



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

^{ORCID} **Olimpya Talya Aguirre-Salado^{1*}**; ^{ORCID} **Joel Pérez-Nieto¹**;
^{ORCID} **Venancio Cuevas-Reyes²**; ^{ORCID} **Julio Baca-Del Moral¹**

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, Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, C. P. 56250, México

*Corresponding author: olimpya.aguirre@yahoo.com

Abstract

Soil organic carbon (SOC) has a fundamental role in the stability of agroecosystems by serving as a reservoir that stores atmospheric carbon through the accumulation and stabilization of organic matter. In terraced agricultural systems of the Mixteca Alta Oaxaqueña, soil management is determinant to maintain and improve these reservoirs. The aim of this study was to evaluate and compare the effects of different agricultural practices on SOC storage using a stepwise regression model and a percentile ranking applied to 24 rainfed corn plots. The analyzed variables included organic amendments, use of stubble as coverage, plot following, contour furrowing, crop association, livestock entry, conventional fertilization and live barriers. Results indicate that organic amendments (+16.93 t·ha⁻¹) and the use of stubble (+11.31 t·ha⁻¹) presented the highest estimated positive effects on SOC, while plot following showed a negative effect associated to lower vegetation cover and higher soil exposure. The percentile ranking allowed the identification of socioeconomic and management contrasts among producers. Overall, practices that increase biomass and organic matter input favor soil recarbonization in terraced agricultural systems.

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

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

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 t·ha⁻¹) y el uso de rastrojo (+11.31 t·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.

Please cite this article as follows (APA 7): Aguirre-Salado, O. T., Pérez-Nieto, J., Cuevas-Reyes, V., & Baca-Del Moral (2026). Agricultural practices and soil organic carbon storage in terrace farming systems of the Mixteca Alta: a stepwise and percentile analysis. *Revista de Geografía Agrícola*, 75. e25002. doi: <https://doi.org/10.5154/r.ga.2025.04.002>

Received: April 8, 2025 | Accepted: January 20, 2026 | Published online: February 27, 2026

Introduction

Soil is an indispensable resource for agriculture, as it supports food production and is an essential component of ecosystem functions (Jayaraman et al., 2024). Soil is the largest terrestrial carbon (C) reservoir on the planet, and it is in its first meter of depth that it can store 2500 PgC, which represents more than three times the C present in the atmosphere (880 PgC) and terrestrial vegetation itself (620 PgC) (Lal, 2021). Soil Organic Carbon (SOC), according to Lefèvre et al. (2017), corresponds to the fraction of carbon resulting from the microbial transformation of organic matter, composed of a biogeochemical mix of plant residues and decomposition products at different stages of stabilization.

SOC not only improves soil fertility and structure, but Burbano-Orjuela (2018) points out that it also acts as a buffer against greenhouse gas emissions. In this context, it is preferable that C remains stored in the soil as SOC, rather than being released into the atmosphere as CO₂, where it contributes to climate change.

Lal (2023) defines “carbon farming” as the deliberate adoption of site-appropriate management practices and restorative land use to maintain a positive carbon balance, favoring the uptake and storage of CO₂ in soil and biomass. In this framework, increased SOC improves physical, chemical and biological properties of the soil, contributing to stable carbon storage, relevant to climate mitigation efforts.

However, most agricultural soils have lower SOC reserves compared to natural ecosystems (Lal et al., 2021). This is due to reduced biomass inputs, such as roots and leaf litter, as well as losses caused by accelerated erosion. Since SOC is a light fraction, of low density and concentrated in the first few centimeters of the soil, it is particularly susceptible to removal, which contributes to organic carbon depletion in erosion-prone soils.

In this regard, Cotler et al. (2016) point out that SOC levels in agricultural lands are usually lower than in natural ecosystems due to the intensity of management. In addition, water erosion preferentially removes the surface fraction of the soil, —where SOC is concentrated—, which accelerates its loss and limits the capacity of these soils to act as carbon sinks. For this reason, in Mexico, water erosion is one of the

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

main factors that reduce carbon storage potential of agricultural soils (Aguirre-Salado et al., 2025).

Lal (2021) mentions that soil organic carbon (SOC) uptake is based on three fundamental processes: (i) the fixation of atmospheric CO₂ through photosynthesis, which produces carbon-rich biomass; (ii) the transfer or contribution of this biomass to the soil, where it is integrated as organic matter; and (iii) the stabilization of SOC, a process that increases the residence time of carbon within the soil system. On this basis, various institutions and authors have proposed management practices aimed at strengthening these processes. For example, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2020) recommends the use of terraces, silt control dams, live barriers and the reduction of unnecessary soil movements as strategies to favor SOC storage.

