



Recuperación de perfiles edáficos según especies de mangle en zona de laguna Mecoacán, México

García-Frías, F., Vázquez-Vázquez, L. L., Ojeda-Morales, M. E. y Morales-Bautista, C. M. (2026). Recuperación de perfiles edáficos según especies de mangle en zona de laguna Mecoacán, México [*Postprint*]. *CIENCIA ergo-sum*, 33.

<https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a83>

Sección: Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Recuperación de perfiles edáficos según especies de mangle en zona de laguna Mecoacán, México
Recovery of Soil Profiles Across Mangrove Species in Mecoacán Lagoon, México

Fatima García-Frías, División Académica de Ciencias Básicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

ROR:<https://ror.org/04ee58018>

Correo electrónico: fatigf18@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8927-2536>

Leydi L. Vázquez-Vázquez, División Académica de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

ROR:<https://ror.org/04ee58018>

Correo electrónico: leydivazquez4@gmail.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8301-738X>

Marcia E. Ojeda-Morales, División Académica de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

ROR:<https://ror.org/04ee58018>

Correo electrónico: marcia.ojeda@ujat.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-2431>

Carlos M. Morales-Bautista*, División Académica de Ciencias Básicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

ROR:<https://ror.org/04ee58018>

Correo electrónico: carlos.morales@ujat.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4825-4558>

Recepción: 20 de marzo de 2026

Aprobación: 9 de septiembre de 2026

RESUMEN

Se evaluó la variación de propiedades edáficas y almacenamiento de carbono subterráneo asociados a *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Rhizophora mangle* en una zona de reforestación de la laguna Mecoacán, Tabasco, México. Se caracterizaron perfiles de suelo considerando propiedades físicas y químicas, almacenamiento de carbono y morfología bacteriana. Los datos se analizaron mediante ANOVA factorial o Kruskal-Wallis, según el cumplimiento de supuestos estadísticos, seguido de un análisis de componentes principales. Se observaron diferencias entre especies y horizontes; *R. mangle* presentó los mayores contenidos de materia y carbono orgánicos. Sin embargo, *A. germinans* registró el mayor almacenamiento de carbono ($\sim 651 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Los resultados sugieren que la recuperación edáfica depende de la interacción entre vegetación, propiedades del suelo e hidrología.

* Autor para correspondencia carlos.morales@ujat.mx

PALABRAS CLAVE: conservación, ecosistemas, manglar, suelo.

ABSTRACT

The variation in soil properties and belowground carbon storage associated with *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, and *Rhizophora mangle* was evaluated in a reforestation area of Mecoacán Lagoon, Tabasco, Mexico. Soil profiles were characterized by considering physical and chemical properties, carbon storage, and bacterial morphology. Data was analyzed using factorial ANOVA or Kruskal-Wallis, according to the fulfillment of statistical assumptions, followed by principal component analysis. Differences among species and horizons were observed; *R. mangle* presented the highest organic matter and organic carbon contents. However, *A. germinans* recorded the highest carbon storage ($\sim 651 \text{ Mg C ha}^{-1}$). The results suggest that soil recovery depends on the interaction among vegetation, soil properties, and hydrology.

KEYWORDS: conservation, ecosystem, mangrove, soil.

INTRODUCCIÓN

Los manglares son humedales que proporcionan servicios ecosistémicos fundamentales y alta eficiencia en la fijación y almacenamiento de carbono, esto se debe a que se desarrollan en ambientes predominantemente reductivos que limitan la descomposición de la materia orgánica. Además de su contribución a la mitigación del cambio climático, estos ecosistemas sustentan economías regionales; por ejemplo, en México, se han desarrollado programas de manejo comunitario y aprovechamiento sustentable en regiones costeras del Pacífico y Golfo de México, donde comunidades locales participan en actividades reguladas como la extracción controlada de madera de mangle para usos tradicionales (tasa de aprovechamiento), apicultura, pesca y aprovechamiento de productos asociados a los manglares, bajo criterios establecidos por la normativa ambiental vigente (Gómez & Fócil, 2026).

En la última década, los manglares han cobrado importancia ya que son considerados en programas de compensación ambiental, como proyectos de restauración ecológica para resarcir impactos derivados del desarrollo de infraestructura industrial e iniciativas de mercados voluntarios de carbono. Estas actividades generan créditos por la conservación y recuperación de carbono azul. En zonas costeras de México, algunos sitios de Tabasco, Nayarit y Yucatán, se desarrollan proyectos comunitarios en materia de bonos de Carbono (Hernández-Nava *et al.*, 2022; Velázquez-Pérez *et al.*, 2025).

No obstante, diversas actividades antropogénicas afectan la estabilidad de estos ambientes, especialmente en zonas con actividades industriales y de servicios, así como su población asociada. Por ejemplo, en México, estados como Tabasco y Veracruz, presentan mortandad de peces y deforestación de manglares relacionados con los cambios de uso de suelo y la implementación de infraestructura civil e industrial (Fuentes-Domínguez *et al.*, 2025). Estos eventos no solo reducen la resiliencia de los manglares, sino que además interrumpen procesos biogeoquímicos esenciales para la supervivencia de especies protegidas (Martínez-Márquez *et al.*, 2024; Day *et al.*, 2024).

Además, en la mayoría de estos sitios existen asentamientos humanos que carecen de servicios públicos, por lo que son comunes las descargas de aguas residuales que afectan la calidad del agua, en algunas zonas de Tabasco, Veracruz y Campeche, se han presentado mortandad de especies (Méndez-Torres, 2024). Un tema preocupante asociado al crecimiento y desplazamiento demográfico en estas regiones, es la tala ilegal e incendios que, en la mayoría de los casos, son provocados y promueven los cambios de uso de suelo de conservación para utilizarlos en pastoreo y agricultura (Chatting *et al.*, 2022).

Algunos estudios, sugieren que estas actividades modifican las propiedades biogeoquímicas del agua y suelo, comprometiendo la supervivencia de especies clave para el equilibrio del ecosistema. Por estas razones, resulta indispensable implementar estrategias de conservación y manejo sustentadas en criterios geoquímicos y ambientales, que permitan evaluar de manera integral los cambios en las propiedades del suelo y del agua, así como sus implicaciones ecológicas a corto y largo plazo (Moreno-Martínez *et al.*, 2021).

En México, durante la última década se ha impulsado el desarrollo económico mediante la implementación de obras infraestructura con financiamiento gubernamental; no obstante, los impactos potenciales sobre zonas de conservación han generado amplios debates. Por un lado, proyectos como el Tren Maya y la Refinería Olmeca han sido señalados por sus posibles efectos ambientales en ecosistemas estratégicos del sursureste del país, como selvas tropicales (húmedas y subhúmedas), bosques y manglares; por otro lado, se reconoce la relevancia económica, social y cultural que estas obras representan para la región, especialmente porque permiten el acceso a insumos y la interconexión entre sitios altamente marginados (Ovando *et al.*, 2023; García-Córdova *et al.*, 2024).

De igual manera, se han promovido programas de compensación ambiental enfocados en la reforestación, restauración ecológica y conservación de áreas naturales, así como la regulación y fomento del mercado de Bonos de Carbono y tasas de aprovechamiento. Asimismo, se han decretado apoyos económicos directos a poblaciones consideradas en condición de vulnerabilidad inmersas en estas regiones (Cruz-Aviña *et al.*, 2022; Montes-Ramírez y Sánchez-Juárez, 2024).

No obstante, tanto en estas obras como los programas asociados, persiste una marcada carencia de estudios preliminares y de seguimiento que integren análisis multidisciplinarios orientados a evaluar su eficacia, pertinencia y sostenibilidad. En materia de impacto ambiental, resulta relevante desarrollar estudios en zonas restauradas y áreas de amortiguamiento, particularmente en sitios fragmentados incorporados a programas compensatorios de reforestación, con el fin de evaluar de manera objetiva la efectividad ecológica y ambiental de dichas estrategias (Rontard *et al.*, 2020).

En este sentido, en Tabasco, comunidades como Úrsulo Galván, Las Flores, Aquiles Serdán, La Solución Somos Todos, Trujillo Gurría y Anexo Reformas, fueron beneficiadas con fondos monetarios no gubernamentales destinados a programas de Bonos de Carbono (Vázquez-Vázquez *et al.*, 2024). Sin embargo, la evaluación de estos programas se limita principalmente a la cuantificación del carbono aéreo como parte de los procesos de certificación establecidos en la Norma Mexicana NMX-AA-173-SCFI-2015 (Orta-Salazar *et al.*, 2021). Si bien este enfoque permite estimar perturbaciones inmediatas, como incendios, deforestación o sequías, no incorpora el análisis de los ciclos biogeoquímicos ni de las variaciones ambientales internas del ecosistema, las cuales están estrechamente asociadas al carbono subterráneo y a los procesos de recuperación ecológica (Ávila-Acosta *et al.*, 2024).

