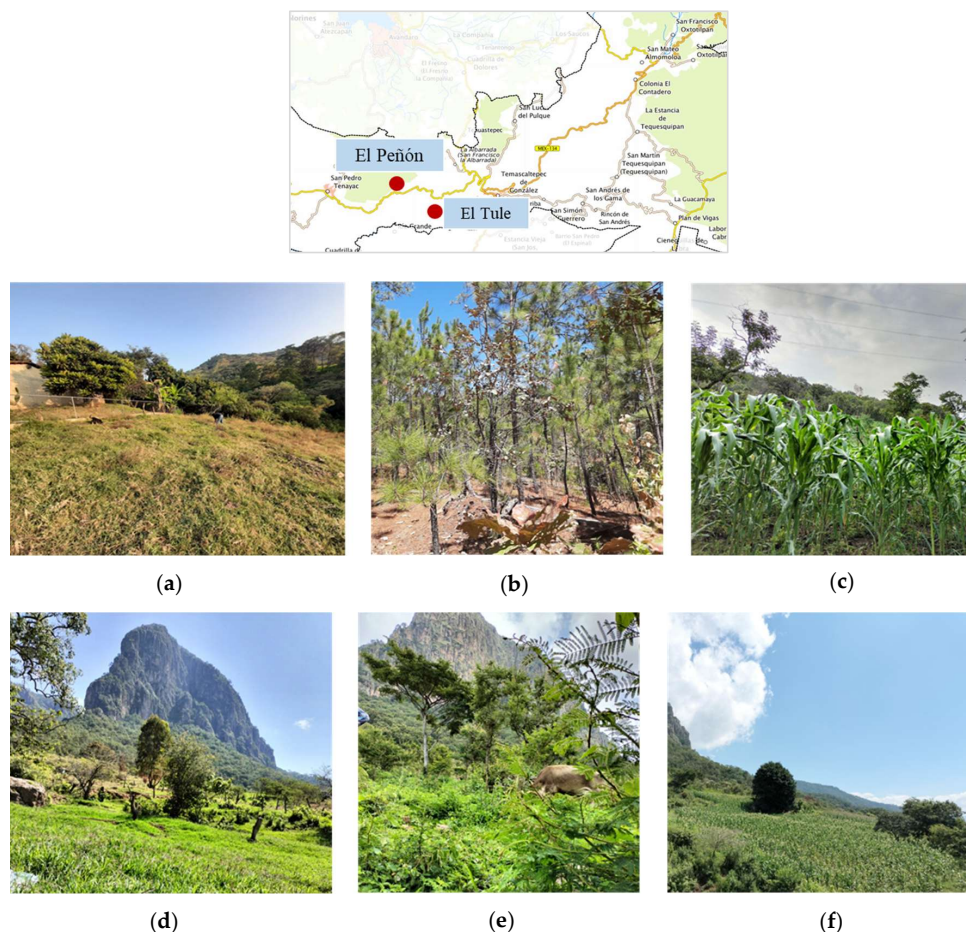


Figura 1. Ubicación de los sistemas de producción en el municipio de Temascaltepec (S1, El Tule; S2, El Peñón) y sus diferentes usos de suelo: a) pastizal S1 (19° 02' 16.95" N, 100° 05' 27.79" O); b) forestal S1 (19° 02' 08.45" N, 100° 05' 41.47" O); c) agrícola S1 (19° 01' 47.15" N, 100° 05' 07.07" O); d) pastizal S2 (19° 03' 08.01" N, 100° 07' 10.89" O); e) forestal S2 (19° 03' 14.57" N, 100° 07' 02.04" O); y f) agrícola S2 (19° 03' 13.24" N, 100° 07' 03.85" O).
Figure 1. Location of production systems in the municipality of Temascaltepec (S1, El Tule; S2, El Peñón) and their different land uses: a) grassland S1 (19° 02' 16.95" N, 100° 05' 27.79" O); b) forest S1 (19° 02' 08.45" N, 100° 05' 41.47" W); c) agricultural S1 (19° 01' 47.15" N, 100° 05' 07.07" W); d) grassland S2 (19° 03' 08.01" N, 100° 07' 10.89" W); e) forest S2 (19° 03' 14.57" N, 100° 07' 02.04" W); and f) agricultural S2 (19° 03' 13.24" N, 100° 07' 03.85" W).

EL contenido de C orgánico del suelo (Mg C ha^{-1}) se determinó con la ecuación 2, propuesta por González-Molina, Etchevers y Hidalgo (2008):

$$COS = CO (DA)Ps \quad (2)$$

Dónde: COS= C orgánico del suelo por superficie (Mg C ha^{-1}); CO= C orgánico total (%); DA= Densidad Aparente (g cm^{-3}); Ps= profundidad del suelo (10 y 20 cm).

La densidad aparente (DA, g cm^{-3}) se estimó a través del método de la probeta (Rosales, 2019¹), el pH se obtuvo a través de la utilización de potenciómetro (modelo Waterproof Tester H198130 HANNA Instruments). El porcentaje de humedad de suelo se determinó por el método de diferencia de pesos en estufa de aire forzado a 105 °C hasta peso constante.

¹ Rosales, Y. (2019). *Densidad aparente y cuantificación de carbono y nitrógeno en suelos con caña de azúcar en Morelos y Puebla, México*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Disponible en <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/3912>

Cuadro 1. Vegetación característica presente en los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción agropecuaria.
Table 1. Characteristic vegetation in the different land uses of agricultural production systems.

Sistema	Uso de suelo		
	P	F	A
1	Presencia de pasto estrella africana (<i>Cynodon plectostachyus</i>) + pastos nativos + nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>), tepehuaje (<i>Lysiloma acapulcense</i>), maguey (<i>Agave</i>), palo mulato (<i>Bursera simaruba</i>), pochote (<i>Bombacopsis quinatum</i>), copal (<i>Bursera coyucensis</i>), guayabo criollo (<i>Psidium guajava</i>), zapote blanco (<i>Casimiroa edulis</i>), guaje rojo (<i>Leucaena esculenta</i>), huizache (<i>Vachellia farnesiana</i>).	Zona de bosque con especies forestales como pino Moctezuma (<i>Pinus montezumae</i>), encinos (<i>Quercus hintonii/glaucoides</i>).	Milpa: Cultivo de maíz (<i>Zea maíz</i>) asociado con Calabaza (<i>Cucurbita máxima</i>) y Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>). Especies forestales dispersas como Huizache (<i>Vachellia farnesiana</i>), Tepehuaje (<i>Lysiloma acapulcense</i>), Espino Herrero (<i>Mimosa benthamii</i>), Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>), Encinos (<i>Quercus hintonii/glaucoides</i>) y Cazahuate (<i>Ipomoea wolcottiana</i>), además de la presencia de pastos nativos. Esta área presentó un descanso de más de 10 años antes de volver a cultivarse. Después de la cosecha ingresan los animales para alimentarse de los residuos agrícolas, antes de la próxima siembra.
2	Presencia de pasto estrella africana (<i>Cynodon plectostachyus</i>), nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>), sin árboles dispersos	Zona de bosque con especies forestales como encinos (<i>Quercus hintonii/glaucoides</i>), Guaje (<i>Leucaena leucocephala</i>), espino herrero (<i>Mimosa benthamii</i>), zapote blanco (<i>Casimiroa edulis</i>), huizache (<i>Vachellia farnesiana</i>), sin cobertura vegetal en suelo.	Milpa: Cultivo de maíz (<i>Zea maíz</i>) asociado con Calabaza (<i>Cucurbita máxima</i>) y Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>). Especies forestales dispersas como Zapote blanco (<i>Casimiroa edulis</i>), Cazahuate (<i>Ipomoea wolcottiana</i>), Guayabo criollo (<i>Psidium guajava</i>). Después de la cosecha ingresan los animales para alimentarse de los residuos agrícolas, antes de la próxima siembra.

Sistema 1 = El Tule; Sistema 2 = El Peñón; P= Pastizal; F = Forestal; A = Agrícola.
 System 1 = El Tule; System 2 = El Peñón; P = Grassland; F = Forest; A = Agricultural.