On the other hand, Gallardo (2021) recognizes that practices such as fertilization and irrigation contribute to the increase of SOC by enhancing plant productivity and the contribution of organic residues to the soil. In his management scheme for carbon sequestration, these practices are included along with the incorporation of compost, reduced tillage, crop rotation (particularly with legumes) and the use of organic mulching, since all of them increase the entry and stabilization of carbon in the soil. In this sense, Lal (2023) points out that conservation agriculture with residue cover and cover crops, agroforestry, complex agricultural systems based on the integration of crops with trees and livestock, as well as fertigation practices, precision agriculture and integrated nutrient and pest management, are part of the so-called *carbon agriculture*.

In the micro-watershed region “El Arenal” in the municipality of San Miguel Tulancingo, in the Mixteca Alta of Oaxaca, soil and water conservation works have been implemented for more than 20 years, focused mainly on reducing water erosion and as a productive alternative, agricultural lands have been shaped over time by terraces.

In a previous study conducted by Aguirre et al. (2024) water erosion in the micro-watershed was estimated; SOC storage and its relationship with conservation works were also evaluated, and three contrasting scenarios were identified: (i) agricultural lands with terraces without significant soil losses

—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.

with SOC contents of $\pm 58 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$; (ii) agricultural lands under similar edaphoclimatic conditions, but with less efficient management and SOC storage of $11.82 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$; and (iii) non-agricultural areas, without conservation works and with severely degraded soils (tepetate), where SOC contents were minimal ($1.58 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). This study suggests that, although soil and water conservation works contribute to reducing soil loss, agricultural management is determinant to maintain or deplete SOC reserves.

Carbon storage in terraced agricultural soils depends mainly on use and management. Consequently, although soil terraces favor soil conservation, —understood as the *in situ* retention of materials—, their presence alone does not guarantee high SOC levels (Chen et al., 2020).

The above establishes the need to compare the performance of agricultural practices that explain the variability of SOC in agricultural plots established on soil terraces in the El Arenal micro-watershed, with the assumption that, once determined, these can be disseminated among producers to help strengthen the so-called carbon agriculture, especially when they are practices that are already part of the local dynamics. Therefore, the objective of this study was to evaluate and compare the contribution of different soil management practices to soil organic carbon (SOC) storage in terraced agricultural plots, using a statistical analysis based on the *stepwise* method, to determine which ones are associated with obtaining higher SOC levels. Additionally, a characterization of the producers was made according to the SOC reserves present in their plots, using percentiles as a classification criterion. The focus of this study was to recognize the most effective practices being carried out in the region and thus facilitate their dissemination and adoption to strengthen carbon agriculture.

Methodology

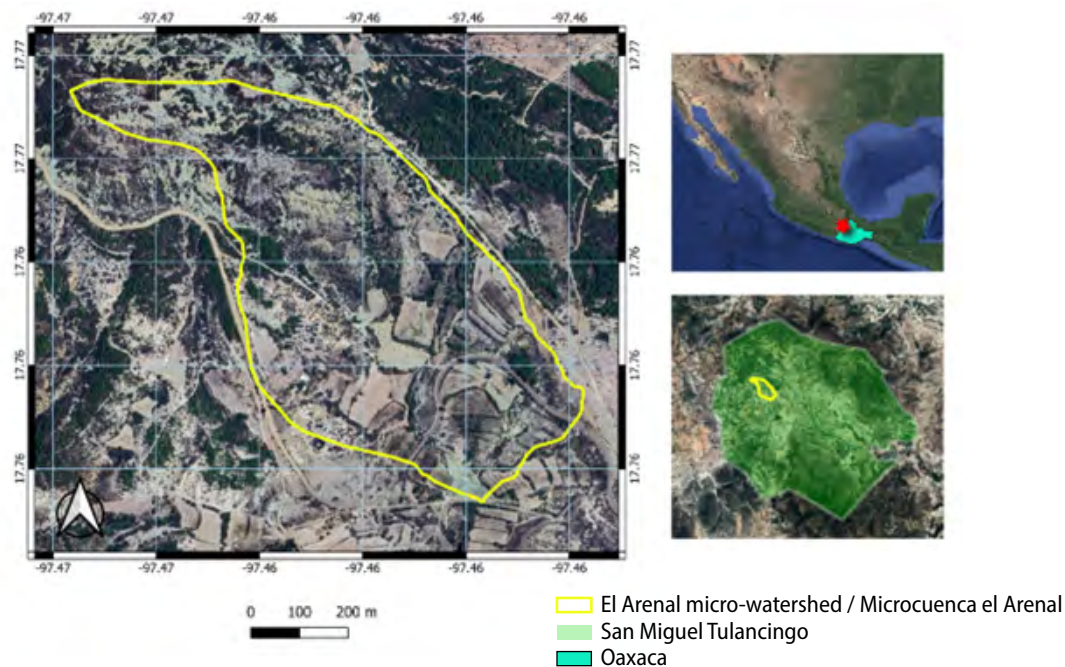
The study area was located in the “El Arenal” micro-watershed belonging to the municipality of San Miguel Tulancingo, Oaxaca (Figure 1). It is located between the coordinates $97^{\circ}27' \text{ W}$ and $17^{\circ}45' \text{ N}$, at an altitude of 2 200 m and has an area of 44.6 ha (Aguirre-Salado et al., 2025). The climate is temperate sub-humid with summer rainfall (Cw_0) (Köppen modified by García,

