

Prácticas agrícolas y almacenamiento de carbono orgánico del suelo en sistemas de terrazas de la Mixteca Alta: análisis stepwise y percentiles

Olimpya Talya Aguirre-Salado^{1*} (<http://orcid.org/0000-0003-2346-2251>)

Joel Pérez Nieto¹ (<http://orcid.org/0000-0002-8821-1819>)

Venancio Cuevas Reyes² (<http://orcid.org/0000-0001-9946-3942>)

Julio Baca-Del Moral¹ (<http://orcid.org/0000-0002-2197-2517>)

¹Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México, CIR-Centro. Carretera Los Reyes-Texcoco, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, C. P. 56250, México

*Autor para correspondencia: olimpya.aguirre@yahoo.com

Resumen

El carbono orgánico del suelo (COS) desempeña un papel fundamental en la estabilidad de los agroecosistemas al actuar como un reservorio que almacena carbono atmosférico mediante la acumulación y estabilización de materia orgánica. En los sistemas agrícolas con terrazas de la Mixteca Alta Oaxaqueña, el manejo del suelo es determinante para mantener y mejorar estos reservorios. El objetivo del estudio fue evaluar y comparar el efecto de diversas prácticas agrícolas sobre el almacenamiento de COS mediante un modelo de regresión stepwise y una clasificación por percentiles aplicada a 24 parcelas agrícolas de maíz de temporal. Las variables analizadas incluyeron enmiendas orgánicas, uso de rastrojo como cobertura, descanso de la parcela, surcado al contorno, asociación de cultivos, ingreso de ganado, fertilización convencional y barreras vivas. Los resultados indican que las enmiendas orgánicas ($+16.93 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) y el uso de rastrojo ($+11.31 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) presentaron los efectos positivos más altos estimados sobre el COS, mientras que el descanso mostró un efecto negativo asociado a menor cobertura vegetal y mayor exposición del suelo. La clasificación por percentiles permitió identificar contrastes socioeconómicos y de manejo entre productores. En conjunto, las prácticas que incrementan la biomasa y la entrada de materia orgánica favorecen la recarbonización del suelo en sistemas agrícolas con terrazas.

Palabras clave: practicas tecnológicas, enmiendas orgánicas, análisis de percentiles; rastrojo, suelo en descanso.

Agricultural practices and soil organic carbon storage in terrace farming systems of the Mixteca Alta: a stepwise and percentile analysis

Abstract

Keywords: technological practices, organic amendments, percentile analysis; stubble, resting soil.

Recibido: Abril 8, 2025

Aceptado: Enero 20, 2026

Introducción

El suelo es un recurso indispensable para la agricultura, ya que sustenta la producción de alimentos y constituye un componente esencial de las funciones ecosistémicas (Jayaraman et al., 2024). El suelo es el mayor reservorio de carbono (C) terrestre en el planeta y es en su primer metro de profundidad que puede almacenar 2500 PgC, lo que representa más del triple del C presente en la atmósfera (880 PgC) y la propia vegetación terrestre (620 PgC) (Lal, 2021). El Carbono Orgánico del Suelo (COS), según Lefèvre et al. (2017), corresponde a la fracción del carbono resultante de la transformación microbiana de la materia orgánica, compuesta por una mezcla biogeoquímica de residuos vegetales y productos de descomposición en distintas etapas de estabilización.

El COS no solo mejora la fertilidad y la estructura del suelo, sino que, Burbano-Orjuela (2018) señala que también actúa como un amortiguador frente a las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, es preferible que el C permanezca almacenado en el suelo como COS, en lugar de liberarse a la atmósfera como CO₂, donde contribuye al cambio climático.

Lal (2023) define al “cultivo de carbono” como la adopción deliberada de prácticas de manejo adecuadas al sitio y el uso restaurativo de la tierra para mantener un balance positivo de carbono, favoreciendo la captura y el almacenamiento de CO₂ en el suelo y la biomasa. En este marco, el aumento del COS mejora propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, contribuyendo al almacenamiento estable de carbono relevante para los esfuerzos de mitigación climática.

Sin embargo, la mayoría de los suelos agrícolas presentan menores reservas de COS en comparación con los ecosistemas naturales (Lal et al., 2021). Esto se debe a la reducción en los aportes de biomasa, como raíces y hojarasca, así como a las pérdidas provocadas por la erosión acelerada. Dado que el COS es una fracción ligera, de baja densidad y concentrada en los primeros centímetros del suelo, es particularmente susceptible a ser removido, lo que contribuye al agotamiento del carbono orgánico en suelos propensos a la erosión.

En este sentido, Cotler et al. (2016) señalan que los niveles de COS en tierras agrícolas suelen ser más bajos que en ecosistemas naturales debido a la intensidad del manejo. A ello se suma que la erosión hídrica remueve preferentemente la fracción superficial del suelo —donde se concentra el COS—, lo que acelera su pérdida y limita la capacidad de estos suelos para actuar como sumideros de carbono. Por esta razón, en México la erosión hídrica constituye uno de los principales factores que reducen el potencial de almacenamiento de carbono en terrenos agrícolas (Aguirre-Salado et al., 2025).

Lal (2021) menciona que la captura de carbono orgánico del suelo (COS) se sustenta en tres procesos fundamentales: (i) la fijación del CO₂ atmosférico mediante fotosíntesis, que produce biomasa rica en carbono; (ii) la transferencia o aporte de esa biomasa al suelo, donde se integra como materia orgánica; y (iii) la estabilización del COS, proceso que incrementa el tiempo de residencia del carbono dentro del sistema edáfico. Sobre esta base, diversas instituciones y autores han propuesto prácticas de manejo orientadas a fortalecer dichos procesos. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) recomienda el uso de terrazas, presas de control de azolve, barreras vivas y la reducción de movimientos innecesarios del suelo como estrategias para favorecer el almacenamiento de COS.

Por otro lado, Gallardo (2021) reconoce que prácticas como la fertilización y el riego contribuyen al incremento del COS al potenciar la productividad vegetal y el aporte de residuos orgánicos al suelo. En su esquema de manejo para la captura de carbono, estas prácticas se incluyen junto con la incorporación de composta, la labranza reducida, la rotación de cultivos (particularmente con leguminosas) y el uso de coberturas orgánicas (mulching), debido a que todas ellas aumentan la entrada y estabilización del carbono en el suelo. En ese sentido, Lal (2023) señala que la agricultura de conservación con cobertura de residuos y cultivos de cobertura, la agroforestería, los sistemas agrícolas complejos basados en la integración de cultivos con árboles y ganado, así como prácticas de fertirrigación, agricultura de precisión y manejo integrado de nutrientes y plagas, forman parte de la denominada *agricultura del carbono*.