En este contexto, el suelo presenta una notable estabilidad geoquímica, ya que una fracción significativa del carbono se encuentra asociada a la actividad biológica y a partículas minerales finas, particularmente arcillas y óxidos, que favorecen su preservación. Los cambios en estos indicadores se relacionan con variaciones climáticas, como periodos de lluvia intensa o estiaje, las cuales influyen en la dinámica redox, humedad del suelo y actividad microbiana (Cooray *et al.*, 2025). Al mismo tiempo, el carbono subterráneo se encuentra estrechamente vinculado con procesos edáficos como la adsorción, la quelación,

la humificación y formación de complejos orgánico-minerales, los cuales regulan la disponibilidad de nutrientes esenciales y la movilidad de elementos, incluidos contaminantes como metales pesados e hidrocarburos, especialmente bajo condiciones reductivas propias de suelos saturados o hidromórficos (Alongi *et al.*, 2020).

Por lo tanto, el carbono del suelo actúa como un regulador geoquímico clave en la dinámica de los ecosistemas terrestres, ya que su contenido, fraccionamiento y estabilidad permiten evaluar procesos de degradación, contaminación o recuperación, así como inferir en alteraciones antrópicas asociadas a cambios en el potencial redox y el régimen hidrológico, aspectos fundamentales para la planeación ambiental, la restauración ecológica y el diseño de estrategias de mitigación frente al cambio climático y programas de conservación y compensación ambiental (Kida & Fujitake, 2020; Sarker *et al.*, 2021).

En consecuencia, el carbono subterráneo representa un componente más determinante que el carbono aéreo, debido a su mayor capacidad de almacenamiento, su estabilidad a largo plazo y su papel central en los procesos edáficos. Por ello, su estudio contribuye de manera directa al diseño de políticas relacionadas con el cambio climático, la seguridad alimentaria y la restauración de ecosistemas (Ashida *et al.*, 2021).

La presente investigación se llevó a cabo en el ejido Úrsulo Galván, en un predio localizado en las inmediaciones del río Arroyo Hondo (carretera Chiltepec-Jalpa de Méndez) y del Área Natural Protegida Laguna Mecoacán. El propietario mencionó que el terreno había sido previamente deforestado en 2010 debido al uso de maquinaria pesada y a la instalación de ductos petroleros; adicionalmente, durante varias décadas fue utilizado para actividades de pastoreo. En 2018, el sitio fue intervenido mediante una reforestación aleatoria de 2 ha, en la que se establecieron tres especies de mangle (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*). Debido a que esta intervención fue de carácter voluntario y sin asesoría técnica, no se evaluó el ordenamiento espacial asociado a las condiciones hidrológicas y edáficas del ecosistema.

El objetivo de este estudio fue evaluar la variación de las propiedades del suelo bajo la influencia de tres especies de mangle y, comparar las diferencias en el almacenamiento de carbono subterráneo y otros indicadores edáficos, con relación a un suelo no restaurado

localizado dentro de la misma Área Natural Protegida. Lo anterior, con la finalidad de demostrar que, aun bajo un esquema de reforestación no planificada, cada especie induce condiciones edáficas particulares que influyen de manera diferencial en la captura de carbono subterráneo y en los procesos de recuperación del suelo, aportando elementos para la evaluación crítica de estrategias de restauración y compensación ambiental en ecosistemas de manglar.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

En 2024 se colectaron perfiles de suelo en ecosistemas de manglar dominados por *Rhizophora mangle* (18°22'35.35" N, 93°03'44.63" O), *Avicennia germinans* (18°22'35.31" N, 93°03'44.26" O) y *Laguncularia racemosa* (18°22'35.08" N, 93°03'38.51" O), así como en un suelo perturbado sin restauración, el cual es utilizado como acceso y área de pastoreo (18°22'33.21" N, 93°03'39.62" O). Todos los sitios se localizaron dentro de un mismo predio del Ejido Úrsulo Galván, municipio de Jalpa de Méndez, Tabasco, México, dentro del Área Natural Protegida Laguna Mecoacán (Domínguez *et al.*, 2024).

Para cada tipo de cobertura se estableció un punto de muestreo representativo de las condiciones de vegetación y uso del suelo (Palma-López *et al.*, 2007). En cada sitio se excavó un perfil edafológico, el cual fue descrito morfológicamente de acuerdo con la metodología propuesta por Cuanalo (1990), considerando profundidad, color (Munsell), estructura, consistencia, distribución de raíces y evidencias de hidromorfismo.

Posteriormente, de cada horizonte identificado (H1 y H2) se obtuvieron tres submuestras representativas, las cuales fueron procesadas y analizadas de manera independiente. Las muestras se secaron al aire, se molieron manualmente y se tamizaron a través de una malla No. 10 antes de realizar las determinaciones físicas y químicas.

El pH (relación suelo:agua 2:1), la conductividad eléctrica (CE) del extracto de pasta saturada y la capacidad de campo (% CC) se determinaron conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). El contenido de materia orgánica (% MO) se determinó de acuerdo con Izquierdo-Bautista y Arévalo (2021), mientras que la densidad aparente (DA) y la densidad real (DR) se determinaron conforme a Ticona-Cortavitar *et al.* (2024).

El contenido de carbono orgánico (% C) se estimó mediante la relación $\% C = \% MO / 1.724$.

El carbono orgánico almacenado por horizonte (SOC, Mg ha⁻¹) se calculó mediante la expresión propuesta por Rojas *et al.* (2020), mientras que el carbono orgánico total del perfil (SOCT) se obtuvo mediante la suma del carbono almacenado en los horizontes del perfil, conforme a Hernández-Nava *et al.*, (2022). Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar.

Los datos de las propiedades físicas y químicas del suelo se analizaron considerando como unidades experimentales la combinación de las especies de manglares y los horizontes del perfil de suelo. Para cada variable se calcularon la media y la desviación estándar ($n = 3$). La distribución de los datos y el cumplimiento de los supuestos para los análisis paramétricos se evaluaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente.

Cuando se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) factorial de dos vías, considerando la especie de mangle y el horizonte como factores fijos, así como su interacción (especie $\times$ horizonte). Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey HSD, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Cuando los datos no cumplieron los supuestos requeridos para el análisis paramétrico, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis considerando las seis combinaciones especie $\times$ horizonte. Para identificar las diferencias entre grupos se realizaron comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Holm. En todos los análisis se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó para evaluar conjuntamente la estructura de las propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo. Antes del análisis, las variables fueron estandarizadas mediante transformación z para evitar que las diferencias de escala entre variables influyeran en la ordenación multivariada. Se calcularon las cargas factoriales, los valores propios; el porcentaje de varianza explicado por cada componente y la varianza acumulada. La interpretación de los componentes se realizó considerando la magnitud y el signo de las cargas de las variables.

Adicionalmente, con el propósito de evaluar la influencia de cada especie de mangle sobre la actividad microbiana del suelo, se determinaron las unidades formadoras de colonias (UFC). Para ello, se recolectaron muestras de raíces asociadas a cada especie de mangle, así

como del suelo perturbado utilizado como referencia (Domínguez *et al.*, 2024). El conteo de células viables se realizó mediante diluciones seriadas y siembra en placa por extensión, de acuerdo con la metodología descrita por Madigan *et al.*, (2021), con la finalidad de comparar la abundancia relativa de colonias bacterianas entre los distintos tipos de cobertura vegetal.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

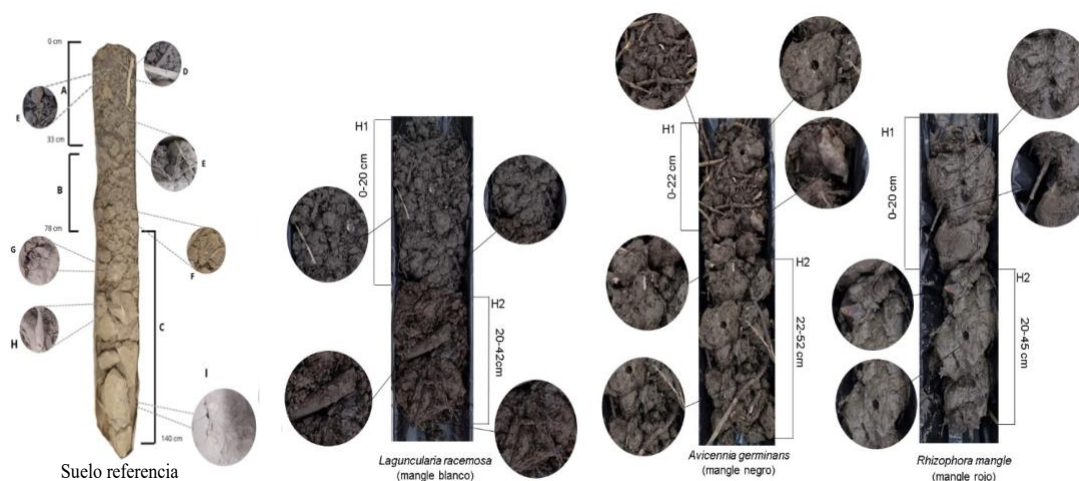
2.1. Cambios pedológicos

El perfil de referencia desarrollado en una zona de manglar afectada por actividades antropogénicas presentó dos horizontes con estructura homogénea (arcillo-arenosa) y, colores pardos dominantes (7.5 YR 6/8 en H1 (0-33 cm) y 7.5 YR 7/6 en H2 (33-140 cm), ausencia de moteados y, alta permeabilidad asociada a la falta de saturación permanente. El horizonte H1 presentó raíces de pastos forrajeros y de diversos matorrales endémicos, mientras que H2 presentó raíces medias a gruesas (78 cm) (Figura 1).