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 $\pm 58 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$; (ii) terrenos agrícolas bajo condiciones edafoclimáticas similares, pero con manejo menos eficiente y con almacenamiento de COS de $11.82 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$; y (iii) áreas no agrícolas, sin obras de conservación y con suelos severamente degradados (tepetate), donde los contenidos de COS fueron mínimos ($1.58 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). 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 de suelo al almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) 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.

Figure 1. Location of the study area, “El Arenal” micro-watershed, San Miguel Tulancingo, Oaxaca.
Figura 1. Ubicación del área de estudio, microcuenca “El Arenal”, San Miguel Tulancingo, Oaxaca.



Source: Authors' self-made.

Fuente: Elaboración propia.

2004), with mean annual precipitation of 544.7 mm and mean annual temperature of 15.9 °C (SME, 2023). Relief has predominantly steep slopes between 5 % and >30 %, which increases susceptibility to erosion (Aguirre-Salado et al., 2025). Vegetation cover is low in much of the area, with mainly thorny scrub and degraded grasslands, which contributes to the high vulnerability of the soil to erosion processes.

The predominant agricultural system in the El Arenal micro-watershed, is the cultivation of rainfed corn, managed both in monoculture and in traditional association with beans, broad beans and squash. The management practices considered in this study, such as organic amendment, fallowing, contour furrowing, use of stubble, fertilization, crop association, livestock entry and live barriers, correspond to this production system and constitute the basis of local agricultural activity.

Estimation of Soil Organic Carbon

The sampled area was 12.30 ha, which represents the agricultural area of the micro-watershed. Twenty-four random soil samples selected from a set of

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 (Cw_0) (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.

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, fertiliza-

seventy-seven samples previously collected for a study conducted by Aguirre-Salado et al. (2024) were analyzed, these samples correspond specifically to the agricultural plots present in the micro-watershed, each one corresponding to an individual sampling point of the surface layer (0–30 cm), obtained according to the stratified design applied in the aforementioned study.

Laboratory analysis

Samples were air-dried, manually shredded and a 2 mm sieve was used prior to analysis. Organic carbon concentration ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) was determined by the Walkley and Black method (1934). Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) was determined using the paraffinized clump method described by Blake & Hartge (1986). The percentage of coarse fragments (> 2 mm) was calculated by separating and quantifying the retained material on the sieve, from each of the individual samples. Soil organic carbon (SOC) was extrapolated to $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ using the formula proposed by Penman et al. (2003):

$$\text{SOC} = \text{OC} \cdot \text{BDE} \cdot \text{Depth} \cdot \text{Coarse Fragments} \cdot 10$$

Where **SOC** is the soil organic carbon stock ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), **OC** is the organic carbon concentration ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), **BDE** is the bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (soil mass per unit volume in the fine fraction), **Depth** corresponds to the depth or thickness of the sampled soil layer (m) and **Coarse Fragments** which is the adjustment factor that takes into account the volume of coarse fragments, calculated as $1 - (\% \text{ volume of coarse fragments}/100)$ and the multiplier 10 that converts the units to $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

The results were interpolated using the Smart-Map tool, installed from the QGIS add-on repository according to Pereira et al. (2022). Polygons were then generated in agricultural plots, cropped and an average *raster* value was obtained for each plot.

Qualitative data collection instrument

Data collection was carried out according to Hernández-Sampieri & Mendoza (2020), understood as the application of one or various measurement instruments to obtain relevant information on the study variables in the selected cases. A questionnaire was constructed, designed based on the indicator variables or agricultural practices that, according to Gallardo (2021), can explain the differences in SOC

ción, 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):

$$\text{COS} = \text{CO} \cdot \text{DAP} \cdot \text{Profundidad} \cdot \text{Fragmentos Gruesos} \cdot 10$$

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 parce-

levels per plot: crop rotation, soil cover (stubble), application of organic amendments, plot fallowing periods, type of tillage, contour furrowing, chemical fertilization, crop association and presence of live barriers. Twenty items were generated with open and closed responses, which were applied to the landowners, followed by data coding and analysis.