En la región de la microcuenca “El Arenal” en el municipio de san Miguel Tulancingo, dentro de la Mixteca Alta de Oaxaca se han implementado obras de conservación de suelo y agua por más de 20 años, enfocadas principalmente a la reducción de la erosión hídrica y como alternativa productiva, los terrenos agrícolas se han conformado a lo largo del tiempo mediante terrazas.

En un estudio previo realizado por Aguirre et al. (2024) se estimó la erosión hídrica en la microcuenca; también se evaluaron los almacenamientos de COS y su relación con las obras de conservación, se identificaron tres escenarios contrastantes: (i) terrenos agrícolas con terrazas sin pérdidas significativas de suelo con contenidos de COS de $\pm 58 \text{ Mg ha}^{-1}$; (ii) terrenos agrícolas bajo condiciones edafoclimáticas similares, pero con manejo menos eficiente y con almacenamiento de COS de 11.82 Mg ha^{-1} ; y (iii) áreas no agrícolas, sin obras de conservación y con suelos severamente degradados (tepetate), donde los contenidos de COS fueron mínimos (1.58 Mg ha^{-1}). Este estudio sugiere que, aunque las obras de conservación de suelo y agua contribuyen a reducir la pérdida de suelo, el manejo agrícola es determinante para mantener o agotar las reservas de COS.

El almacenamiento de carbono en suelos agrícolas con terrazas depende principalmente del uso y manejo. En consecuencia, aunque las terrazas de tierra favorecen la conservación del suelo —entendida como la retención *in situ* de materiales—, su sola presencia no garantiza niveles elevados de COS (Chen et al., 2020).

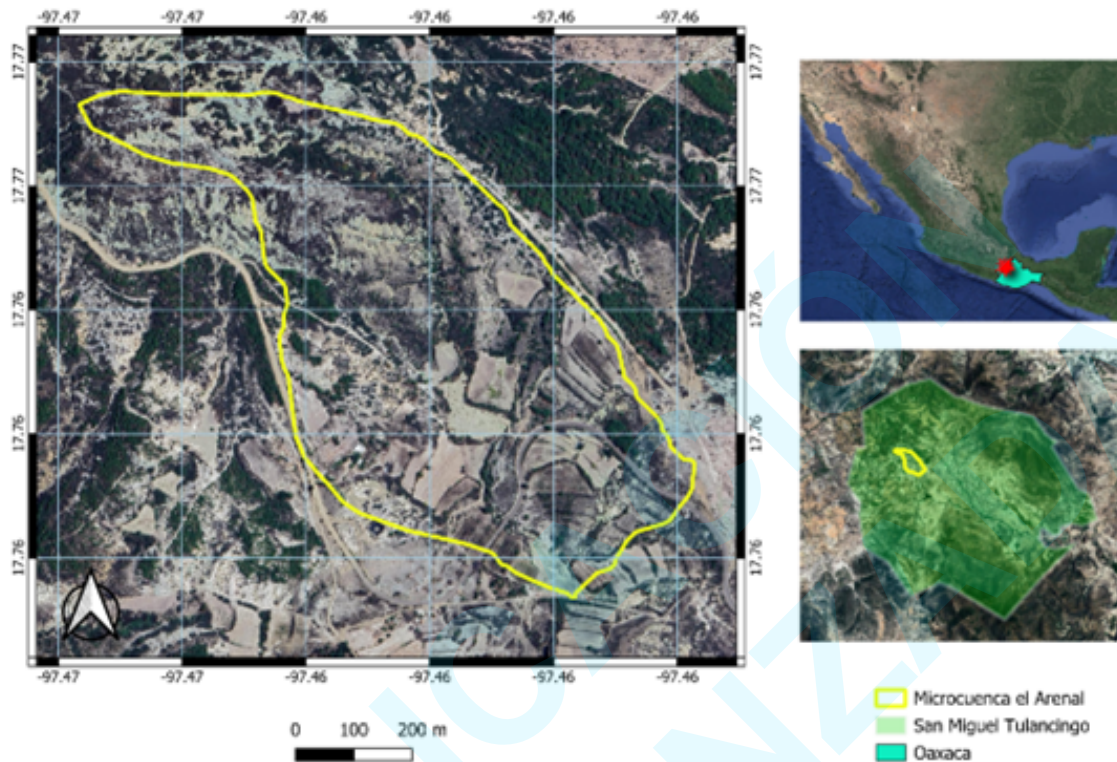
Lo anterior establece la necesidad de comparar el desempeño de las prácticas agrícolas que explican la variabilidad del COS en terrenos agrícolas establecidos sobre terrazas de tierra en la microcuenca El Arenal, con el supuesto de que, una vez determinadas, estas puedan difundirse entre los productores para ayudar a fortalecer la denominada agricultura del carbono, especialmente cuando se trata de prácticas que ya forman parte de las dinámicas locales. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar y comparar la contribución de distintas prácticas de manejo del suelo al almacenamiento de carbono orgánico del suelo en parcelas agrícolas con terrazas, mediante un análisis estadístico basado en el método *stepwise*, con el fin de determinar cuáles se asocian a la obtención de mayores niveles de COS. Adicionalmente, se realizó una caracterización de los productores de acuerdo con las reservas de COS presentes en sus parcelas, utilizando percentiles como criterio de clasificación.

El enfoque de este estudio buscó reconocer las prácticas más efectivas que se llevan a cabo en la región y así facilitar su difusión y adopción para fortalecer la agricultura del carbono.

Metodología

El área de estudio se ubicó en la microcuenca “El Arenal” perteneciente al municipio de San Miguel Tulancingo, Oaxaca (**Figura 1**). Se localiza entre las coordenadas 97°27' O y 17°45' N, a 2 200 m de altitud y tiene una superficie de 44.6 ha (Aguirre-Salado et al., 2025). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw₀) (Köppen modificada por García, 2004), con precipitación media anual de 544.7 mm y una temperatura media anual de 15.9 °C (SME, 2023). El relieve presenta pendientes predominantemente inclinadas entre 5 % y >30 %, lo que incrementa la susceptibilidad a la erosión (Aguirre-Salado et al., 2025). La cobertura vegetal es baja en gran parte de la zona, encontrando principalmente matorral espinoso y pastizales degradados, lo que contribuye a una alta vulnerabilidad del suelo a los procesos erosivos.