Estas características sugieren un suelo con condiciones mayormente oxidativas, en el cual los procesos reductivos típicos de los manglares naturales se encuentran ausente en temporadas de estiaje. La reacción baja a muy baja con HCl y CH₃COOH (grado reactivo), así como la respuesta limitada al H₂O₂ en ambos horizontes, indicaron una baja proporción de carbono activo, la cual ha sido asociada a la remoción recurrente de biomasa, compactación intermitente y alteraciones del régimen hidrológico (Donato *et al.*, 2011; Alongi, 2020).

En contraste, los perfiles correspondientes a los sitios restaurados mostraron diferencias marcadas respecto al suelo perturbado, particularmente en la coloración del suelo, la cual varió de tonalidades pardo-amarillentas (7.5YR) en el perfil afectado hacia colores más oscuros y rojizos (5YR) en los perfiles bajo cobertura de manglar. En los horizontes superficiales (H1 y H2), los suelos restaurados presentaron menores valores cromáticos de Munsell, particularmente en el componente de valor (Value), con registros de 4/3 en *Avicennia germinans*, 4/2-4/3 en *Laguncularia racemosa* y 4/1-4/2 en *Rhizophora mangle*, indicando un mayor oscurecimiento del suelo, lo cual se encuentra asociado al incremento de materia orgánica y al desarrollo de condiciones más reductivas (Figura 1).

Figura 1
Perfiles edafológicos de zona de estudio



Fuente: elaboración propia

Estos cambios cromáticos sugieren que la restauración no solo modifica la cobertura vegetal, sino que activa procesos subterráneos clave, como la acumulación de carbono orgánico, la alteración del estado redox y la dinámica microbiana del suelo. En particular, la transición hacia colores 5YR más oscuros en *R. mangle* es consistente con ambientes más saturados y anóxicos, favorables para la preservación de carbono recalcitrante, mientras que *A. germinans* y *L. racemosa* reflejan condiciones intermedias, donde coexisten procesos de incorporación de carbono activo y oxidación parcial.

En el caso de *Avicennia germinans*, la presencia de raíces más largas y de mayor grosor, junto con una acumulación visible de hojarasca en descomposición, sugiere una red radicular altamente activa, capaz de modificar el microambiente rizosférico mediante la liberación de exudados y la oxigenación localizada del suelo. La alta reacción con H_2O_2 observada en ambos horizontes indica una mayor proporción de carbono lábil o recientemente incorporado, asociado a procesos de oxidación biogénica y a una mayor actividad microbiana.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Alongi (2014) y Kristensen *et al.*, (2008), quienes señalan que *A. germinans* promueve una rápida incorporación de carbono orgánico al suelo y una elevada tasa de recambio, favoreciendo el secuestro de carbono activo a corto y mediano plazo. En comparación con el perfil de referencia, este sistema representa una transición clara desde un suelo perturbado y relativamente oxidado hacia un suelo

funcionalmente más dinámico, aunque con menor preservación de carbono recalcitrante.

Por su parte, los perfiles dominados por *Rhizophora mangle* mostraron condiciones contrastantes. A pesar de la menor extensión y grosor del sistema radicular, los colores grisáceos (5YR 4/1), la elevada humedad y la presencia de materia orgánica en descomposición indican un ambiente marcadamente anóxico y reductivo. Estas condiciones limitan la actividad microbiana aerobia y ralentizan la mineralización de la materia orgánica, favoreciendo la preservación del carbono a largo plazo, tal como ha sido documentado por Chen y Twilley (1999) y Bouillon *et al.*, (2008). En comparación con el perfil de referencia, *R. mangle* restablece de manera más efectiva las condiciones hidromórficas y reductivas típicas de los manglares maduros, aunque con una menor incorporación continua de carbono fresco al suelo debido a su sistema radicular menos extenso.

En el caso de *Laguncularia racemosa*, los perfiles restaurados mostraron una saturación elevada y colores pardos oscuros, pero con ausencia de materia orgánica visible y una reacción baja a media con H₂O₂. Este comportamiento intermedio ha sido reportado por Komiyama *et al.*, (2008), quienes señalan que *L. racemosa* presenta una biomasa radicular moderada y una capacidad de captura de carbono menor que *A. germinans*, pero superior a sistemas altamente perturbados. Comparado con el perfil de referencia, *L. racemosa* contribuye a mejorar las condiciones de saturación y a iniciar procesos de acumulación de carbono, aunque sin alcanzar los extremos de dinamismo biológico o preservación observados en las otras dos especies.

En conjunto, los resultados evidencian que el perfil de referencia presenta una capacidad limitada tanto para la generación de ambientes reductivos como para la captura eficiente de carbono, reflejando un sistema edáfico funcionalmente degradado. La restauración con manglares modifica sustancialmente esta condición, pero el tipo de carbono secuestrado y el mecanismo dominante dependen de la especie. Mientras *A. germinans* favorece la incorporación de carbono activo y una alta actividad biológica subterránea, *R. mangle* promueve la estabilización y preservación de carbono recalcitrante bajo condiciones reductivas persistentes. *L. racemosa* en cambio, se posiciona como un sistema transicional, con aportes moderados en ambos procesos.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar, en proyectos de restauración y en evaluaciones de carbono azul, no solo la biomasa aérea, sino además la interacción entre el sistema radicular, la calidad de la materia orgánica y las condiciones redox del suelo, tal como lo destacan Bouillon *et al.*, (2008) y Donato *et al.*, (2011). Desde una perspectiva funcional, la combinación de especies podría maximizar tanto la captura de carbono a corto plazo como su almacenamiento a largo plazo, superando ampliamente las condiciones observadas en suelos de manglar degradados por actividades antropogénicas.

2.2. Propiedades físicas y químicas de los suelos

Los resultados obtenidos muestran que las propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo no presentan un comportamiento uniforme entre las especies de manglar estudiadas, ya que responden a una combinación de la especie dominante y la posición del horizonte dentro del perfil. Esta interacción fue particularmente evidente para la densidad real y el pH, variables para las cuales el análisis factorial mostró efectos significativos de la especie, del horizonte y de la interacción especie x horizonte. Las variables que no cumplieron los supuestos paramétricos, el análisis mediante Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Holm también identificó diferencias entre las combinaciones especie-horizonte, aunque éstas no fueron necesariamente generalizadas entre todas las especies.

En este sentido, los resultados sugieren que las características edáficas de estos manglares están determinadas por condiciones locales de inundación, acumulación de materia orgánica, estructura del suelo y dinámica hidrológica, más que por un efecto aislado de la especie vegetal. Por ejemplo, el pH fue una de las variables que mostró el contraste más marcado entre los perfiles (Cuadro 1 y 2). Los suelos asociados con *Avicennia germinans* presentaron los valores más elevados, con 7.81 ± 0.03 en H1 y 7.91 ± 0.08 en H2, mientras que *Rhizophora mangle* mostró valores relativamente homogéneos entre horizontes (7.55 ± 0.03 y 7.44 ± 0.07). En contraste, *Laguncularia racemosa* presentó una reducción importante del pH, particularmente en H2, donde alcanzó 3.23 ± 0.24 . El análisis estadístico confirmó que esta diferencia no corresponde a una variación aleatoria, sino a un patrón claramente asociado con la combinación entre especie y horizonte. La relativa estabilidad del pH en los perfiles de *R. mangle* y *A. germinans*, frente a la marcada acidificación observada en *L. racemosa*, coincide con la variabilidad edáfica descrita para manglares del sureste de México por López-

Jiménez *et al.*, (2019) y Castillo-Arias *et al.*, (2021).