Predictor variables of SOC storage

The agricultural practices evaluated as predictor variables of SOC storage were exclusively developed within the rainfed corn system present in all the plots analyzed. Although some producers occasionally plant wheat or beans, the recorded practices (organic amendment, plot fallowing, stubble application, chemical fertilization, livestock entry, crop association, contour furrowing and live barriers) were applied solely to the maize crop or to its associated traditional system (milpa). Therefore, their definition and statistical analysis are limited to this agricultural system.

The variables considered in the *stepwise* analysis corresponded to management practices that influenced SOC levels in terraced agricultural lands (Gallardo, 2021; Chen et al., 2020) and are described below:

1. **Organic amendment:** application of approximately 3 t·ha⁻¹ of fresh sheep manure every three years.
2. **Plot fallowing:** period in which a plot remains uncultivated. In the plots analyzed, at least one fallow year during the last five years.
3. **Contour furrowing:** preparation of furrows following contour lines, a practice aimed at reducing erosion and increasing water infiltration.
4. **Stubble application:** 15–30 % of residues from the previous harvest remain on the soil surface.
5. **Livestock in the plot:** entry of animals to consume the left-over stubble from the previous harvest.
6. **Chemical fertilization:** application of phosphate fertilizer DAP (18-46-00), reported in the interviews.
7. **Crop association:** traditional combination of maize, beans, broad beans and squash within the milpa system.

las 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 rastrajo, 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.

8. **Live barriers:** establishment of rows of Ocote trees as a soil conservation structure, at 3 m between trees.

Other practices reported by producers such as crop rotation, irrigation, use of native or improved seeds, incorporation of green manures, were discarded from the analysis due to their low statistical representativeness and limited contribution to the variability of the model. Their exclusion did not significantly affect the performance of the model, which is supported by the R^2 and adjusted R^2 values.

Statistical analysis (Stepwise)

The stepwise regression model is a statistical technique that systematically selects independent variables step by step to construct a regression equation. According to Li et al. (2024) this process involves incorporating or omitting variables gradually to determine the optimal combination that exerts the most notable impact on the dependent variable, thus establishing the most effective regression equation, this modelling process not only considers the correlations between the independent variables, but also skillfully manages the complexity of the model, thus avoiding overfitting problems.

The *stepwise* method is widely used in exploratory analysis and predictive modeling, as it allows the selection, from a wide set of independent variables, of those that provide a greater explanatory capacity to the model. In this study, the procedure was performed with the R program version 4.4.2 (R Core Team, 2024), using the *step()* function of the *stats* package, which implements algorithms for automatic selection of predictors based on information criteria.

The initial model incorporated the eight agricultural practices recorded in the plots. The procedure was applied under a bidirectional approach, allowing the successive inclusion and exclusion of variables. The Akaike Information Criteria (AIC) was used as a selection criterion, whereby the algorithm identifies the model with the lowest AIC value, iteratively evaluating the statistical contribution of each predictor.

Percentile analysis

Following the classification approach proposed by Cuevas et al. (2013), who used percentiles to

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 apor-

order production units according to their level of technological adoption, in this research an adaptation of the same method was applied to group agricultural production units based on their soil organic carbon (SOC) levels. This classification made it possible to organize units into comparable groups and to evaluate whether there are differences in carbon storage among producers with different socioeconomic characteristics.

The use of percentiles and their subsequent grouping into quartiles according to Walpole (2012), who points out that this method divides the distribution into detailed segments and provides robust information on extreme values, facilitating the characterization of groups according to specific criteria. For this study, SOC percentiles were reorganized into four quartiles: 1° Quartile (Q1: percentiles 1–25, lower values), 2° Quartile (Q2: percentiles 26–50), 3° Quartile (Q3: percentiles 51–75) and 4° Quartile (Q4: percentiles 76–100, higher values).

Results and Discussion

Estimation of SOC in the agricultural plots

The spatial distribution of SOC in the agricultural plots of the El Arenal micro-watershed is shown in Figure 2. The values recorded in the 24 sampling sites ranged between 2.2 and 58.7 t·ha⁻¹, with a median of 21.8 t·ha⁻¹, these results revealed a pronounced heterogeneity in carbon storage. This variability coincides with Aguirre-Salado et al. (2024), who indicated that the SOC found in the micro-watershed mainly responds to land use/land cover and to the implemented conservation practices.

Although all plots were located on agricultural terraces with slopes less than 5 %, a condition that homogenized the physiographic position, the observed contrasts indicated clear differences in management (amendment application, soil removal, stubble management and cropping frequency). These results coincide with that reported by Yescas-Coronado et al. (2018), who attribute that this type of SOC variability in agricultural systems is due to the intensity and type of management that exists, rather than to the edaphic or topographic factors.