Figura 1. Ubicación del área de estudio, microcuenca “El Arenal”, san Miguel Tulancingo, Oaxaca.



Fuente: Elaboración propia.

El sistema agrícola predominante en la microcuenca El Arenal, es el cultivo de maíz de temporal, manejado tanto en monocultivo como en asociación tradicional con frijol, haba y calabaza. Las prácticas de manejo consideradas en este estudio como son: enmienda orgánica, descanso, surcado al contorno, uso de rastrojo, fertilización, asociación de cultivos, ingreso de ganado y barreras vivas, correspondieron a este sistema de producción y constituyen la base de la actividad agrícola local.

Estimación del Carbono Orgánico del Suelo

La superficie muestreada fue de 12.30 ha, que representa el área agrícola de la microcuenca. Se analizaron veinticuatro muestras de suelo aleatorias seleccionadas de un conjunto de setenta y siete muestras recolectadas previamente para un estudio realizado por Aguirre-Salado et al. (2024), estas muestras corresponden específicamente a las parcelas agrícolas presentes en la microcuenca, cada

una corresponde a un punto de muestreo individual de la capa superficial (0–30 cm), obtenido conforme al diseño estratificado aplicado en el estudio antes mencionado.

Análisis en laboratorio

Las muestras fueron secadas al aire libre, se desmenuzaron de forma manual y se utilizó un tamiz de 2 mm antes del análisis. La concentración de carbono orgánico ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) se determinó mediante el método de Walkley y Black (1934). La densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) se determinó mediante el método del terrón parafinado descrito por Blake & Hartge (1986). El porcentaje de fragmentos gruesos (> 2 mm) se calculó separando y cuantificando el material retenido en el tamiz, a partir de cada una de las muestras individuales. El carbono orgánico del suelo (COS) se extrapoló a $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ utilizando la fórmula propuesta por Penman et al. (2003):

$$COS = CO \cdot DAP \cdot Profundidad \cdot Fragmentos\ Gruesos \cdot 10$$

Donde **COS** es la existencia de carbono orgánico del suelo ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), **CO** es la concentración de carbono orgánico ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), **DAP** es la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (masa del suelo por unidad de volumen en la fracción fina), **Profundidad** corresponde a la profundidad o grosor de la capa de suelo muestreada (m) y **Fragmentos Gruesos** que es el factor de ajuste que tiene en cuenta el volumen de fragmentos gruesos, calculado como $1 - (\% \text{ volumen de fragmentos gruesos}/100)$ y el multiplicador 10 que convierte las unidades a $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Los resultados se interpolaron con la herramienta Smart-Map, instalada desde el repositorio de complementos de QGIS de acuerdo con Pereira et al. (2022). Posteriormente se generaron polígonos en las parcelas agrícolas, se recortaron y se obtuvo un valor promedio del *raster* para cada parcela.

Instrumento de recolección de datos cualitativos

La recolección de datos se realizó conforme a lo establecido por Hernández-Sampieri & Mendoza (2020), entendida como la aplicación de uno o varios instrumentos de medición para obtener información pertinente de las variables del estudio en los casos seleccionados. Se construyó un cuestionario, diseñado con base en las variables indicadoras o prácticas agrícolas que de acuerdo con Gallardo (2021), puede explicar las diferencias de los niveles de COS por parcela: rotación de

cultivos, cobertura del suelo (rastrajo), aplicación de enmiendas orgánicas, periodos de descanso de la parcela, tipo de labranza, surcado en contorno, fertilización química, asociación de cultivos y presencia de barreras vivas. Se generaron veinte reactivos con respuestas abiertas y cerradas, los cuales se aplicaron a los propietarios de los terrenos, posteriormente se procedió a la codificación y análisis de datos.

Variables predictoras del almacenamiento de COS

Las prácticas agrícolas evaluadas como variables predictoras del almacenamiento de COS se desarrollaron exclusivamente dentro del sistema de maíz de temporal presente en todas las parcelas analizadas. Aunque algunos productores siembran ocasionalmente trigo o frijol, las prácticas registradas (enmienda orgánica, descanso de la parcela, aplicación de rastrojo, fertilización química, ingreso de ganado, asociación de cultivos, surcado al contorno y barreras vivas) se aplicaron únicamente al cultivo de maíz o a su sistema asociado tradicional (milpa). Por ello, su definición y análisis estadístico se circunscriben a este sistema agrícola.

Las variables consideradas en el análisis *stepwise* correspondieron a prácticas de manejo que influyeron en los niveles de COS en terrenos agrícolas con terrazas (Gallardo, 2021; Chen et al., 2020) y a continuación se describen:

1. **Enmienda orgánica:** aplicación de aproximadamente 3 t·ha⁻¹ de estiércol fresco de borrego cada tres años.
2. **Descanso de la parcela:** periodo en el que una parcela permanece sin cultivar. En los terrenos analizados, al menos un año de descanso durante los últimos cinco años.
3. **Surcado al contorno:** preparación de surcos siguiendo las curvas de nivel, práctica orientada a reducir la erosión e incrementar la infiltración de agua.
4. **Aplicación de rastrojo:** permanencia del 15–30 % de los residuos de la cosecha anterior sobre la superficie del suelo.
5. **Ganado en parcela:** ingreso de animales para el consumo de rastrojo remanente de la cosecha anterior.

6. **Fertilización química:** aplicación del fertilizante fosfatado DAP (18-46-00), reportado en las entrevistas.
7. **Asociación de cultivos:** combinación tradicional de maíz, frijol, haba y calabaza dentro del sistema milpa.
8. **Barreras vivas:** establecimiento de hileras de árboles de ocote como estructura de conservación de suelo, a una distancia de 3 m entre árboles.

Otras prácticas reportadas por los productores como la rotación de cultivos, el riego, el uso de semillas criollas o mejoradas, la incorporación de abonos verdes, se descartaron del análisis debido a su baja representatividad estadística y a una contribución limitada a la variabilidad del modelo. Su exclusión no afectó de manera significativa el desempeño del modelo, aspecto que se sustenta por los valores del R^2 y el R^2 ajustado.