Análisis de Datos

Los datos obtenidos de COS se analizaron mediante un ANOVA bajo un diseño de parcelas sub-divididas con 9 repeticiones a través del tiempo, donde:

$$Y_{ijkh} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkh} \quad (3)$$

Dónde: μ es la media general, τ_i representa el efecto del sistema de producción (factor A= i= 1, 2), β_j corresponde al efecto del uso del suelo (factor B), $(\tau\beta)_{ij}$ es la interacción entre sistemas de producción y usos de suelo, asociada al error de la parcela grande (AB). Por otra parte: γ_k representa el efecto de la profundidad del suelo (factor C: 0-10 y de 10-20 cm), $(\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk}$ corresponden a las interacciones AC, BC y ABC, respectivamente. ε_{ijkh} es el error experimental asociado a la subparcela.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo de los sistemas agropecuarios.
Table 2. Physical and chemical properties of the soil of agricultural systems.

Sistema de Producción	Uso de suelo	Carbono	Total del área	Porosidad	Arcilla	Arena	DA	pH
		%	ha	-----	%	-----	g cm ⁻³	
S1	P	5.61	0.45	22.7	20.3	73.1	0.86	6.8
	F	2.18	3.87	27.7	24.3	65.1	0.94	4.6
	A	8.73	0.54	29.4	33.8	62.2	0.70	6.2
S2	P	7.95	0.11	26.6	33.7	66.2	0.84	5.9
	F	3.66	6.49	13.7	28.3	69.1	0.95	5.2
	A	2.18	0.66	15.4	29.7	66.2	1.02	5.6

S1 = El Tule; S2 = El Peñón; DA= Densidad Aparente.
 S1 = El Tule; S2 = El Peñón; BD = Bulk density.

Cuadro 3. Características biofísicas de los sistemas agropecuarios 1 y 2, en el Municipio de Temascaltepec, Estado de México.
Table 3. Biophysical characteristics of agricultural systems 1 and 2, in the Municipality of Temascaltepec, State of Mexico.

Sistema	Manejo	Tipo y número de animales	Razas	Producción de leche	Tipo de alimentación
				kg vaca ⁻¹ año ⁻¹	
S1	Pastoreo	Vacas: 7	Pardo Suizo	1260	Rastrojo de maíz
		Becerras: 7			Pastos nativos
		Novillo/a: 6	Pardo Suizo		Concentrado comercial
		Machos adultos: 1			
S2	Semi confinamiento y pastoreo	Vacas: 7	Pardo Suizo	1800	Silo de maíz
		Becerras: 3			Rastrojo de maíz
		Novillo/a:3	Girolando		Pastos nativos
		Machos adultos: 1			Concentrado comercial

S1 = El Tule; S2 = El Peñón.
 S1 = El Tule; S2 = El Peñón.

Los datos se analizaron mediante el programa estadístico The SAS System for Windows 9.0. (SAS Institute, 2002). Se realizó una comparación de medias a través de la prueba Tukey ($p < 0.05$). Además, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson entre el COS y la Densidad aparente, pH y % de humedad del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Niveles de COS en los Diferentes usos de Suelo de los Sistemas de Producción Agropecuaria

Los valores promedio de carbono en suelo de 0-10 cm de profundidad fue 99.3 Mg C ha⁻¹ para el uso de suelo S1P, 60.3 Mg C ha⁻¹ para S1F y 108.2 Mg C ha⁻¹ para S1A, S2P presentó 84.2 Mg C ha⁻¹, S2F 72.7 Mg C ha⁻¹ y S2A 61.8 Mg C ha⁻¹ (Figura 2).

El valor promedio de COS de 10-20 cm de profundidad en los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción fue de 75.5 Mg C ha⁻¹ para S1P y 51.8 para S2P Mg C ha⁻¹, para el uso S1F el valor de COS fue de 46.6 42.2 Mg ha⁻¹ y del S2F de 42.2 Mg ha⁻¹, referente al uso S1A se obtuvieron valores de 66.2 Mg ha⁻¹ y de 42.6 Mg C ha⁻¹ para el uso S2A. El análisis de varianza correspondiente al contenido de COS presentó diferencia significativa entre sistemas 1 y 2 ($p = 0.040$) y usos de suelo P, F y A ($p = 0.02$; Cuadro 5).

Cuadro 4. Nomenclatura de referencia para los sistemas de producción, usos de suelo y profundidades.
Table 4. Reference nomenclature for production systems, land uses and depths.

	Sistema 1	Sistema 2
Pastizal (P)		
0-10 cm	S1P-10	S2P-10
10-20 cm	S1P-20	S2P-20
Forestal (F)		
0-10 cm	S1F-10	S2F-10
10-20 cm	S1F-20	S2F-20
Agrícola (A)		
0-10 cm	S1A-10	S2A-10
10-20 cm	S1A-20	S2A-20

Sistema 1 = El Tule; Sistema 2 = El Peñón.
 System 1 = El Tule; System 2 = El Peñón.

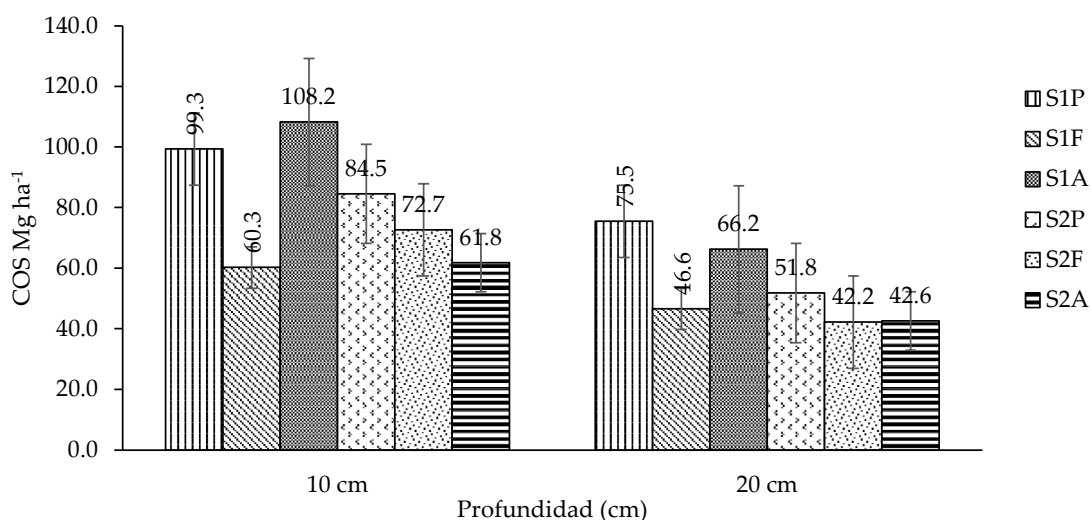


Figura 2. Almacenamiento promedio de carbono (C) a profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm en los diferentes usos de suelo (P, F y A) de los sistemas de producción agropecuaria 1 y 2.
Figure 2. Average carbon (C) storage at 0-10 cm and 10-20 cm depths under different land uses (P, F, and A) in agricultural production systems 1 and 2.

Los valores de COS de este trabajo difieren a los reportados por Vela *et al.* (2012) en suelos de bosques de *Quercus spp.* el COS fue de 121.3 Mg C ha⁻¹, de un suelo de pastizal (asociación de *Festuca tolucensis* y *Muhlenbergia macroura*) 90.0 Mg C ha⁻¹, sin embargo, en suelos agrícolas (monocultivo maíz) fue menor, en promedio se obtuvo 32.9 Mg C ha⁻¹ debido a factores como la falta de cobertura vegetal del suelo, ocasionada por las labores culturales realizadas durante el proceso de siembra y cosecha debido a que dejan desprotegido al suelo durante una parte importante del año. En el uso de suelo agrícola del S1 y S2 de este trabajo, no se realizan labores culturales, y se deja residuos de la cosecha para el consumo parcial por los bovinos. Martínez, Fuentes y Acevedo (2008) mencionan que en condiciones naturales el carbono se incorpora al suelo a través del ingreso de material orgánico, principalmente de origen vegetal. En suelos agrícolas, el mayor aporte de C es mediante los residuos de cosecha. Lal (2004) menciona que un suelo agrícola pierde 40% del C edáfico que existía cuando su uso era forestal, y un pastizal pierde cerca del 20% (después de cinco años de tumba), en conjunto con prácticas de manejo deficientes, como el sobrepastoreo, donde el pisoteo de animales reduce el espacio poroso, además de que disminuye el desarrollo de biomasa.