El bajo pH registrado en *L. racemosa* H2 sugiere una condición edáfica muy distinta de la observada en los otros perfiles. En suelos de manglar, el pH puede estar condicionado por el régimen de inundación, la disponibilidad de oxígeno, los procesos de reducción y oxidación y la transformación de compuestos de azufre. En ambientes periódicamente saturados, la actividad microbiana puede modificar de manera importante las condiciones geoquímicas del suelo. La reducción de sulfatos y la subsecuente acumulación de especies reducidas de azufre pueden contribuir a la formación de condiciones fuertemente reductoras; posteriormente, la oxidación de estos compuestos en zonas con mayor disponibilidad de oxígeno puede generar acidez.

Por ello, aunque los datos disponibles no permiten atribuir de manera exclusiva la acidez de *L. racemosa* H2 a las bacterias reductoras de sulfato, las condiciones hidrológicas y redox constituyen una explicación del patrón observado y que ha sido relacionado con la dinámica de carbono y materia orgánica en ecosistemas de manglar (Moreno-Martínez *et al.*, 2021). La diferencia de pH entre los perfiles también resulta relevante desde el punto de vista de la transformación de la materia orgánica. Las condiciones de inundación reducen la disponibilidad de oxígeno y modifican las rutas metabólicas de los microorganismos responsables de la descomposición.

En consecuencia, los cambios en el régimen hidrológico pueden afectar tanto la velocidad de mineralización como la estabilización de la materia orgánica en el suelo. En el sitio estudiado, esta interpretación adquiere especial importancia debido a las condiciones geomorfológicas y de conectividad hidrológicas descrita para el área. El perfil asociado con *R. mangle* se encuentra próximo a dos cuerpos de agua (arroyo hondo y laguna Mecoacán) y la construcción de la carretera modificó su comunicación hidrológica. Durante la temporada de lluvias, el sitio permanece anegado con frecuencia, generando condiciones de saturación que pueden favorecer ambientes con menor disponibilidad de oxígeno. Este comportamiento puede contribuir a disminuir la descomposición de la materia orgánica y favorecer su permanencia en el suelo (Kida y Fujitake, 2020); Camacho-Rico *et al.*, 2021).

Cuadro 1
Propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo según la especie de mangle y horizonte

Parámetro	<i>R. mangle</i>		<i>A. germinans</i>		<i>L. racemosa</i>		Prueba	p
	H1	H2	H1	H2	H1	H2		
DR (g cm ⁻³)	1.70 ± 0.16a	1.75 ± 0.09a	2.26 ± 0.01	1.94 ± 0.04	2.04 ± 0.03	2.63 ± 0.03	ANOVA + Tukey HSD	0.006
DA (g cm ⁻³)	0.91 ± 0.01a	0.82 ± 0.10	0.97 ± 0.01	1.02 ± 0.01	0.91 ± 0.01a	1.06 ± 0.01	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.010
pH	7.55 ± 0.03	7.44 ± 0.07	7.81 ± 0.03a	7.91 ± 0.08a	6.64 ± 0.19	3.23 ± 0.24	ANOVA + Tukey HSD	<0.001
CE (dS m ⁻¹)	4.44 ± 0.03a	4.45 ± 0.32a	4.60 ± 0.01a	4.70 ± 0.03a	4.42 ± 0.02a	5.66 ± 0.28	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.027
% CC	37.65 ± 1.33a	33.40 ± 1.76	37.81 ± 0.02a	37.72 ± 0.05a	41.40 ± 0.46	25.49 ± 0.07	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.009
% MO	2.66 ± 0.01	2.11 ± 0.04	2.40 ± 0.11	1.97 ± 0.01	1.71 ± 0.04	0.73 ± 0.00	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.005
% C	1.54 ± 0.01	1.22 ± 0.01	1.36 ± 0.06	1.14 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.42 ± 0.00	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.005
SOC (Mg C ha ⁻¹)	284.29 ± 0.05	251.63 ± 0.05	299.02 ± 0.10	351.75 ± 1.00	183.12 ± 1.00	99.61 ± 1.00	Kruskal-Wallis + Dunn-Holm	0.005

Fuente: Elaboración propia

Nota. H1 y H2 corresponden a horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente. DR y DA corresponden a densidad real y densidad aparente, respectivamente; CE, conductividad eléctrica; %CC, capacidad de campo; %MO, materia orgánica; % C, carbono orgánico; y SOC, carbono orgánico almacenado. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3). Para las variables que cumplieron los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas se utilizó ANOVA factorial seguido de Tukey HSD. Para las variables que no cumplieron los supuestos paramétricos se utilizó Kruskal-Wallis seguido de comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Holm. $\alpha = 0.05$. La letra (a) indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores.

Cuadro 2

Efectos de la especie de manglar, el horizonte y su interacción sobre las propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo

Variable	Fuente de variación	gl	Estadístico	p
DR	Especie	2	F = 92.388	<0.001
	Horizonte	1	F = 8.341	0.014
	Especie × Horizonte	2	F = 52.617	<0.001
pH	Especie	2	F = 858.068	<0.001
	Horizonte	1	F = 329.706	<0.001
	Especie × Horizonte	2	F = 326.825	<0.001
DA			H = 15.160	0.010
CE			H = 12.655	0.027
%CC			H = 15.316	0.009
%MO			H = 16.579	0.005
%C			H = 16.596	0.005
SOC			H = 16.579	0.005

Fuente: Elaboración propia

Nota. Para DR y pH se utilizó un ANOVA factorial con especie y horizonte como factores fijos y su interacción. Para DA, CE, % CC, % MO, % C y SOC, cuyos supuestos paramétricos no se cumplieron, se utilizó la prueba de Kruskal–Wallis sobre las seis combinaciones especie × horizonte, seguida de comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Holm. gl = grados de libertad; F = estadístico de Fisher; H = estadístico de Kruskal–Wallis. Se consideró significativo $\alpha = 0.05$.

Por su parte, la conductividad eléctrica presentó valores relativamente elevados en los perfiles, con valores que oscilaron entre 4.42 y 5.66 dS m⁻¹. Aunque el análisis estadístico detectó una diferencia global, las comparaciones múltiples mostraron que la mayor parte de las combinaciones no se diferenciaron entre sí; la diferencia más clara correspondió al cambio entre los dos horizontes de *L. racemosa*.

Estos valores indican una condición general de salinidad del sistema, acompañada de una modificación particular en el perfil de *L. racemosa*. Los valores observados son compatibles con las condiciones salinas que caracterizan a los ambientes de manglar y deben interpretarse de manera paralela con el régimen de inundación y la conectividad hidrológica del sitio. La salinidad puede modificar la actividad microbiana y la disponibilidad de agua para los organismos del suelo, por lo que constituye otro factor capaz de intervenir indirectamente en la dinámica de la materia orgánica (Castillo-Arias *et al.*, 2021).

Por otro lado, la densidad aparente mostró valores relativamente bajos en todos los perfiles, aunque se observaron diferencias particulares entre horizontes y especies. *R. mangle* presentó los valores más bajos, de 0.91 ± 0.01 g cm⁻³ en H1 y 0.82 ± 0.10 g cm⁻³ en H2, mientras que *A. germinans* presentó 0.97 ± 0.01 y 1.02 ± 0.01 g cm⁻³, y *L. racemosa* 0.91 ± 0.01 y $1.06 \pm$

0.01 g cm⁻³, respectivamente. La menor densidad aparente observada en *R. mangle* es consistente con un suelo con mayor proporción de espacios porosos y con una importante incorporación de residuos vegetales y raíces. En ambientes de manglar, la estructura del suelo está fuertemente influenciada por el desarrollo radical, la acumulación de detritos y la dinámica de inundación, factores que pueden modificar la compactación y la distribución de los poros. Los valores obtenidos se encuentran dentro del intervalo reportado para otros manglares mexicanos por Moreno-Martínez *et al.*, (2021).

Además, la densidad real presentó un comportamiento diferente al de la densidad aparente. En particular, *L. racemosa* H2 alcanzó 2.63 ± 0.03 g cm⁻³, mientras que *R. mangle* presentó valores de 1.70 ± 0.16 y 1.75 ± 0.09 g cm⁻³. La interacción especie $\times$ horizonte fue significativa, lo que indica que los cambios verticales de esta propiedad no fueron equivalentes entre especies. La diferencia entre densidad real y aparente también pone de manifiesto que la estructura física del suelo no puede interpretarse a partir de una sola variable. Una densidad aparente baja puede favorecer una mayor porosidad, pero el comportamiento de la densidad real depende, entre otros factores, de la composición mineral y orgánica del suelo. Por esta razón, las diferencias observadas deben considerarse como parte de un conjunto de propiedades físicas que interactúan con la acumulación de materia orgánica.