The slope also did not explain the variation found as, being terraces, this was not expected to

tan 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.

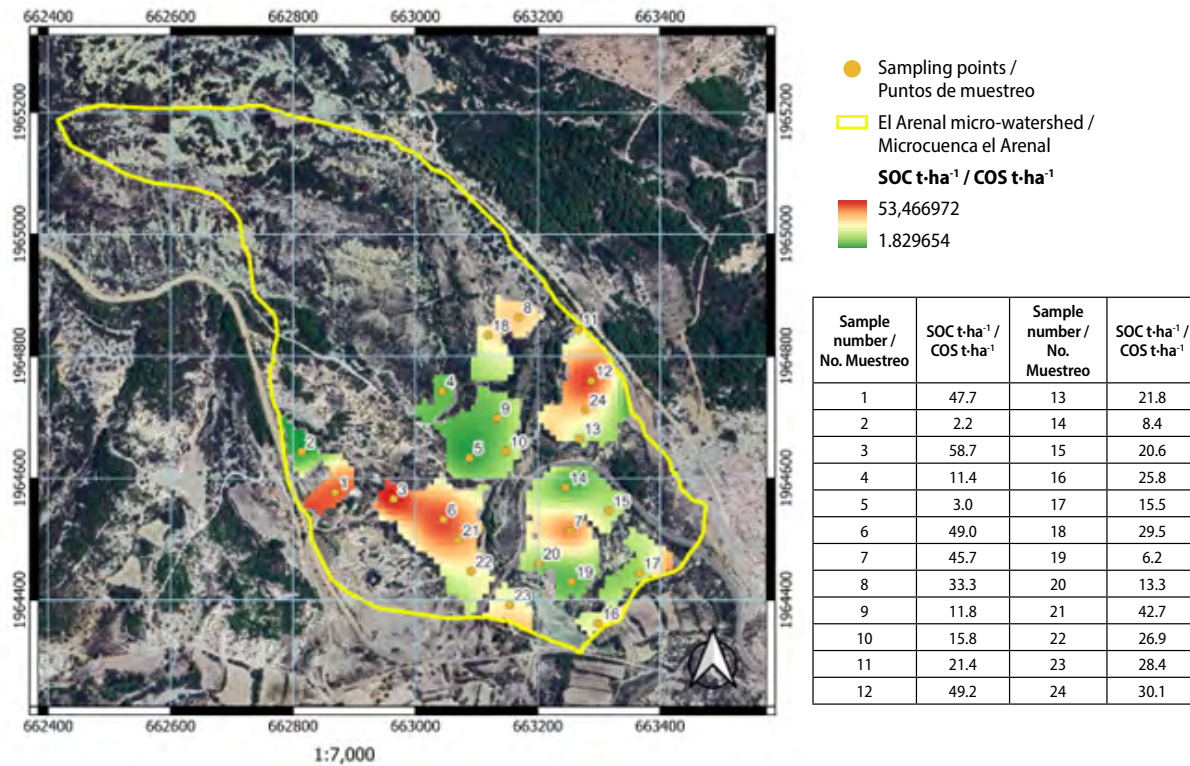
El uso de percentiles y su agrupación posterior en cuartiles de acuerdo con Walpole (2012), quien señala que este método divide la distribución en segmentos detallados y aporta información robusta sobre los valores extremos, facilitando la caracterización de grupos de acuerdo con criterios específicos. 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

Figure 2. Spatial distribution of SOC ($t\cdot ha^{-1}$) in the twenty-four sampling sites of the El Arenal micro-watershed.
Figura 2. Distribución espacial del COS ($t\cdot ha^{-1}$) en los veinticuatro sitios de muestreo de la microcuenca El Arenal.



Source: Authors' self-made

Fuente: Elaboración propia

significantly influence SOC levels, which coincides with Gadisa & Hailu (2020), who found non-significant relationships between the slope and carbon storage. In addition, previous studies conducted in the study area show that the highest SOC stocks were concentrated where water erosion was lower and with greater vegetation cover (Aguirre-Salado et al., 2025), thus confirming that the spatial heterogeneity observed mainly responded to management by differentiating between producers.

Relevant variables in SOC storage

The *stepwise* adjusted model evaluated how different agricultural practices explained the SOC variation found. Table 1 shows the most relevant explanatory variables. The intercept variable serves as a reference point to interpret the effect of the predictor variables and indicates that when the variables are zero, the estimated SOC value is of $14.12 t\cdot ha^{-1}$.

muestreo oscilaron entre 2.2 y $58.7 t\cdot ha^{-1}$, con una mediana de $21.8 t\cdot ha^{-1}$, 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/cobertura del suelo y a las prácticas de conservación implementadas.