En los suelos de bosques naturales, el carbono se encuentra en equilibrio estable, pero en cuanto se produce una perturbación como la deforestación o forestación, el equilibrio se ve afectado, por lo tanto, la reforestación en suelos degradados con bajo contenido de C y MO, es una forma importante de secuestro de C a largo plazo (FAO, 2001). En este trabajo, el uso de suelo Forestal en los dos sistemas presentó menor contenido de COS (Mg C ha⁻¹), debido a que en la zona forestal se han presentado incendios en los últimos cinco años.

Cuadro 5. Comparación de medias para el efecto del contenido de COS (Mg C ha⁻¹) de acuerdo con el uso del suelo entre sistemas de producción agropecuaria.

Table 5. Comparison of means for the effect of COS content (Mg C ha⁻¹) according to land use among agricultural production systems.

Sistema	P	Promedio	F	Promedio	A	Promedio	S X U
1	87.39 a	78.92 A	54.27 b	56.46 B	87.23 a	72.73 AB	NS
2	70.44 a		58.64b		58.24 b		NS

Sistema 1 = El Tule; Sistema 2 = El Peñón; P = pastizal; F = forestal; A = agrícola; letras minúsculas distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre usos del suelo en cada sistema según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Letras mayúsculas diferentes indican diferencia significativa entre usos del suelo de ambos sistemas; NS = no significativo. S X U = interacción Sistema X Uso

System 1 = El Tule; System 2 = El Peñón; P = grassland; F = forest; A = agricultural. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among land uses within each system according to Tukey's test ($p \leq 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among land uses between both systems; NS = not significant. S x U = System x Land Use interaction..

Los resultados de COS del S1A y S2A se asemejan con los valores presentados por Arriaga-Vázquez *et al.* (2021), en el estudio que llevaron a cabo en un área experimental con tres sistemas de manejo del suelo en Tuxtla, Veracruz, donde el manejo del suelo con hileras de frutal de chicozapote (*Manilkara zapota*), patrón de cultivo intercalado maíz-frijol, labranza mínima con tracción mecánica obtuvieron un valor de carbono almacenado en suelo de 185.04 Mg C ha⁻¹, el cual se asemeja al uso de suelo S1A donde se presenta la siembra de maíz-frijol-calabaza intercalados con árboles de encino, huizache y espinillo, con la presencia de cobertura vegetal, el cual presentó valor de 108.2 Mg C ha⁻¹ de COS a los 10 cm de profundidad, al comparar con un sistema de maíz-maíz con labranza tradicional (36.51 Mg C ha⁻¹) y con un sistema de labranza de conservación (labranza mínima de tracción animal) (34.20 Mg C ha⁻¹). Sin embargo, en este estudio en el S2A las características del cultivo como la ausencia de cobertura vegetal, menor presencia de árboles, el contenido de COS fue menor de 0-10 cm de profundidad (61.8 Mg C ha⁻¹). Además, los resultados obtenidos en este trabajo referente al S1A, el cual presentaba como característica principal un periodo de descanso de más de 10 años, y presencia de vegetación secundaria, coinciden con lo reportado por Covalada Paz y Ranero (2016) donde identificaron las principales dinámicas de cambio de uso del suelo en Chiapas entre 2007 y 2011 a nivel regional, las cuales fueron: deforestación de bosques secundarios templados para establecer parcelas agrícolas de subsistencia (milpa) en los Altos, donde mencionan que los suelos de sistemas Agrícolas itinerantes contienen 75.20 Mg C ha⁻¹, comparado con los sistemas agrícolas permanentes con 47.60 Mg C ha⁻¹, y los potreros o pastizales con 84.00 Mg C ha⁻¹, sin embargo, el uso de suelo Acahual presentó el mayor contenido con 109.80 Mg C ha⁻¹. En este sentido, los resultados obtenidos en este trabajo, son similares a los reportados por Covalada *et al.* (2016), donde mencionan que el bosque cortado (roza, tumba y quema) totalmente en el año 0, se regeneró hasta el año 10, donde fue cortado para sembrar una milpa de maíz; la cual fue mantenida por 4 años y permitió que la vegetación se regenerara a su condición inicial, misma práctica llevada a cabo en el uso de suelo A del sistema 1. En este sentido, en suelos que llevaron un periodo de descanso tienen la ventaja de crecimiento de la vegetación natural lo cual ayuda a la recuperación de nutrientes, así como el aumento de carbono. En contraste, con los ciclos sucesivos del maíz (Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013).

Raj Aryal *et al.* (2018) reportan que no se presentaron diferencias significativas ($p = 0.268$) en el contenido de COS en áreas forestales; 72.57 Mg C ha⁻¹ (bosque tropical subcaducifolio-*Quercus rugosa* Née, *Acacia collinsii* Saff., *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Enterolobium cyclocarpus* (Jacq.) Griseb. y *Guazuma ulmifolia* Lam. y áreas de potreros (74.37 Mg C ha⁻¹), esto debido a factores como: 1) el COS es un reservorio estable y afectado lentamente por el cambio de uso de suelo, 2) el ingreso de materia orgánica por el recambio de raíces de áreas de potrero contribuye a mantener el COS del suelo de pastizales, además del manejo de potrero en términos de rotación de pastoreo, número de animales por unidad de superficie, adición de MO y fertilizantes sintéticos pueden explicar las variaciones y la acumulación de COS. Kassa, Dondeyne, Poesen, Frankl y Nyssen (2017) señalan que en sistemas agroforestales (tierras de cultivo + agroforestería), que han tenido conversión de bosque natural a sistema agroforestal, tienen la capacidad de almacenar gran cantidad de COS (357 Mg C ha⁻¹), sin embargo, las mayores reservas totales de COS se registraron en bosques naturales (412 Mg C ha⁻¹), además de mantener las condiciones de fertilidad del suelo. Los resultados obtenidos de COS en el uso de suelo F en los sistemas de producción (S1F 54.27 Mg C ha⁻¹, S2F 58.64 Mg C ha⁻¹), son similares a los reportados por Bolaños, Bolaños, Paz y Ponce (2017), los cuales indican un contenido de COS de 68 Mg C ha⁻¹ en bosques de *Abies religiosa* ubicados en el municipio de Texcoco, contrario a lo reportados por Chávez-Aguilar, Burrola-Aguilar, González-Morales y Pérez-Suárez (2020) que indican contenidos de 211 Mg C ha⁻¹ en bosques de *Pinus hartwegii* ubicados en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFf) del Nevado de Toluca.

Contenido de C en los Usos de Suelo y Profundidad en dos Sistemas de Producción Agropecuaria durante los Periodos de Muestreo

El contenido de COS de 0-10 cm de profundidad de los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción se muestra en la Figura 3, el S1P-10 presentó mayor contenido de COS en el periodo de muestreo seis con 325.43 Mg C ha⁻¹, S2P-10 en el M5 con 102.56 Mg C ha⁻¹, para el caso del uso S1F-10, el mayor contenido fue en el M3 con 98.13 Mg C ha⁻¹, S2F-10 fue de 80.28 en el M9 Mg C ha⁻¹, y para S1A-10 el valor más alto se presentó en el M4 con 159.39 Mg C ha⁻¹, para S2A-10 el valor más alto fue de 97.23 Mg C ha⁻¹ en el M3. La variación de estos contenidos de C en los diferentes usos de suelo, son atribuibles al manejo del pastoreo, carga animal, tipo de suelo, contenido de nutrimentos.