La capacidad de campo mostró asimismo una respuesta diferenciada entre horizontes. En H1, los valores fueron relativamente similares entre *R. mangle* (37.65 ± 1.33 %), *A. germinans* (37.81 ± 0.02 %) y *L. racemosa* (41.40 ± 0.46 %). Sin embargo, en H2 se observó una mayor separación: *A. germinans* presentó 37.72 ± 0.05 %, *R. mangle* 33.40 ± 1.76 %, y *L. racemosa* solamente 25.49 ± 0.07 %. Este comportamiento sugiere que la capacidad de retención de agua está relacionada con cambios estructurales dentro del perfil y no únicamente con la identidad de la especie. La textura, la proporción de partículas finas, la porosidad y el contenido de materia orgánica pueden contribuir simultáneamente a estas diferencias. Además, las muestras fueron recolectadas al inicio de la temporada seca, condición que puede influir sobre el contenido de humedad y la capacidad de retención observada, tal como se ha señalado para ambientes de manglar de la región (Domínguez *et al.*, 2024).

La materia orgánica mostró una tendencia particularmente clara. Los mayores contenidos se

observaron en *R. mangle*, con 2.66 ± 0.01 % en H1 y 2.11 ± 0.04 % en H2, seguido de *A. germinans*, con 2.40 ± 0.11 y 1.97 ± 0.01 %, respectivamente. *L. racemosa* presentó los valores más bajos, especialmente en H2, donde el contenido descendió a 0.73 ± 0.00 %. Las comparaciones múltiples identificaron una diferencia significativa particularmente marcada entre *R. mangle* H1 y *L. racemosa* H2. Este patrón es consistente con la importancia de la cobertura vegetal y del aporte de biomasa en la incorporación de materia orgánica al suelo. La producción y acumulación de hojarasca, raíces finas, raíces muertas y otros residuos vegetales representan vías fundamentales para el ingreso de carbono al suelo de manglar (Palma-López *et al.*, 2007).

Los contenidos de materia orgánica encontrados son superiores a algunos de los valores previamente reportados para suelos de manglar del sureste de México. López-Jiménez *et al.*, (2019) y Núñez-Ravelo *et al.*, (2021) documentaron contenidos de materia orgánica de aproximadamente 0.11 a 1.5 %, dependiendo de las condiciones ambientales y del grado de perturbación de los sitios. En el presente estudio, los valores de *R. mangle* y *A. germinans* se encuentran por encima de ese intervalo en varios de los horizontes analizados. Esta diferencia puede estar relacionada con las características particulares del sitio, incluyendo la inundación frecuente, el aporte de biomasa y la limitada descomposición bajo condiciones de saturación. No obstante, la comparación debe hacerse con cautela debido a las diferencias metodológicas, ambientales y de profundidad de muestreo entre estudios.

El patrón observado para el carbono orgánico (% C) fue consistente con el comportamiento de la materia orgánica. Los valores fueron de 1.54 ± 0.01 y 1.22 ± 0.01 % en *R. mangle*, 1.36 ± 0.06 y 1.14 ± 0.01 % en *A. germinans*, y 0.99 ± 0.01 y 0.42 ± 0.00 % en *L. racemosa*. La disminución hacia H2 fue especialmente marcada en *L. racemosa*. Por tanto, el comportamiento del carbono no constituye un resultado aislado, sino que sigue el mismo gradiente identificado para la materia orgánica. Esta correspondencia fortalece la interpretación de que la cantidad de carbono presente en el suelo está estrechamente relacionada con la acumulación y conservación de materia orgánica.

Los valores obtenidos son menores que algunos de los reportados por Hernández-Nava *et al.*, (2022), pero superiores a los registrados por Núñez-Ravelo *et al.*, (2021) para determinados suelos de manglar perturbados, donde el carbono orgánico fue inferior a 0.2 %. Las

diferencias entre estudios pueden estar relacionadas con el grado de conservación del manglar, el tipo de suelo, el régimen de inundación, la profundidad analizada y la historia de perturbación. En este sentido, la comparación con sitios perturbados resulta particularmente útil, ya que permite observar que la conservación de la cobertura vegetal y de las condiciones hidrológicas puede desempeñar un papel importante en la recuperación de las propiedades del suelo

El comportamiento del carbono almacenado en el suelo proporciona una perspectiva adicional. Al considerar los valores de SOC por horizonte, *A. germinans* presentó aproximadamente 650.77 Mg C ha⁻¹ acumulados en los dos horizontes, seguida de *R. mangle* con 535.92 Mg C ha⁻¹ y *L. racemosa* con 282.73 Mg C ha⁻¹. En el caso de *A. germinans*, resulta particularmente interesante que el SOC aumentara desde 299.02 ± 0.10 Mg C ha⁻¹ en H1 hasta 351.75 ± 1.00 Mg C ha⁻¹ en H2. En contraste, *R. mangle* presentó una disminución de 284.29 a 251.63 Mg C ha⁻¹, mientras que *L. racemosa* mostró la reducción más pronunciada, de 183.12 a 99.61 Mg C ha⁻¹.

Este comportamiento indica que el almacenamiento de carbono no depende únicamente de cuánto carbono ingresa al suelo, sino también de las condiciones que permiten su conservación a lo largo del perfil. El mayor almacenamiento registrado en *A. germinans* podría estar relacionado con una combinación de producción de biomasa, características radicales, condiciones de humedad y propiedades fisicoquímicas favorables para la retención de carbono. En *R. mangle*, aunque los valores totales fueron menores que en *A. germinans*, se observaron contenidos relativamente elevados de materia orgánica y carbono orgánico. Esto sugiere que el aporte de biomasa de esta especie puede ser importante para mantener una reserva significativa de carbono en el suelo.

Sin embargo, el comportamiento de *L. racemosa* es diferente. El menor almacenamiento total de carbono coincide con menores contenidos de materia orgánica y carbono, especialmente en H2, donde además se registró el pH más bajo y una capacidad de campo considerablemente menor. Este conjunto de propiedades identifica a *L. racemosa* H2 como el horizonte más contrastante del sistema. No obstante, sería incorrecto interpretar que la acidez por sí misma es responsable de la menor acumulación de carbono. El patrón observado probablemente resulta de la combinación de condiciones hidrológicas, estructura del suelo,

aporte de materia orgánica y procesos microbianos.

La diferencia entre *A. germinans* y *R. mangle* también resulta relevante. Aunque *R. mangle* presentó los mayores contenidos de materia orgánica en términos porcentuales, *A. germinans* presentó las mayores existencias de SOC. Esto muestra que el almacenamiento de carbono no puede inferirse directamente a partir del porcentaje de carbono. Las existencias dependen también de la densidad del suelo y del espesor considerado. Por ello, la combinación de % C, densidad y profundidad proporciona una estimación más adecuada del carbono almacenado. Este resultado constituye uno de los principales argumentos para considerar simultáneamente las propiedades químicas y físicas del suelo en la evaluación del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono.

En este contexto, el sitio asociado con *R. mangle* presenta una característica particular que puede ayudar a explicar la conservación de la materia orgánica. Su proximidad al arroyo y a la laguna Mecoacán, aunada a la modificación de la conectividad hidrológica ocasionada por la carretera, favorece periodos de anegamiento durante la temporada de lluvias. El mantenimiento de condiciones saturadas puede limitar la disponibilidad de oxígeno y reducir la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos. Procesos similares han sido relacionados con la acumulación de carbono en suelos de humedales y manglares Camacho-Rico *et al.*, (2021) y Kida y Fujitake (2020). Así, las diferencias encontradas entre especies podrían reflejar no sólo las características de cada mangle, sino también la heterogeneidad hidrológica del paisaje en el que se desarrolla cada perfil.

Por otro lado, el análisis de componentes principales complementó los resultados univariados y permitió evaluar conjuntamente las relaciones entre las propiedades del suelo. Los dos primeros componentes explicaron el 88.48 % de la variación total, con 75.37 % correspondiente a PC1 y 13.11 % a PC2. La elevada proporción de varianza explicada indica que una parte importante de la estructura multivariada del conjunto de datos puede resumirse mediante estos dos ejes (Cuadro 3).

Cuadro 3
Cargas factoriales y varianza explicada por los dos primeros componentes principales
obtenidos a partir de las propiedades físicas y químicas de los suelos de manglar

Variable	PC1	PC2
Densidad real (DR)	-0.353	0.275
Densidad aparente (DA)	-0.256	0.742
pH	0.392	0.192
Conductividad eléctrica (CE)	-0.378	0.244
Capacidad de campo (% CC)	0.324	0.177
Materia orgánica (% MO)	0.385	0.130
Carbono orgánico del suelo (SOC)	0.332	0.467
Eigenvalue	5.276	0.918
Varianza explicada (%)	75.37	13.11
Varianza acumulada (%)	75.37	88.48

Fuente: Elaboración propia

Nota. Las variables fueron estandarizadas mediante transformación z antes del análisis. PC1 y PC2 corresponden al primer y segundo componente principal, respectivamente. Los valores en negritas representan las mayores cargas absolutas dentro de cada componente. Los dos primeros componentes explicaron conjuntamente el 88.48 % de la variación total.