Análisis estadístico (Stepwise)

El modelo de regresión por pasos es una técnica estadística que selecciona sistemáticamente variables independientes paso a paso para construir una ecuación de regresión. De acuerdo con Li et al. (2024) este proceso implica incorporar u omitir variables gradualmente para determinar la combinación óptima que ejerce el impacto más notable en la variable dependiente, estableciendo así la ecuación de regresión más efectiva, este proceso de modelado no solo considera las correlaciones entre las variables independientes, sino que, también gestiona hábilmente la complejidad del modelo, evitando así problemas de sobreajuste.

El método *stepwise* es ampliamente utilizado en el análisis exploratorio y en el modelado predictivo, debido a que permite seleccionar, de un conjunto amplio de variables independientes, aquellas que aportan una mayor capacidad explicativa al modelo. En este estudio, el procedimiento se ejecutó con el programa R versión 4.4.2 (R Core Team, 2024), utilizando la función *step()* del paquete *stats*, la cual implementa algoritmos de selección automática de predictores basados en criterios de información.

El modelo inicial incorporó las ocho prácticas agrícolas registradas en las parcelas. El procedimiento se aplicó bajo un enfoque bidireccional, permitiendo la inclusión y exclusión

sucesiva de variables. Como criterio de selección se empleó el Criterio de Información de Akaike (AIC), mediante el cual el algoritmo identifica el modelo con el menor valor de AIC, evaluando de manera iterativa la contribución estadística de cada predictor.

Análisis Percentil

Siguiendo el enfoque de clasificación propuesto por Cuevas et al. (2013), quienes emplearon percentiles para ordenar unidades de producción según su nivel de adopción tecnológica, en esta investigación se aplicó una adaptación del mismo método para agrupar las unidades de producción agrícola con base en sus niveles de carbono orgánico del suelo (COS). Esta clasificación permitió organizar las unidades en grupos comparables y evaluar si existen diferencias en el almacenamiento de carbono entre productores con características socioeconómicas distintas.

El uso de percentiles y su agrupación posterior en cuartiles de acuerdo con Walpole (2012), quien señala que este método divide la distribución en segmentos detallados y aporta información robusta sobre los valores extremos, facilitando la caracterización de grupos de acuerdo con criterios específicos. Para este estudio, los percentiles del COS se reorganizaron en cuatro cuartiles: 1° Cuartil (Q1: percentiles 1–25, valores más bajos), 2° Cuartil (Q2: percentiles 26–50), 3° Cuartil (Q3: percentiles 51–75) y 4° Cuartil (Q4: percentiles 76–100, valores más altos).

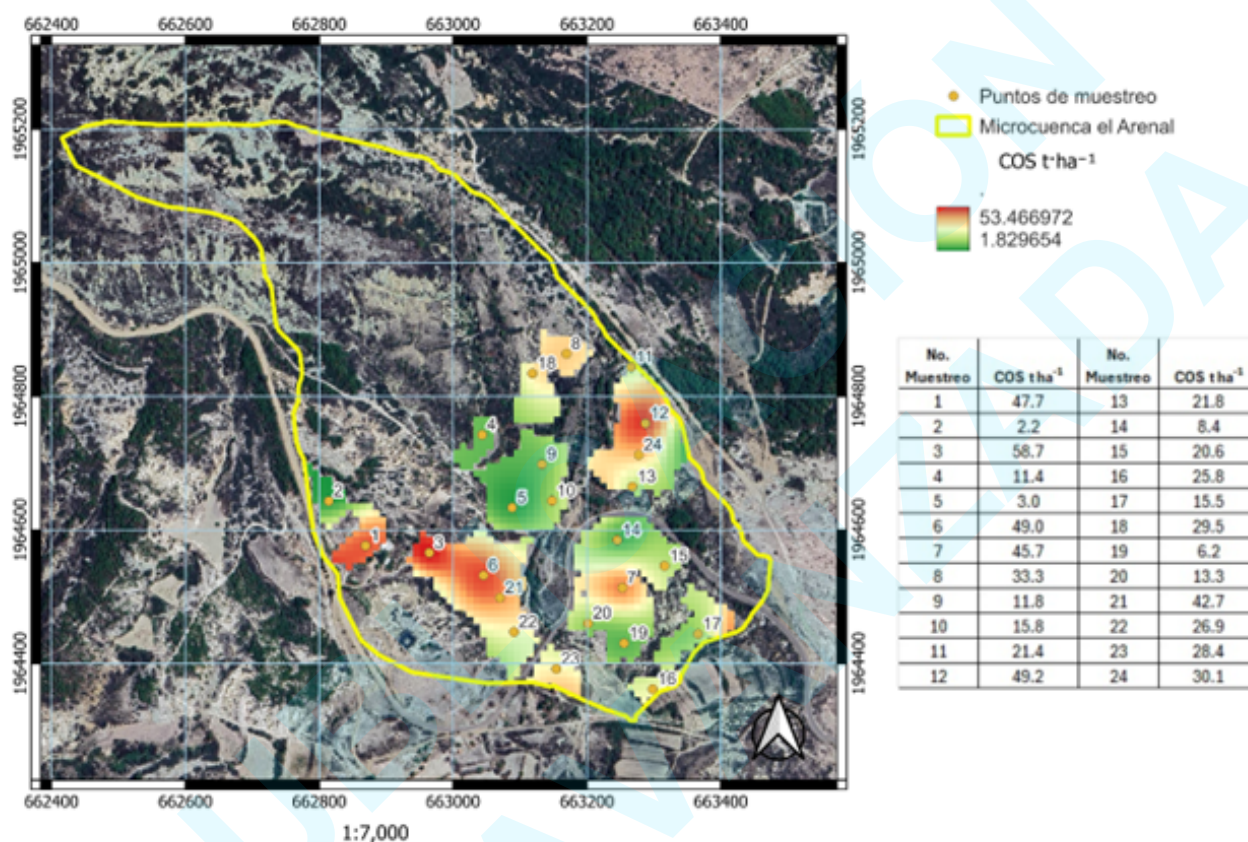
Resultados y Discusión

Estimación del COS en las parcelas agrícolas

La distribución espacial del COS en los terrenos agrícolas de la microcuenca El Arenal se muestran en la **Figura 2**. Los valores registrados en los 24 sitios de muestreo oscilaron entre 2.2 y 58.7 t·ha⁻¹, con una mediana de 21.8 t·ha⁻¹, estos resultados revelaron una marcada heterogeneidad en el

almacenamiento de carbono. Esta variabilidad coincide con lo señalado por Aguirre-Salado et al. (2024), quienes indicaron que el COS encontrado en la microcuenca responde principalmente al uso/coertura del suelo y a las prácticas de conservación implementadas.