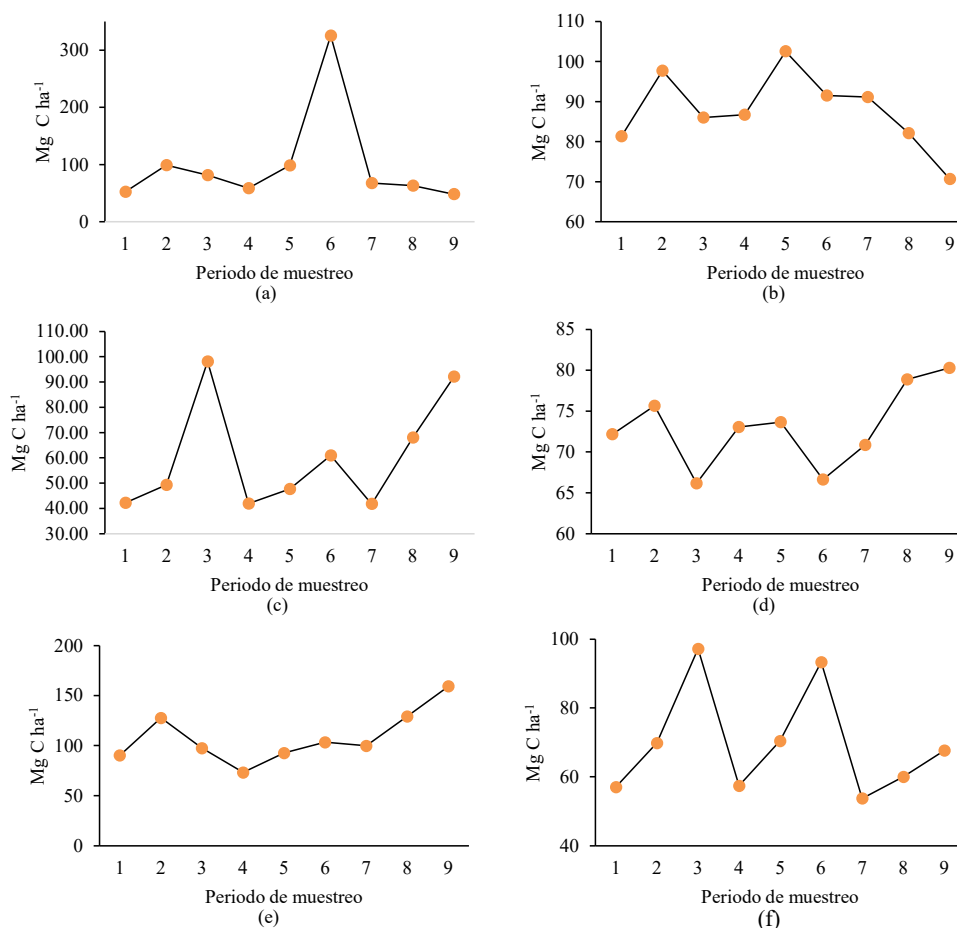


Figura 3. Contenido de COS de 0-10 cm centímetros de profundidad durante el periodo de muestreo. a) S1P; b) S2P; c) S1F; d) S2F; e) S1A; f) S2A.

Figure 3. SOC content at 0-10 centimeters depth during the sampling period. a) S1P; b) S2P; c) S1F; d) S2F; e) S1A; f) S2A.

En la Figura 4, se muestra el contenido de COS de 10-20 cm de profundidad de los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción, donde S1P-20 presentó el mayor contenido de COS en el periodo de muestreo seis con $253.18 \text{ Mg C ha}^{-1}$, S2P-20 en el M5 con $68.67 \text{ Mg C ha}^{-1}$, para el caso del uso S1F-20 el mayor contenido fue en el M4 con $62.65 \text{ Mg C ha}^{-1}$, S2F-20 fue de $58.89 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el M2, y para el uso S1A-20 el valor más alto se presentó en el M9 con $82.52 \text{ Mg C ha}^{-1}$, para S2A-20 el valor más alto fue de $69.77 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el M8.

El análisis de varianza correspondiente al efecto de la profundidad sobre el contenido de COS, presentó diferencia significativa entre profundidades de 0-10 y 10-20, en el cual, la profundidad de 0-10 cm presentó el promedio más alto en ambos sistemas de producción (Cuadro 6).

En cada uno de los usos de suelo de los sistemas de producción se presentó una disminución del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) conforme aumentó la profundidad de muestreo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Odebiri *et al.* (2024), quienes documentaron que las reservas medias de carbono en la provincia de KwaZulu-Natal (costa oriental de Sudáfrica) oscilaron entre 23.55 y $57.53 \text{ Mg C ha}^{-1}$, observándose una disminución constante del COS desde la profundidad de 0-30 cm hasta 30-60 cm en diferentes usos de suelo. En la capa superficial (0-30 cm), los valores de COS fueron de $53.81 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en pastizales, $51.70 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en tierras de cultivo, $57.27 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en bosque natural y $62.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en bosque comercial. En la profundidad de 30-60 cm, los valores disminuyeron a $26.29 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en pastizales, $22.65 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en tierras de cultivo, $29.12 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en bosque natural y $32.09 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en bosque comercial.

En general los cambios de COS están determinados por las entradas de carbono a través de la producción de hojarasca vegetal y exudados de las raíces y la salida a través de la descomposición microbiana de las entradas de las plantas y materia orgánica del suelo existente (Amundson, 2001).

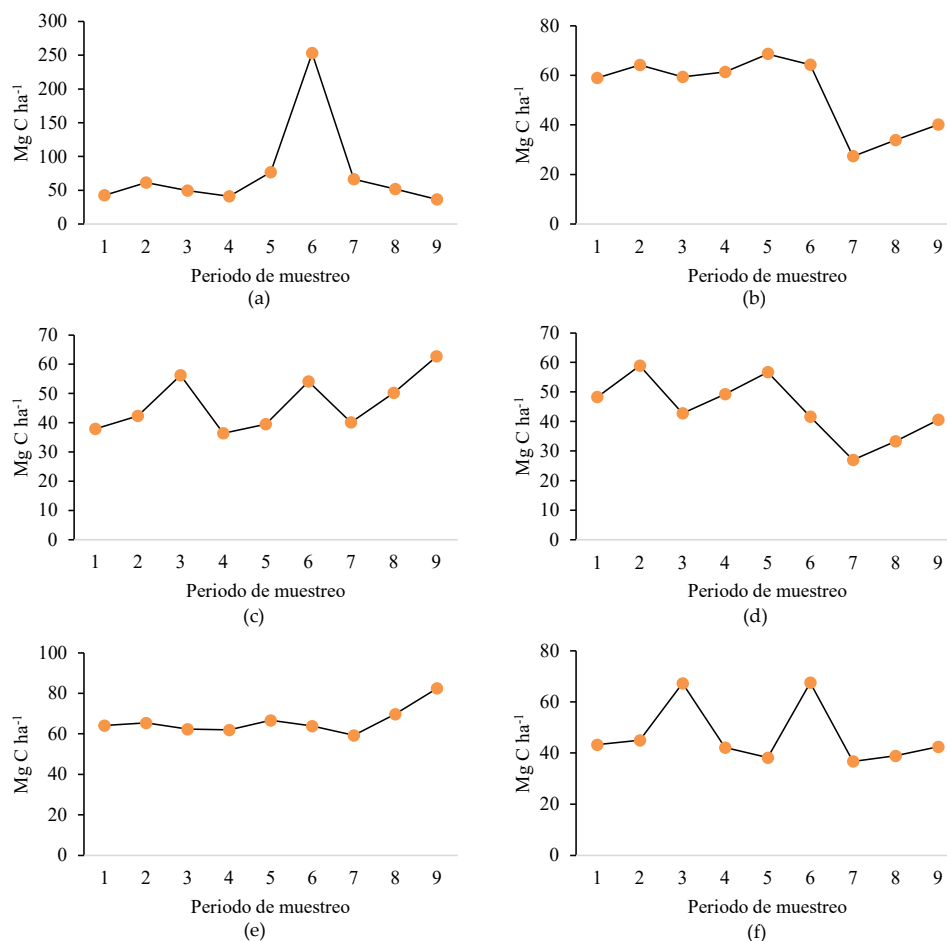


Figura 4. Contenido de COS de 10-20 centímetros de profundidad durante el periodo de muestreo. a) S1P; b) S2P; c) S1F; d) S2F; e) S1A; f) S2A.
Figure 4. SOC content at 10-20 centimeters depth during the sampling period. a) S1P; b) S2P; c) S1F; d) S2F; e) S1A; f) S2A.