El PC1 estuvo relacionado principalmente con pH, materia orgánica, capacidad de campo y SOC, mientras que DR y CE presentaron cargas negativas. Este gradiente puede interpretarse como una expresión conjunta de las condiciones químicas, de humedad y de acumulación de materia orgánica que caracterizan a los perfiles. La carga positiva de % MO y SOC resulta particularmente relevante porque confirma, desde una perspectiva multivariada, la estrecha relación entre la acumulación de materia orgánica y el almacenamiento de carbono. A su vez, la contribución de la capacidad de campo sugiere que la retención de humedad forma parte del mismo gradiente edáfico.

El PC2 estuvo dominado por la densidad aparente, con una carga de 0.742, seguida por SOC con 0.467. Este segundo eje parece representar principalmente un gradiente estructural relacionado con la compactación y la distribución del carbono dentro del perfil. En este sentido, el ACP coincide con los resultados obtenidos mediante los análisis univariados: mientras que el primer componente resume principalmente la variación asociada con la condición química y la acumulación de materia orgánica, el segundo incorpora con mayor fuerza las diferencias estructurales del suelo.

La posición diferenciada esperada para *L. racemosa* H2 dentro de este espacio multivariado

resulta coherente con sus propiedades particulares: pH marcadamente ácido, menor contenido de materia orgánica, menor porcentaje de carbono, menor SOC y una capacidad de campo reducida. Por otra parte, *A. germinans* se caracteriza por mayores existencias de carbono, particularmente en H2, mientras que *R. mangle* mantiene una combinación de elevada materia orgánica, baja densidad aparente y valores relativamente estables de pH entre horizontes. De esta manera, el ACP no solamente resume la información contenida en las variables individuales, sino que ayuda a explicar por qué los perfiles pueden diferenciarse a partir de un conjunto de propiedades que actúan simultáneamente.

En conjunto, los resultados indican que la función de almacenamiento de carbono de estos suelos de manglar está estrechamente vinculada con la interacción entre las características de la vegetación y las condiciones edáficas e hidrológicas locales. La presencia de mayores contenidos de materia orgánica y carbono en *R. mangle*, así como las mayores existencias de SOC en *A. germinans*, muestran que ambas especies pueden contribuir de manera importante al mantenimiento de las reservas de carbono, aunque mediante condiciones edáficas no necesariamente idénticas. *L. racemosa*, en cambio, presentó el perfil con menor acumulación de carbono y una mayor diferenciación entre horizontes, especialmente en H2.

En síntesis, los resultados sugieren que la recuperación de la cobertura vegetal no implica necesariamente que todas las propiedades del suelo respondan de la misma manera ni a la misma velocidad. En el sitio, la recuperación de la materia orgánica y del carbono depende de la producción y deposición de biomasa, así como de la estabilidad física del suelo, la humedad, la salinidad, el pH y el régimen de inundación. Por ello, la evaluación de la recuperación de un manglar debería considerar un conjunto integrado de indicadores edáficos y no únicamente la presencia o ausencia de vegetación.

La comparación con el suelo antropogénico de referencia refuerza esta interpretación, ya que los perfiles de manglar mostraron una mayor capacidad de almacenamiento de carbono. En términos de existencias acumuladas, *A. germinans* alcanzó aproximadamente 651 Mg C ha⁻¹, *R. mangle* 536 Mg C ha⁻¹ y *L. racemosa* 283 Mg C ha⁻¹, mientras que el suelo antropogenizado utilizado como referencia presentó alrededor de 470 Mg C ha⁻¹. Estos valores sugieren que la recuperación de la cobertura de manglar puede favorecer la recuperación de funciones edáficas relacionadas con el almacenamiento de carbono. Sin

embargo, la comparación debe interpretarse considerando las diferencias en densidad, profundidad y condiciones hidrológicas de los sitios, ya que las existencias de carbono no dependen exclusivamente del contenido porcentual de carbono.

En términos generales, los resultados respaldan la importancia de los manglares de la laguna de Mecoacán como sistemas capaces de conservar cantidades importantes de carbono en el suelo. La información obtenida también muestra que esta capacidad no es homogénea entre especies ni a lo largo del perfil. La interacción entre vegetación, inundación, estructura del suelo y procesos biogeoquímicos parece ser determinante para explicar la distribución del carbono. En particular, las condiciones observadas en *A. germinans* sugieren una elevada capacidad de almacenamiento en profundidad, mientras que *R. mangle* destaca por sus contenidos relativamente altos de materia orgánica y carbono y por una estructura edáfica de menor densidad aparente. El perfil de *L. racemosa*, especialmente H2, representa la condición más contrastante y evidencia cómo cambios importantes en pH, humedad, materia orgánica y carbono pueden ocurrir dentro de un mismo sistema de manglar.

Por lo tanto, más que considerar a una especie como universalmente superior a otra en términos de almacenamiento de carbono, los resultados sugieren que cada especie se encuentra asociada con una combinación particular de condiciones edáficas. Esta perspectiva resulta particularmente importante en estudios de restauración, ya que la recuperación del servicio de almacenamiento de carbono de los ecosistemas dependerá tanto de la recuperación de la cobertura vegetal como de la conservación de las condiciones hidrológicas y edáficas que permiten que el carbono permanezca almacenado en el suelo. En este sentido, los resultados obtenidos coinciden con la importancia que diversos autores han atribuido a la interacción entre vegetación, dinámica hidrológica y propiedades del suelo en la conservación del carbono de los ecosistemas de manglar (Palma-López *et al.*, 2007; Moreno-Martínez *et al.*, 2021; Camacho-Rico *et al.*, 2021; Kida y Fujitake, 2020).

2.3. Morfología bacteriana presente en los perfiles de suelo de manglar

La caracterización morfológica bacteriana permitió identificar similitudes y diferencias entre las colonias aisladas de los suelos asociados a las diferentes especies de mangle evaluadas (Tabla 1). Los resultados mostraron coincidencias morfológicas entre algunas colonias

provenientes de distintos tipos de suelo. La colonia R1 del suelo asociado a *Rhizophora mangle* presentó características semejantes a B2 del suelo asociado a *Laguncularia racemosa*; R2 coincidió con B4; R3 mostró similitud con N2 del suelo asociado a *Avicennia germinans*; mientras que N4 presentó características equivalentes a B1.

Estas coincidencias indican la presencia de aislados bacterianos con rasgos morfológicos semejantes entre los diferentes ambientes edáficos analizados. En contraste, las colonias N1, N3 y B3 presentaron características morfológicas particulares, sin equivalencias entre los aislados obtenidos de las otras especies de mangle, evidenciando variabilidad fenotípica entre las comunidades bacterianas cultivables asociadas a los distintos suelos.

Tabla 1
Caracterización morfológica macroscópica de un Unidad Formadora de Colonia bacteriana de los suelos de manglares estudiados

Suelo	Bacteria	Borde	Color	Forma	Elevación	superficie	Estructura	Consistencia	Diferenciación
<i>R. mangle</i>	R1	entero	blanco	circu lar	cóncav a	suave	Opaca	Membra nosa	Sin diferencia ción
	R2	entero	anaranjado	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
	R3	entero	amarillo	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
<i>A. germinans</i>	N1	entero	beige	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
	N2	entero	amarillo	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
	N3	entero	blanco	circu lar	cóncav a	suave	Translu cido		
	N4	entero	blanco amarillento	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
<i>L. racemosa</i>	B1	entero	blanco amarillento	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
	B2	entero	blanco	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		
	B3	crenado	blanco	circu lar	cóncav a	rugosa	Opaca		
	B4	enteros	anaranjado	circu lar	cóncav a	suave	Opaca		

Fuente: Elaboración propia.

Se ha documentado que factores específicos del suelo, como pH, salinidad, dinámica hídrica y contenido de materia orgánica, influyen directamente en la estructura y composición de las comunidades microbianas edáficas de los manglares (Alongi, 2014). Las similitudes

morfológicas observadas entre algunos aislados bacterianos provenientes de diferentes especies de mangle podrían estar relacionadas con la existencia de condiciones edáficas compartidas, particularmente aquellas asociadas con la disponibilidad de carbono orgánico, humedad y condiciones reductoras características de estos ecosistemas.

Aunque los manglares han sido ampliamente reconocidos por su biodiversidad vegetal y faunística, los microorganismos edáficos constituyen un componente funcional esencial debido a su participación en procesos biogeoquímicos fundamentales, como la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno y la regulación de los flujos de carbono (García-Martínez *et al.*, 2021). En este sentido, la presencia de aislados con características morfológicas semejantes entre diferentes especies de mangle puede reflejar la influencia de condiciones ambientales convergentes sobre las comunidades bacterianas cultivables.