Figura 2. Distribución espacial del COS ($t \cdot ha^{-1}$) en los veinticuatro sitios de muestreo de la microcuenca El Arenal.



Fuente: Elaboración propia

Aunque todas las parcelas se ubicaron sobre terrazas agrícolas con pendientes menores al 5 %, condición que homogenizó la posición fisiográfica, los contrastes observados indicaron diferencias claras en el manejo (aplicación de enmiendas, remoción del suelo, manejo del rastrojo y frecuencia de cultivo). Estos resultados coinciden con lo reportado por Yescas-Coronado et al. (2018), quienes atribuyen que este tipo de variabilidad de COS en sistemas agrícolas se debe a la intensidad y tipo de manejo que existe, más que a los factores edáficos o topográficos.

La pendiente tampoco explicó la variación encontrada ya que, al tratarse de terrazas, no se esperaba que esto influyera significativamente en los niveles de COS, lo cual coincide con Gadisa & Hailu

(2020), quienes encontraron relaciones no significativas entre la pendiente y almacenamiento de carbono. Además, estudios previos realizados en la zona de estudio muestran que las mayores reservas de COS se concentraron en donde la erosión hídrica era menor y con mayor cobertura vegetal (Aguirre-Salado et al., 2025), confirmando así que, la heterogeneidad espacial observada respondió principalmente al manejo diferenciando entre productores.

Variables relevantes en el almacenamiento de COS

El modelo ajustado *Stepwise* evaluó cómo las diferentes prácticas agrícolas explicaron la variación del COS encontrada. En el Cuadro 1, se muestran las variables explicativas más relevantes. La variable intercepto, sirve como punto de referencia para interpretar el efecto de las variables predictoras e indica que cuando las variables son cero, el valor estimado del COS es de 14.12 t·ha⁻¹.

Cuadro 1. Resultados del análisis estadístico Stepwise

Variable	Estimación COS t·ha ⁻¹	Error Estándar	Valor t	Valor p	Significancia
Intercepto	14.12	4.54	3.11	0.01	**
Enmienda	16.93	4.73	3.58	0.00	**
Descanso de parcela	-8.61	4.25	-2.03	0.06	.
Surcado al contorno	3.54	5.01	0.71	0.49	
Aplicación de rastrajo	11.31	5.09	2.22	0.04	*
Ganado en parcela	5.97	5.19	1.15	0.27	
Fertilización química	-1.00	5.58	-0.18	0.86	
Asociación de cultivos	-3.77	6.46	-0.58	0.57	

Barrera viva	0.37	5.24	0.07	0.94
--------------	------	------	------	------

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, $p < 0.1$

La variable enmienda tuvo un efecto positivo y significativo sobre el COS ($\beta = 16.93 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $p < 0.01$), lo que indica que la aplicación de estiércol contribuye sustancialmente al aumento del carbono en las parcelas evaluadas. Este resultado coincide con lo reportado por Yescas et al. (2018), quienes documentaron incrementos de COS en sistemas agrícolas con incorporación regular de abonos orgánicos. De acuerdo con Curien et al. (2021), este efecto se explica porque los estiércoles con mayor proporción de fracciones sólidas y carbono de lenta descomposición aportan carbono más estable, favoreciendo su permanencia en el suelo. La evidencia es consistente con estudios que destacan que las enmiendas orgánicas mejoran las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, lo que contribuye indirectamente al aumento y estabilidad del COS (Bautista et al., 2017; Cesarano et al., 2017; Murillo et al., 2020). En este estudio, la aplicación de $3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de estiércol fresco de borrego cada tres años resultó significativa en un 99%, lo que indica una gran importancia del uso de enmiendas orgánicas como práctica efectiva para incrementar y conservar el carbono en suelos agrícolas.

La aplicación de rastrojo mostró un efecto positivo y significativo sobre el COS ($\beta = 11.31 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $p < 0.05$), lo que mostró que el retorno de residuos de cosecha contribuye directamente al incremento de carbono en las parcelas evaluadas. Este aumento es congruente con lo que obtuvieron Chen et al. (2015), quienes encontraron que los rastrojos aportan carbono particulado y fracciones orgánicas de descomposición lenta que se integran a la matriz del suelo, favoreciendo la estabilización del COS y reduciendo su mineralización. Asimismo, Shinde et al. (2022) señalan que los residuos de cultivos constituyen una fuente clave de carbono orgánico y nutrientes, y que su permanencia en superficie promueve la formación de agregados estables y disminuye la pérdida de suelo, procesos que contribuyen a retener carbono en el horizonte superficial. Por otro lado, Lal (2003) indica que la reincorporación de biomasa excedente respecto a la capacidad de mineralización del suelo es una estrategia fundamental para incrementar las reservas de carbono edáfico. En conjunto, estas evidencias explican que la incorporación de rastrojo en las parcelas estudiadas se asoció con un aumento significativo del COS, respaldando así la eficacia al implementar esta práctica como un mecanismo clave de conservación y así mejorar del carbono en suelos agrícolas.

El descanso de la parcela consiste en dejar el terreno sin cultivar durante un periodo determinado. En el presente estudio, esta práctica se asoció con una disminución del COS. Aunque el efecto no fue significativo al 5%, presentó una tendencia marginal ($p < 0.1$), lo que sugiere un posible impacto negativo. Esto puede atribuirse a las condiciones de baja precipitación en la zona, lo que ocasiona que la vegetación natural no logre desarrollarse lo suficiente durante el periodo de descanso. La escasa cobertura existente reduce notablemente los aportes de biomasa al suelo y deja la superficie expuesta, lo que resulta en un incremento de la susceptibilidad a procesos erosivos (hídrico y eólico) y favorece la mineralización del carbono almacenado. Lo anterior coincide con lo reportado por Jiao et al. (2020), quienes señalan que la falta de cobertura y una limitada incorporación de materia orgánica durante los periodos de abandono agrícola contribuye a la disminución de las reservas de COS.