Efecto del Periodo de Muestreo

El contenido de COS en los diferentes periodos de muestreo de los sistemas de producción presentó diferencia significativa (Cuadro 7). De acuerdo con los valores promedio de contenido de COS en cada sistema de producción durante los nueve periodos de muestreo, se observó un aumento en el periodo 6 referente al mes de agosto en el cual se presentan los valores más altos de % de humedad en el suelo (> 70%).

Este comportamiento puede explicarse por la influencia de la humedad sobre los procesos biológicos y bioquímicos del suelo. En este sentido, Hao *et al.* (2025) señalan que la humedad del suelo regula la salud de las plantas y las tasas de fotosíntesis, lo que a su vez impacta a las comunidades microbianas mediante los exudados radiculares y los aportes de hojarasca. La actividad microbiana resultante controla la descomposición de la materia orgánica, modificando la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, lo que retroalimenta el crecimiento vegetal y la dinámica hídrica. Asimismo, se ha reportado que bajo condiciones de baja humedad (< 30%), la fotosíntesis y la actividad microbiana disminuyen significativamente, limitando la incorporación de carbono al suelo. En contraste, cuando la humedad se encuentra en niveles intermedios (60-80%), como en el presente estudio, se alcanza un punto óptimo en el que la productividad vegetal y la actividad microbiana son máximas, favoreciendo tanto la entrada de carbono como su estabilización en los agregados del suelo. Por el contrario, en condiciones de saturación (> 80-100%), se reduce la descomposición aerobia, lo que puede incrementar la acumulación de carbono, pero también favorecer la emisión de gases de efecto invernadero como el metano (CH₄) (Moyano, Manzoni y Chenu, 2013).

Cuadro 6. Comparación de medias para el efecto de la profundidad del suelo en el contenido de COS (Mg C ha⁻¹) entre sistemas de producción agropecuaria.**Table 6. Comparison of means for the effect of soil depth on SOC content (Mg C ha⁻¹) between agricultural production systems.**

Sistemas	Profundidad del suelo	Promedio	Profundidad del suelo	Promedio
	0-10 cm		10-20 cm	
1	89.74 a	83.27 A	62.86 b	55.47 B
2	75.81 a		48.07 b	

Sistema 1 = El Tule; Sistema 2 = El Peñón. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Letras mayúsculas diferentes indican diferencia significativa entre usos del suelo de ambos sistemas.

System 1 = El Tule; System 2 = El Peñón. Different letters within the same row indicate significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$); Different uppercase letters indicate significant differences among land uses of both systems.

Densidad Aparente del Suelo

La Figura 5 muestra el valor de DA de 0-10 cm de profundidad de los diferentes usos del suelo por sistema, donde el valor máximo para S1P fue de 0.85 g cm⁻³, 1.07 g cm⁻³ para S1F y 0.99 para S1A g cm⁻³. Referente al sistema 2 fue de 0.93 g cm⁻³ para S2P, 0.97 g cm⁻³ para S2F y 1.03 g cm⁻³ para S2A.

La Figura 6 muestra el valor de DA de 10-20 cm de profundidad de los diferentes usos del suelo por sistema, donde el valor máximo para S1P fue de 0.89 g cm⁻³, 1.00 g cm⁻³ para S1F y 1.22 para S1A g cm⁻³. Referente al sistema 2 fue de 0.81 g cm⁻³ para S2P, 0.97 g cm⁻³ para S2F y 0.95 g cm⁻³ para S2A.

pH del Suelo en Diferentes Usos a 10 y 20 cm de Profundidad en dos Sistemas de Producción Agropecuaria

El pH del suelo presentó variaciones a lo largo de los periodos de muestreo en los diferentes usos y sistemas de producción. Estas fluctuaciones se muestran en las Figuras 7 y 8, donde se observa el comportamiento temporal del pH a 10 y 20 cm de profundidad.

El pH inicial de los 3 diferentes usos del suelo del S1 de 0-10 cm de profundidad fue de 5.9 para S1P, 4.6 para S1F y 6.6 para S1A. Para el S2 fue de 6.6 S2P, 5.5 S2F y 6.0 para S2A.

El pH inicial de los 3 diferentes usos del suelo del S1 de 10-20 cm de profundidad fue de 6.3 para S1P, 5.1 para S1F y 6.7 para S1A. Para el S2 fue de 5.7 S2P, 5.3 S2F y 5.8 para S2A.

Contenido de Humedad (%) en diferentes usos de suelo de 0-10 y 10-20 cm de profundidad en dos sistemas de producción agropecuaria

De acuerdo con las Figuras 9 y 10, en ambos sistemas el mayor porcentaje de humedad del suelo ocurrió en el muestreo seis, referente al mes de agosto.

Correlación entre Carbono Orgánico, pH y Densidad Aparente del Suelo

En el Cuadro 8 se muestra la relación entre las variables físicas y químicas del suelo y el contenido de COS en los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción agropecuaria de 0-10 cm de profundidad; donde tanto el periodo de muestreo como pH y DA no presentaron relación respecto al contenido de COS en los diferentes usos del suelo de ambos sistemas, sin embargo, entre el % de Humedad del suelo y el contenido de COS del S1P, se presentó una relación positiva ($r = 0.762$, $p = 0.017$).

Cuadro 7. Comparación de medias para el efecto del periodo de muestreo en el contenido de COS (Mg C ha⁻¹) en los sistemas de producción de bovinos doble propósito.**Table 7. Comparison of means for the effect of the sampling period on SOC content (Mg C ha⁻¹) in dual-purpose cattle production systems.**

Sistemas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	54.97bc	74.23bc	74.21bc	52.17 c	70.3bc	146.06a	62.55bc	71.98bc	80.22b
2	60.16abc	68.54ab	69.80a	61.68abc	68.37ab	70.80a	51.14bc	54.52bc	56.96abc

Sistema 1= El Tule, Sistema 2= El Peñón; 1-9 = periodos de muestreo. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). System 1 = El Tule, System 2 = El Peñón; 1-9 = sampling periods. Different letters within the same row indicate significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

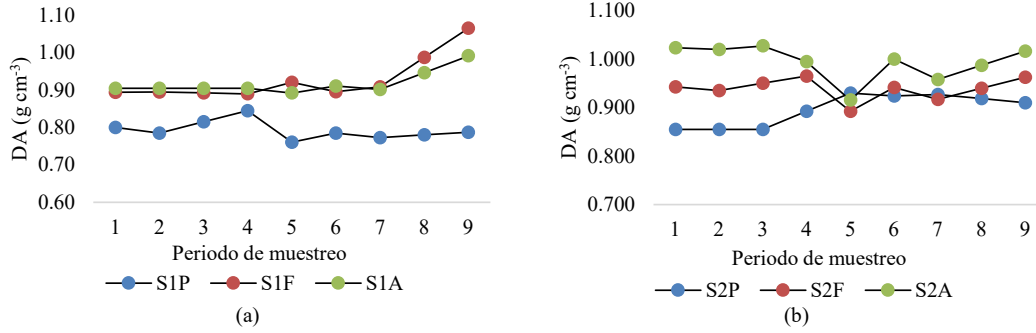


Figura 5. DA de 0-10 centímetros de profundidad del S1 (a) y S2 (b) durante el periodo de muestreo.
Figure 5. DA at 10 cm depth of S1 (a) and S2 (b) during the sampling period.