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.

Table 1. Results of the stepwise statistical analysis.
Cuadro 1. Resultados del análisis estadístico *stepwise*.

Variable	SOC t·ha ⁻¹ estimate / Estimación COS t·ha ⁻¹	Standard Error / Error Estándar	T value / Valor t	P value / Valor P	Significance / Significancia
Intercept / Intercepto	14.12	4.54	3.11	0.01	**
Amendment / Enmienda	16.93	4.73	3.58	0.00	**
Plot following / Descanso de parcela	-8.61	4.25	-2.03	0.06	.
Contour furrowing / Surcado al contorno	3.54	5.01	0.71	0.49	
Stubble application / Aplicación de rastrojo	11.31	5.09	2.22	0.04	*
Livestock in plots / Ganado en parcela	5.97	5.19	1.15	0.27	
Chemical fertilization / Fertilización química	-1.00	5.58	-0.18	0.86	
Crop association / Asociación de cultivos	-3.77	6.46	-0.58	0.57	
Live barrier / Barrera viva	0.37	5.24	0.07	0.94	

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

The amendment variable had a positive and significant effect on SOC ($\beta = 16.93 \text{ t·ha}^{-1}$, $P < 0.01$), indicating that manure application substantially contributes to carbon increase in the evaluated plots. This result coincides with that reported by Yescas et al. (2018), who documented increases in SOC in agricultural systems with regular incorporation of organic manures. According to Curien et al. (2021), this effect is explained because manures with higher proportion of solid fractions and slowly decomposing carbon provide more stable carbon, favoring its permanence in the soil. The evidence is consistent with studies which highlight that organic amendments improve the physical, chemical and microbiological properties of the soil, which indirectly contributes to the increase and stability of SOC (Bautista et al., 2017; Cesarano et al., 2017; Murillo et al., 2020). In this study, the application of 3 t·ha^{-1} of fresh sheep manure every three years was significant at 99 %, indicating a great importance of the use of organic amendments as an effective practice to increase and conserve carbon in agricultural soils.

The application of stubble showed a positive and significant effect on SOC ($\beta = 11.31 \text{ t·ha}^{-1}$, $P < 0.05$), which showed that the return of crop residues directly contributes to the increase of carbon in the evaluated plots. This increase is congruent with what was obtained by Chen et al. (2015), who found that stubble

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} .

La variable enmienda tuvo un efecto positivo y significativo sobre el COS ($\beta = 16.93 \text{ t·ha}^{-1}$, $P < 0.01$), lo que indica que la aplicación de estiércol contribuye sustancialmente al aumento del carbono en las parcelas evaluadas. Este resultado coincide con lo repor-

contributes particulate carbon and slowly decomposing organic fractions that are integrated into the soil matrix, favoring SOC stabilization and reducing its mineralization. Likewise, Shinde et al. (2022) point out that crop residues constitute a key source of organic carbon and nutrients, and that their permanence on the surface promotes the formation of stable aggregates and reduces soil loss, processes that contribute to retaining carbon in the surface horizon. On the other hand, Lal (2003) indicates that the reincorporation of biomass in excess of soil mineralization capacity is a fundamental strategy to increase soil carbon stocks. Together, these evidences explain that the incorporation of stubble in the studied plots was associated with a significant increase in SOC, thus supporting the efficacy of implementing this practice as a key mechanism to conserve and enhance carbon in agricultural soils.

Plot fallowing consists of leaving the land uncultivated for a certain period. In the present study, this practice was associated with a decrease in SOC. Although the effect was not significant at 5 %, it presented a marginal trend ($P < 0.1$), suggesting a possible negative impact. This may be attributed to the low rainfall conditions in the area, which causes the natural vegetation to fail to develop sufficiently during the fallowing period. The scarce existing cover significantly reduces biomass inputs to the soil and leaves the surface exposed, which results in increased susceptibility to erosive processes (water and wind) and favors the mineralization of stored carbon. This coincides with that reported by Jiao et al. (2020), who point out that the lack of cover and limited incorporation of organic matter during periods of agricultural abandonment contribute to the decrease in SOC reserves.

On the other hand, contour furrowing, livestock grazing in the plot, chemical fertilization, crop association and live barriers, did not show a significant relationship with SOC in the final model ($P > 0.05$). Although they could influence the level of SOC, these practices did not sufficiently explain the variability observed in this analysis.

Model adjustment indicators

The *stepwise* model showed a robust adjustment, with an R^2 of 83.99 %, indicating that the set of agricultural practices used in the study area explains about 84 %

tado 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 t·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

of the SOC variability. The adjusted R^2 (75.45 %) confirms that, even considering the number of predictors included, the model maintains a solid explanatory capacity. The overall significance ($F=9.834$, $P<0.001$) showed that the model is statistically valid and that the incorporated agricultural practices jointly contributed to carbon storage. Among the most influential variables were those related to the incorporation of biomass into the soil, mainly organic amendment and stubble management, while practices with low cover contribution showed less favorable effects.