Por otro lado, el surcado al contorno, el pastoreo del ganado en la parcela, la fertilización química, la asociación de cultivos y las barreras vivas, no mostraron una relación significativa con el COS en el modelo final ($p > 0.05$). Aunque pudieran influir en el nivel de COS, estas prácticas no explicaron de manera suficiente la variabilidad observada en este análisis.

Indicadores de ajustes del modelo

El modelo *Stepwise* mostró un ajuste robusto, con un R^2 de 83.99%, lo que indicó que el conjunto de prácticas agrícolas que se utilizan en la zona de estudio explica cerca del 84% de la variabilidad del COS. El R^2 ajustado (75.45%) confirma que, aun considerando el número de predictores incluidos, el modelo mantiene una capacidad explicativa sólida. La significancia global ($F=9.834$, $p < 0.001$) mostró que el modelo es estadísticamente válido y que las prácticas agrícolas incorporadas contribuyeron de manera conjunta al almacenamiento de carbono. Entre las variables más influyentes destacaron aquellas relacionadas con la incorporación de biomasa al suelo principalmente la enmienda orgánica y el manejo del rastrojo, mientras que prácticas con baja aportación de cobertura mostraron efectos menos favorables.

El uso de un modelo *Stepwise* en este estudio fue metodológicamente pertinente, ya que este enfoque demostró ser una herramienta eficaz para depurar y seleccionar los predictores con mayor capacidad explicativa del COS en sistemas agrícolas. De acuerdo con encontrado por Li et al. (2024), la regresión *stepwise* permite identificar con precisión las variables realmente

determinantes, evitando la inclusión de predictores redundantes y optimizando la estructura final del modelo. Esta evidencia respalda la validez estadística del procedimiento utilizado en esta investigación y refuerza la solidez interpretativa de los resultados obtenidos. Por otro lado, Wu & Cai (2012) destacan que las prácticas de manejo vinculadas a la incorporación de residuos y enmiendas orgánicas influyen de manera decisiva en la acumulación y variabilidad del carbono orgánico en suelos agrícolas, lo cual coincide con lo observado para estas variables en este estudio.

Frecuencia de prácticas agrícolas en los 24 sitios evaluados

La adopción de prácticas agrícolas mostró una marcada heterogeneidad entre los 24 sitios analizados. El surcado al contorno fue la práctica más frecuente (20 sitios; 83.3%), seguido del manejo de rastrojo (14 sitios; 58.3%), los periodos de descanso (13 sitios; 54.2%) y las barreras vivas (13 sitios; 54.2%). El ingreso de ganado y la asociación de cultivos se registraron en 11 sitios (45.8% cada uno). La enmienda orgánica se aplicó en 8 sitios (33.3%) y la fertilización química con DAP en 7 sitios (29.2%). Estos patrones de adopción permiten contextualizar la representatividad de cada práctica y muestran la variabilidad estructural del manejo agrícola dentro de la microcuenca.

Descripción del entorno socioeconómico según los niveles de COS por percentiles

La población productora asociada a los 24 sitios agrícolas evaluados presentó un rango de edad entre 35 y 69 años, con un promedio cercano a los 57 años. La participación masculina Predominó en las labores agrícolas y el tamaño de las parcelas osciló entre 0.25 y 1 ha (promedio ≈ 0.46 ha). El número de integrantes del hogar que participan directamente en las actividades productivas osciló entre 1 y 8 personas.

Los productores forman parte de un sistema de agricultura familiar de subsistencia (AFS), en el que la producción se destina principalmente al autoconsumo y las actividades agrícolas se desarrollan en parcelas pequeñas con participación directa de los integrantes del hogar. Este contexto socioeconómico permite interpretar las decisiones de manejo observadas en los 24 sitios evaluados y aporta elementos para comprender la variabilidad en los niveles de COS.

A continuación, se presentan los resultados del análisis socioeconómico, orientado a identificar las características de los productores que se relacionaron con una mayor o menor capacidad de almacenamiento de COS.

1° Cuartil con percentiles de 1 al 25. Este grupo tuvo los niveles más bajos de COS (entre 2.17 t·ha⁻¹ y 11.817 t·ha⁻¹). Los productores en este grupo tenían parcelas más pequeñas (≤ 0.25 ha) y una menor diversidad de cultivos, predominando maíz y frijol. No realizaron prácticas como la aplicación de enmiendas orgánicas o el uso de fertilizantes químicos (18-46-00). La mayoría no dejó rastrojo en el terreno, retirándolo completamente para uso como forraje. Los rendimientos agrícolas registrados en este grupo fueron los más bajos, con valores cercanos a 300 kg·ha⁻¹, significativamente inferiores al promedio general de 566 kg·ha⁻¹.

2° Cuartil: Percentiles 26 al 50: Este grupo tuvo niveles intermedios-bajos de COS (entre 13.347 t·ha⁻¹ y 21.79 t·ha⁻¹). Los productores tenían parcelas con una extensión promedio de 0.5 ha y mostraron una leve mejora en el manejo agrícola en comparación con el primer cuartil. Algunos aplicaron fertilizantes químicos como 18-46-00 y enmiendas orgánicas de manera limitada, además de dejar un 15% de rastrojo en el terreno, lo que contribuyó parcialmente a la acumulación de materia orgánica. Aunque el descanso del suelo se realizó de forma más regular (cada 4 a 6 años), su manejo fue inconsistente y no siempre se combinó con prácticas sustentables. Los rendimientos agrícolas fueron moderados, con valores aproximados a 450 kg·ha⁻¹ para maíz, acercándose al promedio, pero aún limitados por la falta de un manejo integral del suelo. La principal diferencia con el primer cuartil es que este grupo comenzó a adoptar prácticas como el surcado al contorno y el uso parcial de rastrojo, las cuales favorecieron a la fertilidad del suelo y los niveles de COS.