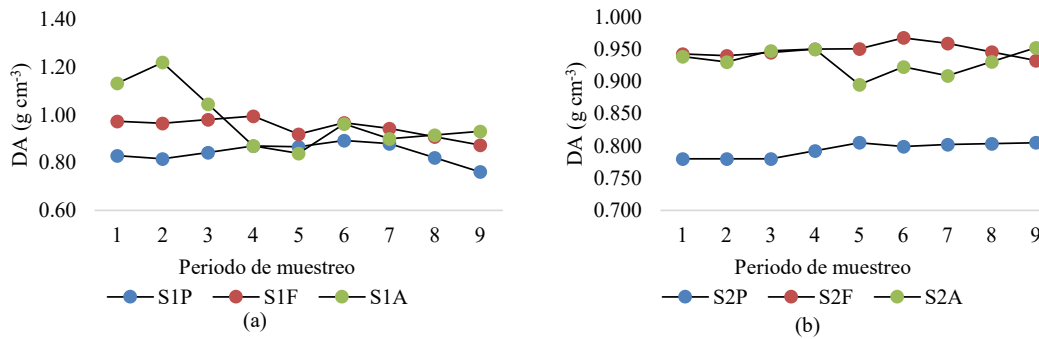


Figura 6. DA de 10-20 centímetros de profundidad del S1 (a) y S2 (b) durante el periodo de muestreo.
Figure 6. DA at 10-20 cm depth of S1 (a) and S2 (b) during the sampling period.

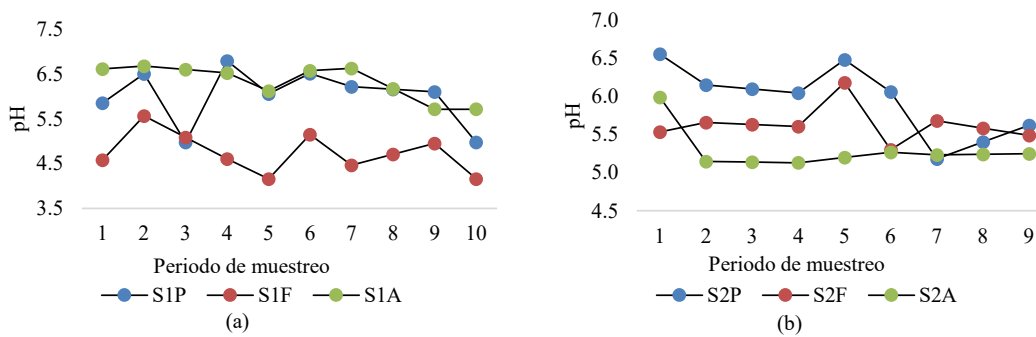


Figura 7. pH de 0-10 centímetros de profundidad del S1 (a) y S2 (b) durante el periodo de muestreo.
Figure 7. pH at 0-10 cm depth of S1 (a) and S2 (b) during the sampling period.

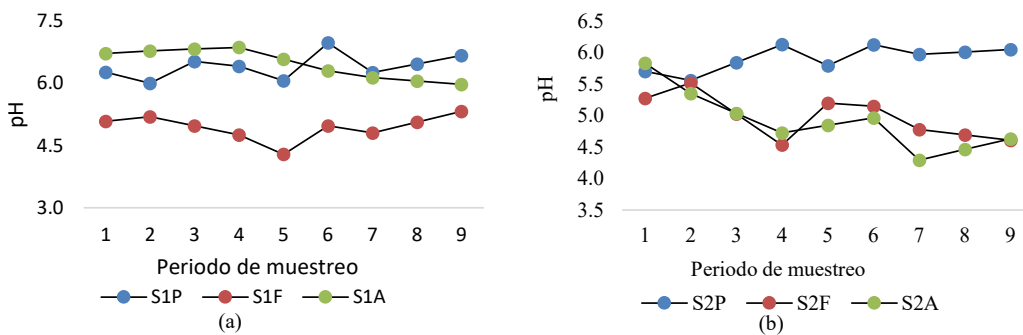


Figura 8. pH 10-20 centímetros de profundidad del S1 (a) y S2 (b) durante el periodo de muestreo.
Figure 8. pH at 10-20 cm depth of S1 (a) and S2 (b) during the sampling period.

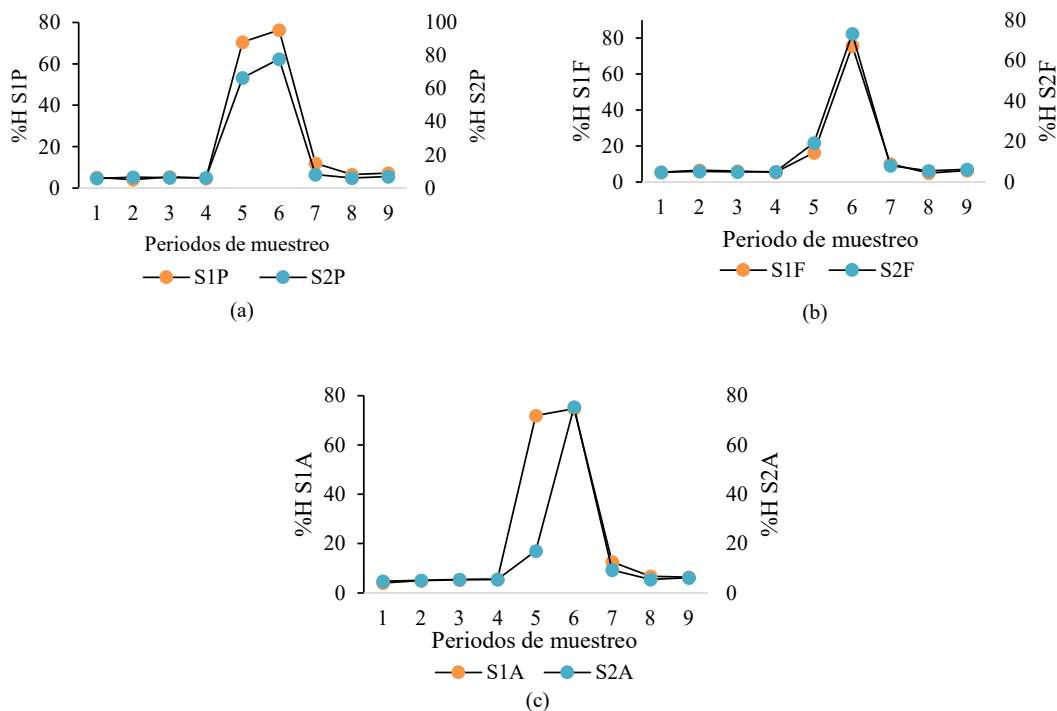


Figura 9. Porcentaje de humedad de 0-10 centímetros de profundidad durante el periodo de muestreo. a) Pastizal S1-S2; b) Forestal S1-S2; c) Agrícola S1-S2.
Figure 9. Percentage moisture at 0-10 centimeters depth during the sampling period. a) Grassland S1-S2; b) Forest S1-S2; c) Agricultural S1-S2.