The use of a *stepwise* model in this study was methodologically relevant, as this approach proved to be an effective tool for refining and selecting predictors with greater explanatory capacity for SOC in agricultural systems. According to the findings of Li et al. (2024), *stepwise* regression allows to accurately identify the truly determinant variables, avoiding the inclusion of redundant predictors and optimizing the final structure of the model. This evidence supports the statistical validity of the procedure used in this research and reinforces the interpretative robustness of the results obtained. On the other hand, Wu & Cai (2012) highlight that management practices linked to the incorporation of residues and organic amendments have a decisive influence on the accumulation and variability of organic carbon in agricultural soils, which coincides with what was observed for these variables in this study.

Frequency of agricultural practices in the 24 evaluated sites

The adoption of agricultural practices showed strong heterogeneity among the 24 sites analyzed. Contour furrowing was the most frequent practice (20 sites; 83.3 %), followed by stubble management (14 sites; 58.3 %), fallow periods (13 sites; 54.2 %) and live barriers (13 sites; 54.2 %). Livestock entry and crop association were recorded at 11 sites (45.8 % each). Organic amendment was applied in 8 sites (33.3 %) and chemical fertilization with DAP in 7 sites (29.2 %). These adoption patterns allow contextualizing the representativeness of each practice and show the structural variability of agricultural management within the micro-watershed.

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

Description of the socioeconomic environment according to SOC levels by percentiles

The producer population associated with the 24 evaluated agricultural sites presented an age range between 35 and 69 years, with an average close to 57 years. Male participation predominated in agricultural work and plot size ranged between 0.25 and 1 ha (average \approx 0.46 ha). The number of household members directly involved in productive activities ranged from 1 to 8 people.

The producers are part of a subsistence family farming system (AFS, by its Spanish acronym), in which production is mainly for self-consumption and agricultural activities are carried out on small plots with direct participation of household members. This socioeconomic context allows us to interpret the management decisions observed in the 24 evaluated sites and provides elements to understand the variability in SOC levels.

The results of the socioeconomic analysis, aimed at identifying the characteristics of the producers who were related to a greater or lesser SOC storage capacity, are presented below.

1° Quartile with percentiles from 1 to 25. This group had the lowest SOC levels (between 2.17 t·ha⁻¹ and 11.817 t·ha⁻¹). Producers in this group had smaller plots (\leq 0.25 ha) and lower crop diversity, predominantly corn and beans. They did not carry out practices such as the application of organic amendments or the use of chemical fertilizers (18-46-00). The majority did not leave stubble on the land, completely removing it for use as fodder. The agricultural yields recorded in this group were the lowest, with values close to 300 kg·ha⁻¹, significantly lower than the overall average of 566 kg·ha⁻¹.

2° Quartile: Percentiles 26 to 50: This group had intermediate-low levels of SOC (between 13.347 t·ha⁻¹ and 21.79 t·ha⁻¹). Producers had plots with an average size of 0.5 ha and showed a slight improvement in agricultural management compared to the first quartile. Some applied chemical fertilizers such as 18-46-00 and organic amendments on a limited basis, additionally leaving 15 % stubble on the land, which partially contributed to the accumulation of organic matter. Although soil fallowing was done on a more regular basis (every 4 to 6 years), management was inconsistent and not always combined with sustainable

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 \approx 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 in-

practices. Agricultural yields were moderate, with values of approximately 450 kg·ha⁻¹ for corn, close to the average, but still limited by the lack of integrated soil management. The main difference with the first quartile is that this group began to adopt practices such as contour furrowing and partial use of stubble, which favored soil fertility and SOC levels.

3° Quartile: Percentiles 51 to 75: This group had intermediate-high levels of SOC (between 25.766 t·ha⁻¹ and 33.316 t·ha⁻¹), marking a clear improvement in agricultural management regarding the first and second quartiles. Producers had average-sized plots (0.5 ha) and adopted more sustainable practices, for example, more frequent use of organic amendments (manure applied every 2-3 years) and incorporation of stubble in proportions of 15-30 %. In addition, they let their land rest regularly (every 4 years) and used contour furrowing as a common practice, which helped conserve soil and improve fertility. These practices resulted in higher yields of 500-600 kg·ha⁻¹ for corn, which are at average level. Compared to the lower quartiles, farmers in the third quartile combined stubble management, amendments and fallowing, thus promoting a higher accumulation of organic carbon in the soil, although this did not reach the optimum level of agricultural efficiency. This suggests that fallow alone is not enough to increase SOC levels; its positive impact relies on management during the fallow period. This confirms the fact that if soil fallowing is not accompanied by adequate management, not only can it be ineffective, but can even reduce soil carbon levels.