3° Cuartil: Percentiles 51 al 75: Este grupo tuvo niveles intermedios-altos de COS (entre 25.766 t·ha⁻¹ y 33.316 t·ha⁻¹), marcando una clara mejora en el manejo agrícola respecto al primero y segundo cuartil. Los productores tenían parcelas de tamaño promedio (0.5 ha) y adoptaron prácticas más sustentables, por ejemplo, el uso más frecuente de enmiendas orgánicas (estiércol aplicado cada 2-3 años) y la incorporación de rastrojo en proporciones de 15-30%. Además, dejaron desacansar sus tierras regularmente (cada 4 años) y emplearon el surcado al contorno como una práctica común, lo que ayudó a conservar el suelo y mejorar la fertilidad. Estas prácticas permitieron obtener rendimientos más altos de 500-600 kg·ha⁻¹ para maíz, que se encuentran al nivel del promedio. En comparación con los cuartiles inferiores, los agricultores del tercer cuartil

combinaron el manejo de rastrojo, enmiendas y descanso, promoviendo así una mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo, aunque con esto no alcanzaron el nivel óptimo de eficiencia agrícola. Lo anterior sugiere que, el descanso por sí solo no es suficiente para aumentar los niveles de COS; su impacto positivo depende del manejo durante el periodo de inactividad agrícola. Esto confirma el hecho de que si, el descanso del suelo no está acompañado por un manejo adecuado, no solo puede ser ineficaz, sino que incluso puede reducir los niveles de carbono en el suelo.

4° Cuartil: Percentiles 76 al 100: Este grupo obtuvo los niveles más altos de COS (entre 42.73 t·ha⁻¹ y 58.687 t·ha⁻¹) e implementó el manejo más avanzado y sustentable en las parcelas. Los productores, generalmente con parcelas de 0.5-1 ha, realizaron un uso intensivo de enmiendas orgánicas (hasta 4 camiones de estiércol cada 2 años), descansaron el suelo durante periodos más largos (5 años o más), y dejaron el 30% del rastrojo en el terreno, lo que potenció la acumulación de materia orgánica. Además, combinaron estas prácticas con el surcado al contorno y asociaciones de cultivos como maíz-frijol-haba-calabaza, maximizando así el aprovechamiento del suelo y los recursos. Los rendimientos agrícolas fueron los más altos, con valores de 600-700 kg·ha⁻¹ para maíz, superando el promedio. A diferencia de los cuartiles inferiores, los productores del cuarto cuartil lograron un manejo integral del suelo, implementando prácticas sustentables que no solo aumentaron el nivel de COS, sino que también mejoraron la productividad y la sostenibilidad a largo plazo.

El análisis de los cuartiles muestra cómo las prácticas agrícolas, el manejo del suelo y los sistemas de producción están relacionados con los niveles de COS obtenidos en parcelas familiares de subsistencia. Los resultados revelaron que, en promedio, los productores encuestados tuvieron 60 años y en su mayoría fueron hombres (90 %). Se identificó que tienen una agricultura familiar de subsistencia (AFS), dedicada exclusivamente al autoconsumo.

La superficie promedio por productor fue de 0.5 ha, el cultivo principal fue el maíz de temporal en todas las parcelas estudiadas, mientras que el trigo y el frijol se siembran únicamente como cultivos secundarios, ya sea en rotación o en asociación dentro del sistema milpa. Con base en la información recabada en los cuestionarios, los rendimientos promedio fueron de 566 kg·ha⁻¹ para maíz, y en los casos donde se sembraron cultivos complementarios fue de 466 kg·ha⁻¹ para trigo y 12.5 kg·ha⁻¹ para frijol, que se destinan principalmente al autoconsumo familiar. Sin embargo, el principal valor económico asociado a estas actividades proviene del manejo del rastrojo, ya que los

productores llegan a obtener entre 60 y 80 pacas·ha⁻¹, con un valor estimado por paca de \$80 a \$100 pesos mexicanos. Debido a esto, el rastrojo se retira completamente de las parcelas para su uso como forraje, principalmente para la alimentación de animales durante el año.

En términos de costos, la producción de maíz implica un gasto promedio de \$7,532 pesos mexicanos por hectárea, considerando el uso de maquinaria y jornales. A pesar de estos costos, el balance económico se equilibra gracias al valor del forraje producido; por ejemplo, 80 pacas valoradas en \$100 pesos mexicanos cada una representan \$8,000 pesos mexicanos, lo que compensa la inversión realizada en el cultivo. Este enfoque resalta la importancia del rastrojo como un recurso clave para la sostenibilidad económica de estos sistemas agrícolas familiares, sin embargo, también explica, lo difícil que ha sido establecer sistemas sustentables que favorezcan la cobertura del suelo con el rastrojo de la cosecha anterior. Los resultados muestran además, que las unidades de producción con mayor cantidad de carbono almacenado son las que cuentan con mayor cantidad de recursos (tierra agrícola disponible), en este sentido, los apoyos gubernamentales para pequeños productores son necesarios para poder compensar el costo económico de venta de los residuos de cosecha *versus* el beneficio ambiental por secuestro de carbono, esto muestra que la producción agrícola con prácticas con enfoque regenerativo puede ser susceptible a la obtención de apoyos gubernamentales a través de los pagos de servicios ambientales por una mayor cantidad de COS.

Este estudio contribuye con la evaluación de prácticas de manejo que permiten un mayor almacenamiento de COS en condiciones de agricultura de secano y pequeños productores agrícolas, lo cual coincide con otros estudios que mencionan que la restauración del COS agotado es posible a través de diversas estrategias como: la conversión de tierras marginales en usos restauradores, la promoción de prácticas de labranza reducida o cero combinadas con cultivos de cobertura o de residuos, la implementación del ciclo de nutrientes a través del compostaje, la aplicación de estiércol y otras técnicas de gestión sustentable del suelo y el agua. El secuestro de carbono a largo plazo en el suelo se considera cada vez más como una estrategia integral para combatir el cambio climático (Nazir et al., 2024).

Conclusiones

El manejo del suelo mostró ser un factor determinante en la obtención de los niveles de carbono orgánico del suelo (COS). Las prácticas que incrementan la incorporación de biomasa como la aplicación de enmiendas orgánicas, el manejo parcial del rastrojo y el surcado al contorno, se asociaron con mayores niveles de COS, mientras que la ausencia de estas prácticas y el retiro total del rastrojo explicaron los valores más bajos.

El análisis por cuartiles confirmó que los niveles más altos de COS se concentran en parcelas que adoptan prácticas sustentables de manejo, mientras que los niveles más bajos corresponden a unidades donde dichas prácticas están ausentes o son limitadas. La producción agrícola opera bajo esquemas de agricultura familiar de subsistencia, con rendimientos modestos y un fuerte peso del rastrojo en el balance económico, lo que condiciona las decisiones de manejo.