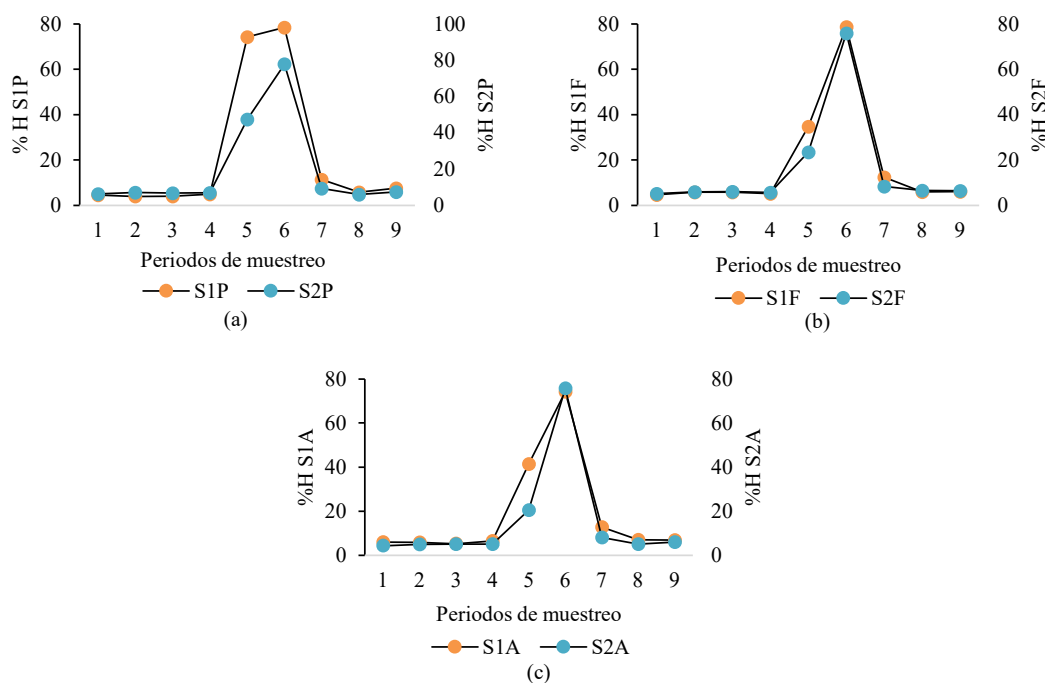


Figura 10. Porcentaje de humedad de 10-20 centímetros de profundidad durante el periodo de muestreo. a) Pastizal S1-S2; b) Forestal S1-S2; c) Agrícola S1-S2.
Figure 10. Percentage moisture at 10-20 centimeters depth during the sampling period. a) Grassland S1-S2; b) Forest S1-S2; c) Agricultural S1-S2.

Cuadro 8. Correlación entre las variables pH, DA y Humedad del suelo con el contenido de COS de los diferentes usos de suelo de los sistemas 1 y 2 de 0-10 cm de profundidad.**Table 8. Correlation between the variables pH, DA and soil moisture with the SOC content of the different land uses of systems 1 and 2 at 0-10 cm depth.**

Sistema	COS	pH	DA	Humedad del suelo
	10 cm profundidad		g cm ⁻³	%
1	P	0.581	0.522	0.762
		0.101	0.150	0.017
	F	0.443	-0.362	-0.032
		0.232	0.339	0.934
	A	-0.651	0.158	-0.216
		0.058	0.685	0.576
2	P	-0.397	-0.064	0.530
		0.290	0.870	0.142
	F	-0.308	-0.664	-0.487
		0.419	0.051	0.184
	A	0.171	0.091	0.557
		0.660	0.815	0.119

S1 = El Tule; S2 = El Peñón; P = pastizal; F = forestal; A = agrícola; DA = densidad aparente; ρ = de Pearson; $p < 0.05$ presenta diferencia significativa.

S1 = El Tule; S2 = El Peñón; P = grassland; F = forest; A = agricultural; DA = bulk density; ρ = Pearson; $p < 0.05$ indicates significant difference.

Referente a la relación entre las variables físicas y químicas del suelo y el contenido de COS en los diferentes usos de suelo de los sistemas de producción agropecuaria de 10-20 cm de profundidad; S1A mostró una correlación negativa con el valor de pH del suelo y el contenido de COS ($r = -0.900$, $p = 0.001$), no obstante, presentó una relación positiva con el valor de DA ($r = 0.915$, $p = 0.001$). En el sistema 2, el uso de suelo S2P fue el único que indicó una correlación positiva con el valor de pH ($r = 0.916$, $p = 0.001$) (Cuadro 9).

Zhang *et al.* (2021) indican que el valor de r^2 de la relación entre pH del suelo y el COS fue 0.69, ($p < 0.001$), Magdoff, Bartlett y Ross (1987) indican que suelos con bajo nivel de COS, las variaciones de este generan grandes cambios en la capacidad tampón del suelo, y con altos niveles de COS, genera cambios mínimos, dado esto, el COS tiende a aumentar el pH cuando el suelo es ácido y a disminuirlo cuando el pH del suelo es alcalino. Hoorman e Islam (2010) indican que la humedad, pH, profundidad del suelo afectan la descomposición de la materia orgánica, en suelos con un pH neutro a ligeramente alcalino descomponen la materia orgánica más rápido que los suelos ácidos. Referente a la relación entre almacenamiento de C (Mg C ha⁻¹), Meurer *et al.* (2020) mencionan que suelos con alto contenido de MO reducen la densidad aparente, ya que los datos obtenidos en su modelo de almacenamiento y recambio de COS con tres tratamientos (barbecho desnudo, abono animal y verde), arrojaron que la DA aumenta en un barbecho desnudo, sin embargo, disminuye el contenido de COS, en contraste con suelos con estiércol animal, donde aumentó el contenido de COS y disminuyó la densidad aparente, estos datos son similares a los reportados en este trabajo donde los suelos Forestales (F) de ambos sistemas presentaron menor contenido de COS y con ello un valor mayor de DA, en contraste con los suelos agrícolas del sistema 1, donde el contenido de COS fue mayor y por lo tanto, disminuyó DA. Un aumento en el contenido de carbono orgánico del suelo, produce una mayor agregación y una disminución de la densidad aparente, que tiende a aumentar el espacio poroso total, así como el número de tamaños de poros pequeños (Khaleel, Reddy y Overcash, 1981; Haynes, 2000). Cabe señalar que la composición de las fuentes de MO puede afectar el grado de agregación del suelo generada por la actividad microbiana (Bucka, Kölbl, Uteau, Peth y Kögel, 2019).

Cuadro 9. Correlación entre las variables pH, DA y Humedad del suelo con el contenido de COS de los diferentes usos de suelo de los sistemas 1 y 2 a los 10-20 cm de profundidad.**Table 9. Correlation between the variables pH, DA and soil moisture with the SOC content of the different land uses of systems 1 and 2 at 10-20 cm depth.**

Sistema	COS	pH	DA	Humedad del suelo
	10-20 cm de profundidad		g cm ⁻³	%
1	P	0.279	-0.238	0.771
		0.467	0.538	0.015
	F	0.462	0.629	0.169
		0.210	0.070	0.664
	A	-0.900	0.915	-0.130
		0.001	0.001	0.739
2	P	0.916	-0.386	0.441
		0.001	0.305	0.235
	F	0.400	-0.123	-0.013
		0.287	0.752	0.974
	A	-0.123	0.471	0.581
		0.752	0.201	0.101

S1 = El Tule; S2 = El Peñón; P = pastizal; F = forestal; A = agrícola; DA = densidad aparente; p = Pearson; $p < 0.05$ presenta diferencia significativa.

S1 = El Tule; S2 = El Peñón; P = grassland; F = forest; A = agricultural; DA = bulk density; p = Pearson; $p < 0.05$ indicates significant difference.

El contenido de agua en los suelos también influye en el almacenamiento de COS debido a que las tasas de descomposición disminuyen a medida que los suelos se vuelven más secos, en contraste con los suelos húmedos bien aireados los cuales son óptimos para la actividad microbiana, sin embargo, las tasas de descomposición de la MO disminuyen en suelos inundados ya que restringen la aireación (FAO y ITPS, 2015). En este trabajo, el uso de suelo P del Sistema de producción 1, mantuvo una correlación positiva entre el contenido de COS y contenido de humedad del suelo (%).

Los beneficios relacionados al secuestro de carbono incluyen mejoras en las propiedades químicas, la biodisponibilidad de elementos (mayor fertilidad) y la resiliencia frente a la degradación física, especialmente la erosión, por lo tanto, el almacenamiento de C ayuda a restaurar la calidad de los suelos degradados (FAO, 2001).