4° Quartile: Percentiles 76 to 100: This group obtained the highest SOC levels (between 42.73 t·ha⁻¹ and 58.687 t·ha⁻¹) and implemented the most advanced and sustainable management on the plots. Producers, generally with 0.5-1 ha plots, made intensive use of organic amendments (up to 4 truckloads of manure every 2 years), rested the soil for longer periods (5 or more years), and left 30 % of the stubble on the land, which enhanced organic matter accumulation. In addition, they combined these practices with contour furrowing and crop associations such as corn-bean-broad bean-squash, thus maximizing soil and resource utilization. Agricultural yields were the highest, with values of 600-700 kg·ha⁻¹ for corn, exceeding the average. Unlike the lower quartiles, producers in the fourth quartile achieved integrated soil manage-

menting 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

ment, implementing sustainable practices that not only increased the level of SOC, but also improved productivity and long-term sustainability.

The analysis of quartiles shows how agricultural practices, soil management and production systems are related to SOC levels obtained in subsistence family plots. Results revealed that, on average, interviewed producers were 60 years old and were mainly men (90 %). It was identified that they have subsistence family agriculture (AFS), exclusively for self-consumption.

The average area per producer was 0.5 ha, the main crop was rainfed corn in all the studied plots, while wheat and beans were planted only as secondary crops, either in rotation or in association within the milpa system. Based on the information collected in the questionnaires, the average yields were 566 kg·ha⁻¹ for corn, and in the cases where complementary crops were planted, it was 466 kg·ha⁻¹ for wheat and 12.5 kg·ha⁻¹ for beans, which are mainly for family self-consumption. However, the main economic value associated with these activities comes from stubble management, since producers obtain between 60 and 80 bales·ha⁻¹, with an estimated value of \$80 to \$100 Mexican pesos (MXN) per bale. Because of this, stubble is completely removed from the plots for use as fodder, mainly for animal feed during the year.

In terms of costs, corn production involves an average expenditure of \$7,532 MXN per hectare, considering the use of machinery and labor. Despite these costs, the economic balance is evened by the value of the forage produced; for example, 80 bales valued at \$100 MXN each represent \$8,000 MXN, which offsets the investment made in the crop. This approach highlights the importance of stubble as a key resource for the economic sustainability of these family farming systems; however, it also explains how difficult it has been to establish sustainable systems that favor soil cover with stubble of the previous harvest. The results also show that production units with the greatest amount of stored carbon are those with the greatest amount of resources (available agricultural land), in this sense, government support for small producers is necessary to compensate the economic cost of selling harvest residues *versus* the environmental benefit of carbon sequestration, this shows that agricultural

aplicado cada 2-3 años) y la incorporación de rastrojo en proporciones de 15-30 %. Además, dejaron desacascar 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.

4º 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

production with regenerated practices can be susceptible to obtaining government support through payments for environmental services for a greater amount of SOC.

This study contributes with the evaluation of management practices that allow greater SOC storage in rainfed agricultural conditions and smallholder producers, which coincides with other studies that mention that restoration of depleted SOC is possible through various strategies such as: conversion of marginal lands to restorative uses, promotion of reduced labor practices or zero combined with cover crops or residues, implementation of nutrient cycles through compost, manure application and other sustainable soil and water management techniques. Long-term soil carbon sequestration is increasingly seen as an integrate strategy to combat climate change (Nazir et al., 2024).

Conclusions

Soil management was shown to be a determining factor in obtaining soil organic carbon (SOC) levels. Practices that increase biomass incorporation, such as the application of organic amendments, partial stubble management and contour furrowing, were associated with higher SOC levels, while the absence of these practices and the total removal of stubble accounted for the lowest values.

The analysis by quartiles confirmed that the highest levels of SOC are concentrated in plots that adopt sustainable management practices, while the lowest levels correspond to units where such practices are absent or limited. Agricultural production operates under subsistence family farming schemes, with modest yields and a strong weight of stubble in the economic balance, which conditions management decisions.

Overall, the results show that the consistent adoption of sustainable practices can strengthen soil fertility and its capacity to act as a carbon sink. This approach represents an opportunity to guide management strategies and the design of incentives that favor more resilient and environmentally efficient agricultural practices in family farming contexts.

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 (MXN). 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 MXN 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 MXN 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.

End of English version

=====

References / 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) e244101. [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

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.

Fin de la versión en español

- 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>
- 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., Zulfiqar, 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>
- 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>
- 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>.