En conjunto, los resultados evidencian que la adopción consistente de prácticas sustentables puede fortalecer la fertilidad del suelo y su capacidad de actuar como sumidero de carbono. Este enfoque representa una oportunidad para orientar estrategias de manejo y para el diseño de incentivos que favorezcan prácticas agrícolas más resilientes y ambientalmente eficientes en contextos de agricultura familiar.

Referencias

Aguirre-Salado, C. A., Pérez-Nieto, J., Aguirre-Salado, C. A., & Monterroso-Rivas, A. I. (2024). Factors regarding the spatial variability of soil organic carbon in a Mexican small watershed. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 41(1). [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v41.n1.01](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v41.n1.01)

Aguirre-Salado, O. T., Pérez-Nieto, J., Aguirre-Salado, C. A., & Monterroso-Rivas, A. I. (2025). Assessing the interaction between water erosion and SOC storage in a small Mexican watershed. *Ingeniería e Investigación*, 45(1), e113022. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.113022>

Bautista-Zamora, D., Chavarro-Rodríguez, C., Cáceres-Zambrano, J., & Buitrago-Mora, S. (2017). Efecto de la fertilización edáfica en el crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* cv. ICA Cerinza. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 122–132. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5496>

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (pp. 363–375). ASA–SSSA.

Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82–96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>

Cesarano, G., De Filippis, F., La Stora, A., Scala, F., & Bonanomi, G. (2017). Organic amendment type and application frequency affects crop yields, soil fertility and microbiome composition. *Applied Soil Ecology*, 120, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.017>

Chen, D., Wei, W., Daryanto, S., & Tarolli, P. (2020). Does terracing enhance soil organic carbon sequestration? A national-scale data analysis in China. *Science of the Total Environment*, 721, 137751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137751>

Chen, Z. D., Zhang, H. L., Dikgwatlhe, S. B., Xue, J. F., Qiu, K. C., & Tang, H. M. (2015). Soil carbon storage and stratification under different tillage/residue-management practices in a double rice cropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1551–1560. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61068-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61068-1)

Cotler, H., Martínez, M., & Etchevers, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125–138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100125

Cuevas-Reyes, V., Baca-del-Moral, J., Cervantes-Escoto, F., Espinosa-García, J. A., Aguilar-Ávila, J., & Loaiza-Meza, A. (2013). Factores que determinan el uso de innovaciones tecnológicas en la ganadería de doble propósito en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(1), 31–46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265625754005>

Curien, M., Issanchou, A., Degan, F., Manneville, V., Saby, N. P. A., & Dupraz, P. (2021). Spreading herbivore manure in livestock farms increases soil carbon content, while granivore manure decreases it. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00707-8>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (2020). *Recarbonización de los suelos del mundo*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca6522es/CA6522ES.pdf>

Gadisa, S., & Hailu, L. (2020). Effect of level soil bund and Fanya Juu on soil physico-chemical properties and farmers' adoption towards the practice in Dale Wabera District, western Ethiopia. *American Journal of Environmental Protection*, 9(5), 107–120. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20200905.12>

Gallardo, L. J. (2021). Manejos edáficos óptimos y captura de carbono: Con referencia a suelos de Iberoamérica. *Industria Química*, 92, 74–82. https://www.academia.edu/49973332/Manejos_ed%C3%A1ficos_%C3%B3ptimos_y_captura_de_carbono_con_referencia_a_suelos_de_Iberoam%C3%A9rica

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

Jayaraman, S., Naorem, A., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Rao, C. S., Lal, R., & Singh, A. K. (2024). No-till farming and climate change mitigation: Lessons learnt from long-term no-till experiments

and future perspectives. *Advances in Agronomy*, 187, 21–107.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.05.005>

Jiao, S., Li, J., Li, Y., Xu, Z., Kong, B., Li, Y., & Shen, Y. (2020). Variation of soil organic carbon and physical properties in relation to land uses in the Yellow River Delta, China. *Scientific Reports*, 10(1), 20317. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77166-4>

Lal, R. (2003). Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation & Development*, 14, 309–322.
<https://doi.org/10.1002/ldr.562>

Lal, R. (2021). Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil*, 38(3), 231–237. <https://doi.org/10.1080/02571862.2021.1891474>

Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20210084.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>

Lal, R. (2023). Carbon farming by recarbonization of agroecosystems. *Pedosphere*, 33(5), 676–679. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.07.024>

Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo: El potencial oculto*. FAO. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29070>

Li, W., Yang, Z., Jiang, J., & Sun, G. (2024). Spatial variation and stock estimation of soil organic carbon in cropland in the Black Soil Region of Northeast China. *Agronomy*, 14(11), 2744.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14112744>

Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., & Fadul-Vásquez, C. J. (2020). The importance of organic amendments in soil conservation and agricultural production. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58–68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>

Nazir, M. J., Li, G., Nazir, M. M., Zulfikar, F., Siddique, K. H. M., Iqbal, B., & Du, D. (2024). Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 237, 105959. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105959>

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., & Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. 590 p. <https://bit.ly/49TLAcL>.

Pereira, G. W., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M., Coelho, A. L. F., Costa, M. M., & Grift, T. (2022). Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. *Agronomy*, 12(6), 1350. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>

Servicio Meteorológico Nacional (SME). (2023). *Normales climatológicas 1981–2010 (Sistema CLICOM)*. CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx>

Shinde, R., Shahi, D. K., Mahapatra, P., Singh, C. S., Naik, S. K., Thombare, N., & Singh, A. K. (2022). Management of crop residues with special reference to on-farm utilization methods: A review. *Industrial Crops and Products*, 181, 114772. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114772>

Walkley, A., & Black, C. 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. <https://bit.ly/3sNZEUJ>

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (53a ed.). Pearson Educación. 742 p.

Wu, L., & Cai, Z. (2012). Key variables explaining soil organic carbon content variations in croplands and non-croplands in Chinese provinces. *Chinese Geographical Science*, 22(3), 255–263. <https://doi.org/10.1007/s11769-012-0531-3>

Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna V.P., Segura-Castruita, M.A., González-Cervantes, G., García-Carrillo, M., y Hernández-Hernández, V. (2018). Análisis Temporal Del Contenido De Carbono orgánico Del Suelo En Una región árida de México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 9(6). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1583>.