CONCLUSIONES

En los sistemas de producción agropecuaria el mayor contenido de COS se presentó en los usos del suelo agrícola y pastizal debido al manejo que realizan los productores al incorporar materia orgánica a través de los residuos agrícolas y a la deposición de heces por los animales en pastoreo. El mayor contenido de COS se encontró de 0-10 cm de profundidad del suelo en ambos usos del suelo. El S1= El Tule, presentó mayor promedio de COS en los usos del suelo pastizal y Agrícola, así mismo presentó relación significativa entre el COS y la humedad del suelo en el M6 (agosto) en el uso Pastizal lo que se asocia con mayor almacenamiento de COS en ese periodo, debido a que las tasas de descomposición de la materia orgánica disminuye a medida que los suelos se vuelven más secos, en contraste con los suelos húmedos bien aireados los cuales son óptimos para la actividad microbiana.

El monitoreo del COS en los sistemas de producción agropecuario son clave para desarrollar estrategias de conservación e incrementar las reservas de carbono orgánico en los suelo con diferente uso, mitigar el cambio climático y reducir el calentamiento global. No obstante, debido a la vulnerabilidad de las reservas de COS, a la variabilidad y a los cambios ambientales, es fundamental obtener una comprensión detallada del estado actual de las reservas de COS en los diferentes usos de suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados y analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Esta investigación fue financiada por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología, a través del proyecto No. FICDTEM 2023-83, titulado "Monitoreo de secuestro de Carbono en sistemas de producción agropecuaria en el Ejido el Peñon, Temascaltepec, México

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: T.G.O.M., F.A.N., O.A.C.O. y R.S.C.; Metodología: T.G.O.M., F.A.N., O.A.C.O. y R.S.C.; Análisis formal: T.G.O.M. y F.A.N.; Investigación: T.G.O.M. y F.A.N.; Recursos: T.G.O.M., F.A.N., O.A.C.O. y R.S.C.; Análisis de laboratorio: T.G.O.M.; Escritura - preparación del borrador original: T.G.O.M. y F.A.N.; Escritura - revisión y edición: T.G.O.M., F.A.N., O.A.C.O., R.S.C. y R.R.R.; Visualización: T.G.O.M. y F.A.N.; Supervisión: O.A.C.O., R.S.C. y R.R.R.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Amundson, R. (2001). The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1), 535-562. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.535>
- Arriaga-Vázquez, A. M., Martínez-Menez, M. R., Rubiños-Panta, J. E., Fernández-Reynoso, D. S., Delgadillo-Martínez, J., & Vázquez-Alarcón, A. (2020). Chemical and biological properties of soil in milpa interlaced with fruit trees. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 465-474. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Avilés-Nova, F., Valdés-Hernández, G. D., & Ríos-Avilés, D. F. (2025). Estrategias de restauración del carbono orgánico en suelos degradados en sistemas silvopastoriles naturales en Temascaltepec, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 29(Suplemento II), 56-57. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.25.29.77>
- BBVA Research. (2021). México: emisiones de gases de efecto invernadero y acciones de mitigación y adaptación. Consultada el 02 de diciembre, 2024, desde <https://www.bbvarresearch.com/>
- Bolaños, Y., Bolaños, M. A., Paz, F., & Ponce, J. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86.
- Bucka, F. B., Kölbl, A., Uteau, D., Peth, S., & Kögel-Knabner, I. (2019). Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils. *Geoderma*, 354, 113881. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113881>
- Chávez-Aguilar, G., Burrola-Aguilar, C., González-Morales, A., & Pérez-Suárez, M. (2020). Almacén de carbono orgánico del suelo y abundancia ectomicorrízica bajo dos especies de coníferas en el Nevado de Toluca. *Agroproductividad*, 13(1), 75-82.
- Covalada, S., Paz, F., & Ranero, A. (2016). Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 97-112.
- Durango, S., Gaviria, X., González, R., Sotelo, M., Gutiérrez, J. F., Chirinda, N., ... & Barahona, R. (2017). *Climate change mitigation initiatives in beef production systems in tropical countries*. CCAFS Info Note. Cali, Colombia: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) & ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils). (2015). Status of the world's soil resources: Main report. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultada el 11 de enero, 2025, desde <https://openknowledge.fao.org/>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management (World Soil Resources Reports No. 96)*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). *Global assessment of black soils*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GBM (Grupo Banco Mundial). (2022). El Banco Mundial hace un llamado urgente a la acción climática en América Latina y el Caribe para acelerar la transición hacia economías resilientes y bajas en carbono. Consultada el 08 de enero, 2025, desde <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/09/13/banco-mundial-accion-climatica-urgente-america-latina-caribe-acelerar-transicion-bajas-emisiones-de-carbono>
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J. D., & Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751.
- Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C. M., Hoffman, F. M., Koren, G., Chen, H., ... & Dai, Y. (2025). Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *Npj Climate And Atmospheric Science*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00888-8>
- Haynes, R. J. (2000). Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biology and Fertility of Soils*, 30(4), 270-275. <https://doi.org/10.1007/s003740050002>
- Hoorman, J. J., & Islam, R. (2010). *Understanding soil microbes and nutrient recycling (SAG-16)*. Ohio, USA: Ohio State University Extension. Consultada el 11 de enero, 2025, desde <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2024). Mapa digital de México V6.1. Consultada el 02 de diciembre, 2024, desde <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Consultada el 18 de diciembre, 2024, desde https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., & Nyssen, J. (2017). Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.034>
- Khaleel, R., Reddy, K. R., & Overcash, M. R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste additions: A review. *Journal of Environmental Quality*, 10, 133-141.
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43(1-2), 81-107. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00036-6)
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2016). Beyond COP 21: potential and challenges of the "4 per Thousand" initiative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(1), 20A-25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
- Magdoff, F. R., Bartlett, R.J., & Ross, D.S. (1987). Acidification and pH buffering of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1384-1386. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050053x>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Meurer, K. H., Chenu, C., Coucheney, E., Herrmann, A. M., Keller, T., Kätterer, T., ... & Jarvis, N. (2020). Modelling dynamic interactions between soil structure and the storage and turnover of soil organic matter. *Biogeosciences*, 17(20), 5025-5042. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5025-2020>
- Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.002>
- Odebiri, O., Mutanga, O., Odindi, J., Slotow, R., Mafongoya, P., Lottering, R., ... & Mngadi, M. (2024). Remote sensing of depth-induced variations in soil organic carbon stocks distribution within different vegetated landscapes. *Catena*, 243, 108216. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108216>
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2021). Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero. *Boletín 17*. Consultada el 18 de diciembre, 2024 desde <https://library.wmo.int/viewer/58176/download>
- Orihuela-Belmonte, D. E., De Jong, B. H., Mendoza-Vega, J., Van der Wal, J., Paz-Pellat, F., Soto-Pinto, L., & Flamenco-Sandoval, A. (2013). Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 171, 72-84.
- Peri, P. L., Maradei, D., Lupi, A. M., Tato, C., Gyenge, J., Gatica, M. G., ... & Gaute, M. (2022). Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra en distintas regiones de Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Consultada el día 08 de enero, 2025 desde <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/12650>
- Potma, D., de Moraes Sá, J. C., Mishra, U., Furlan, F. J. F., Ferreira, L. A., Inagaki, T. M., ... & Briedis, C. (2018). Soil carbon inventory to quantify the impact of land use change to mitigate greenhouse gas emissions and ecosystem services. *Environmental Pollution*, 243, 940-952. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.068>
- Raj Aryal, D., Gómez-Castro, H., Carmen-García, N. D., José-Ruiz, O. D. J., Molina-Paniagua, L. F., Jiménez-Trujillo, J. A., ... & Guevara Hernández, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 150-180. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.184>
- SAS Institute Inc. (2002). *SAS/STAT User's Guide, Version 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Vela, G., López, J., & Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 77, 18-30. <https://doi.org/10.14350/riq.31007>
- Walkey, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Zhang, J., Wu, X., Shi, Y., Jin, C., Yang, Y., Wei, X., ... & Wang, J. (2021). A slight increase in soil pH benefits soil organic carbon and nitrogen storage in a semi-arid grassland. *Ecological Indicators*, 130, 108037. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108037>