Asimismo, las diferencias observadas entre colonias exclusivas de determinados tipos de suelo pueden estar relacionadas con la heterogeneidad espacial generada por cada especie vegetal. Las raíces de los mangles modifican las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante la incorporación de materia orgánica, la liberación de exudados y la modificación de la disponibilidad de oxígeno y nutrientes en la rizosfera. Estos procesos regulan la distribución y actividad de los microorganismos asociados al suelo, favoreciendo diferencias en las comunidades bacterianas entre ambientes con distinta cobertura vegetal (Alongi, 2014; García-Martínez *et al.*, 2021).

Los suelos asociados a *R. mangle* y *A. germinans* presentaron mayor contenido de materia orgánica (% MO) y carbono orgánico del suelo (SOC), además de condiciones de mayor humedad y salinidad moderada. Estas características pueden favorecer la formación de microambientes con menor disponibilidad de oxígeno y condiciones reductoras, lo que influye en la selección de microorganismos capaces de persistir bajo fluctuaciones ambientales. Bajo estas condiciones, las similitudes morfológicas observadas entre algunas colonias bacterianas podrían estar asociadas con la presencia de nichos edáficos semejantes.

En ambientes de manglares se ha documentado la presencia de bacterias del género *Bacillus*, caracterizadas por ser Gram positivas, formadoras de esporas y metabólicamente versátiles,

con capacidad para desarrollarse bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas facultativas (Saavedra *et al.*, 2024). Estas características han sido relacionadas con procesos como la mineralización de materia orgánica, producción de enzimas extracelulares y reciclaje de nutrientes, funciones estrechamente vinculadas con la dinámica del carbono en el suelo.

Aunque en este estudio no se realizó identificación molecular de los aislados, las características morfológicas observadas representan una aproximación inicial para reconocer grupos bacterianos potencialmente asociados con determinadas condiciones edáficas. Por ejemplo, la presencia de UFC exclusivas en algunos perfiles, particularmente en el suelo asociado a *L. racemosa*, podría relacionarse con las diferencias observadas en pH, contenido de carbono orgánico, textura, capacidad de campo y porosidad. Estas propiedades regulan la disponibilidad de oxígeno, humedad y nutrientes, generando microambientes particulares que pueden favorecer a determinados grupos bacterianos y disminuir la similitud morfológica entre colonias.

Diversos estudios han reportado una alta diversidad bacteriana en ecosistemas de manglar, incluyendo géneros como *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Halomonas*, *Bhargavaea*, *Exiguobacterium*, *Hoeflea*, *Catenococcus*, *Albirhodobacter*, *Dietzia*, *Brachybacterium*, *Aerococcus* y *Myroides*, asociados a especies como *Avicennia marina* y *Rhizophora mucronata* (Baskaran *et al.*, 2023). Esta diversidad microbiana refleja la complejidad de los procesos bioquímicos que ocurren en los suelos de manglar y destaca la participación de los microorganismos en la resiliencia de estos ecosistemas frente a perturbaciones ambientales, incluyendo el cambio climático y las presiones antropogénicas.

En conjunto, los resultados sugieren que la estructura morfológica de las comunidades bacterianas cultivables en los suelos de manglar responde a la interacción entre las propiedades edáficas, la dinámica del carbono orgánico y la influencia de cada especie vegetal. La relación suelo–microorganismos–vegetación constituye un componente fundamental de la funcionalidad ecológica del manglar y de su capacidad para participar en procesos asociados al almacenamiento de carbono a largo plazo, reforzando la importancia de conservar estos ecosistemas no solo por su biodiversidad, sino también por su contribución a la mitigación del cambio climático.

PROSPECTIVA

Los hallazgos de este estudio permitieron generar herramientas básicas para la gestión de sitios perturbados en zonas de manglar, con potencial aplicación en programas de compensación ambiental y reforestación, incluidos los esquemas de bonos de carbono. En el sureste mexicano, la fragmentación de los ecosistemas de manglar es un proceso continuo asociado a la presión antropogénica; sin embargo, a pesar de la implementación de medidas de saneamiento, siguen siendo limitados los estudios enfocados en la calidad del suelo y su relación con la recuperación funcional del ecosistema. En este contexto, los resultados obtenidos aportan información clave para la toma de decisiones en esquemas de restauración mixta y su éxito a largo plazo. Particularmente, se identificó que *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle* presentan mayor adaptabilidad, al optimizar simultáneamente la captura rápida de carbono y su estabilización edáfica de largo plazo.

A nivel operativo, los resultados sugieren que los indicadores edáficos pueden integrarse en programas de monitoreo para evaluar de forma temprana el desempeño funcional de los proyectos de restauración, superando enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la cobertura vegetal. Asimismo, la evidencia microbiana abre una línea futura de investigación orientada al uso de consorcios bacterianos funcionales como herramientas de bioestimulación del suelo, con el fin de acelerar la recuperación de áreas degradadas. La incorporación de técnicas moleculares permite identificar grupos microbianos clave involucrados en la estabilización del carbono y optimizar la eficiencia de las estrategias de restauración.

Finalmente, los valores de carbono edáfico obtenidos refuerzan el papel estratégico de los manglares restaurados dentro de los esquemas de carbono azul y financiamiento climático. La estandarización de metodologías de cuantificación y su incorporación en inventarios nacionales de carbono permitirían posicionar a estos ecosistemas como infraestructuras naturales prioritarias para la mitigación del cambio climático, la adaptación costera y la planeación territorial sostenible.

CONCLUSIONES

Las especies de manglar evaluadas presentan contrastes funcionales claros en su contribución al ciclo del carbono, evidenciando que el secuestro y almacenamiento de carbono en estos ecosistemas no es homogéneo ni exclusivamente dependiente de la cobertura vegetal

Avicennia germinans mostró condiciones edáficas favorables para una mayor actividad biológica y la incorporación de carbono lábil, lo que sugiere un alto potencial de secuestro de carbono a corto y mediano plazo, asociado a su mayor capacidad de campo, textura fina y condiciones que favorecen la actividad microbiana.

En contraste, *Rhizophora mangle* destacó por promover la preservación del carbono orgánico en el suelo, particularmente en ambientes más saturados y reductivos, lo que favorece la estabilización de la materia orgánica y su almacenamiento a largo plazo. Este comportamiento resalta la importancia de los procesos subterráneos, como la acumulación de biomasa radical, la calidad del carbono y las condiciones redox, en la función de los manglares como sumideros de carbono. Por su parte, *Laguncularia racemosa*, aunque funcional dentro del ecosistema, presentó un aporte menos marcado tanto en la incorporación activa como en la conservación del carbono edáfico.

Los resultados confirman que el secuestro de carbono en manglares depende de la interacción entre propiedades físicas y químicas del suelo, dinámica hidrológica, geomorfología y características ecofisiológicas de cada especie, más que de un solo factor aislado. Asimismo, la diversidad microbiana edáfica mostró una estrecha relación con estas condiciones, desempeñando un papel clave en los procesos de descomposición, transformación y estabilización del carbono orgánico.

En conjunto, este estudio subraya la necesidad de enfoques integrales para la evaluación, conservación y restauración de manglares, que consideren simultáneamente el suelo, la hidrología, la geomorfología y la productividad primaria. Esta perspectiva resulta fundamental para estimar con mayor precisión el potencial de captura y almacenamiento de carbono de los manglares y para fortalecer su papel como ecosistemas estratégicos frente al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a los árbitros por su dedicación y rigurosa revisión para fortalecer significativamente la estructura, claridad y solidez científica de este artículo. De igual forma, agradecemos a los ejidatarios del Ejido Úrsulo Galván, en especial a la M. en C. Jenny del C. Selván García por su apoyo durante el desarrollo de la investigación en campo ya que

favoreció el acceso a los sitios como guía y gestor en el Ejido. Agradecemos a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la infraestructura científica para el desarrollo de esta investigación y en especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de manutención para los estudios en el posgrado de FGF y LLVV.

DECLARACIÓN DE USO RESPONSABLE Y ÉTICO DE IAG

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) para apoyar la edición del lenguaje, incluyendo la mejora de la gramática, claridad, redacción científica y traducción al inglés. Después de utilizar esta herramienta, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido generado según fue necesario y asumen plena responsabilidad por el contenido del artículo publicado.

REFERENCIAS

Alongi DM. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*. 6: 195-219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>

Alongi DM. (2020). Carbon Balance in Salt Marsh and Mangrove Ecosystems: A Global Synthesis. *Journal of marine science and engineering*. 8 (10), 1-21. <https://doi.org/10.1146/10.3390/jmse8100767>

Ashida, K., Watanabe, T., Urayama, S., Hartono, A., Kilasara, M., Mvondo Ze, A. D. & Funakawa, S. (2021). Quantitative relationship between organic carbon and geochemical properties in tropical surface and subsurface soils. *Biogeochemistry*. 155(1), 77-95. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00813-8>

Ávila-Acosta CR, Domínguez-Domínguez M, Vázquez-Navarrete CJ, Acosta-Pech RG, Martínez-Zurimendi P. (2024). Aboveground Biomass and Carbon Storage in Mangrove Forests in Southeastern México. *Resources*. 13 (3), 1-21. <https://doi.org/10.3390/resources13030041>

Baskaran V, Mahalakshmi A, Prabavathy VR. (2023). Mangroves: A hotspot for novel bacterial and archaeal diversity. *Rhizosphere*. 27, 100748. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100748>

Bouillon S, Borges AV, Castaneda-Moya E, Diele K, Dittmar T, Duke NC, Rivera-Monroy

VH. (2008). Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*. 22, 1-12. <https://doi.org/10.1029/2007GB003052>

Camacho-Rico A, Herrera-Silveira J, Caamal-Sosa JP, Teutli-Hernández. (2021). Influencia de la salinidad en el almacén y flujos de carbono en manglares de franja de una zona cárstica. *Madera y bosque*. 27 (4), 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742426>

Castillo-Arias E, González-González A, Domínguez J. (2021). Contenido de materia orgánica en suelos de manglares en Paraíso, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 12(64), 1-20. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.921>

Castillo-Arias EA., García-López E, Palma-López, DJ, Alejandro-Magaña M, Hernández-Sánchez G, Obrador-Olán JJ. (2021). Characterization of black mangrove (*Avicennia germinans*) and red mangrove (*Rhizophora mangle*) ecosystems in Paraíso, Tabasco, Mexico. *Revista Agro productividad*. 14 (12), 83-90. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i12.1983>

Chatting, M., Al-Maslamani, I., Walton, M., Skov, M. W., Kennedy, H., Husrevoglu, Y. S., & Le Vay, L. (2022). Future mangrove carbon storage under climate change and deforestation. *Frontiers in Marine Science*. 9, 781876. <https://doi.org/10.13057/bonorowo/w120102>

Chen R, Twilley RR. (1999). Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark River estuary, Florida. *Revista Estuaries*. 22(4), 955-970. <https://doi.org/10.2307/1353075>

Cooray PLIGM, Chalmers G, Chittleborough D. (2025). A review of properties of organic matter fractions in soils of mangrove wetlands: Implications for carbon storage. *Soil Biology and Biochemistry*. 201, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109660>

Cruz-Aviña, J. R., Dzul-Ramírez, R. D., Díaz-Larrea, J., Castañeda-Roldán, E. I., Cruz-Díaz, Y. L., & Cabrera, R. (2022). Bonos de carbono como propuesta de conservación ambiental, para la microcuenca del Ejido la Laguna OM en Quintana Roo, México. *Nexo Revista Científica*. 35(02), 459-475. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14623>

Cuanalo de la CH. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3ra edición. Centro de edafología. Colegio de posgraduados Chapingo, México

Day, J. W., Rivera-Arriaga, E., del Carmen Peña-Puch, A., & Hunter, R. G. (2024). Sustainability of Gulf of Mexico coastal estuaries and lagoons: Interactions with hydrocarbon production. A review with a look to the future. *Sustainability*. 16(19), 8601. <https://doi.org/10.3390/su16198601>

DOF, 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. [Revisada julio 2025]. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>

Domínguez, I. F., Ojeda-Morales, M. E., & Bautista, C. M. (2024). Bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre provenientes de diferentes rizosferas de mangles. *Journal of Basic Sciences*, 10 (27), 46-57. <https://doi.org/10.19136/jobs.a10n27.6330>

Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 4(5), 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>

Fuentes-Domínguez, I., Vázquez-Vázquez, L. L., Morales-Bautista, C. M., Solís-Pérez, Y. Y., González-Garrido, J. A., & Ojeda-Morales, M. E. (2025). Aromatic hydrocarbons in mangrove areas in Tabasco: Preliminary studies. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 24 (3), 1-10. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA25694>

García-Córdova, E. A., Herrera-Dorantes, M. T., May-Kú, M. A., & Ardisson, P. L. (2024). Distribución espacial del zooplancton en el gradiente de salinidad entre el puerto Dos Bocas y la laguna Mecoacán, Tabasco. *Hidrobiológica*. 34(1), 61-69. <https://doi.org/10.24275/qspu3533>

García-Martínez YA, Heredia G, Guzmán-Guillermo J, Valenzuela R, & Raymundo T. 2021. Hongos asociados al mangle rojo *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae) en la Reserva de la Biosfera Isla Cozumel, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*. 128, 1-27. <https://doi.org/10.21829/ABM128.2021.1792>

Gómez, Y. G. O., & Fócil, A. B. V. (2026). Los manglares de Centla como patrimonio turístico: valorización ecológica, económica y desarrollo de una ruta sustentable en Tabasco. *Journal of Tourism and Heritage Research*. 9(2), 76-88.

<https://www.jthr.es/index.php/journal/article/view/787>

Hernández-Nava J, Pascual-Barrera AE, Zaldívar-Jiménez A, Pérez-Ceballos R. 2022. Estructura y secuestro de carbono en manglares urbanos, fundamentos para su conservación en Isla del Carmen, Campeche, México. *Botanical Sciences*. 100 (4), 899-911.

<https://doi.org/10.17129/botsci.3048>.

Izquierdo-Bautista, J., & Arévalo, J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región* 26, 20-28.

<https://doi.org/10.25054/22161325.2527>

Kida M, Fujitake N. (2020). Organic Carbon Stabilization Mechanisms in Mangrove Soils: A Review. *Forest*. 11 (9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/f11090981>

Komiyama A, Ong JE, Pongpan S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*. 89(2), 128-137.

<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>

Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. (2008). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*. 89(2), 201-219.

<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>

López-Jiménez JG, Rivera-Cruz MC, Trujillo-Narcía A, Aceves-Navarro L A, Sol-Sánchez Á, Sarracino-Martínez O. (2019). *Laguncularia racemosa* (Combretaceae) y bacterias terrestres asociadas medio siglo después de la contaminación crónica por hidrocarburos. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*. 67 (6), 1194-1209.

<https://doi.org/10.15517/rbt.v67i6.35861>

Madigan, M. T., Martinko, J. M., Dunlap, P. V., & Clark, D. P. (2008). Brock biology of microorganisms 12th edn. Int. Microbiol, 11(1), 1-2.

<https://core.ac.uk/download/pdf/159084136.pdf>

Martínez-Márquez CA, Sol-Sánchez Á, Zaldívar-Cruz JM, Sánchez-Soto S, Del Rivero Bautista N, Aliphath-Fernández MM. (2024). Local Use of Mangroves on the Coast of Southeastern México. *Resources*. 13 (11), 1-16. <https://doi.org/10.3390/resources13110154>

Méndez-Torres, B. A. (2024). Guardianes de la laguna y del manglar en riesgo: Puerto Marqués, entre violencias, turismo y desastres. *Análisis Jurídico-Político*. 6(12), 69-99. <https://orcid.org/0009-0004-3104-832X>

Montes-Ramírez, K. A., & Sánchez-Juárez, G. K. (2024). Programa Sembrando Vida en el municipio San Miguel Talea de Castro, Oaxaca, México. Estudios sociales. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*. 34(63), 1-24. <https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1420>

Moreno-Martínez A, Álvarez-Arteaga G, Orozco-Hernández ME. (2021). Heterogeneidad ambiental y alteraciones antrópicas en comunidades de manglar en el pacífico sur de México. *Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences*. 55 (1), 70-85. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.4>

Núñez-Ravelo F, Ugas-Pérez M, Calderón-Castellanos R, Rivas-Meriño F. (2021). Cuantificación del carbono y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, laguna de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista geográfica de América central*. 66(1), 340-366. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.66-1.13>

Orta-Salazar, C., Aguirre-Salado, C. A., Reyes-Hernández, H., Reyes-Agüero, J. A., & Muñoz-Robles, C. A. (2021). Mapping potential areas for conservation under forest carbon credit eligibility in a natural protected area in Northern Mexico. *Tropical Conservation Science*. 14, 1-18. <https://doi.org/10.1177/1940082921102944>

Ovando, G. E., de Escobar Fernández, A. M., Ocaña, M. A. R., Prats, G. M., & Gaitán, M. (2023). El Tren Maya, repercusiones socioeconómicas, sustentables y competitivas-turística del Sureste Mexicano: The Mayan Train, Socioeconomic Repercussions, sustainable and Tourism Competitive of the Mexican Southeast. *Latam. Revista latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*. 4(2), 122. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.718>

Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPOTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 195.

Rojas, S. J., Brenes, G. S., & Abarca, M. S. (2020). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *Revista de Estudios Sociales*, 23(47), 184–205. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/666/66671467009/html/Redalyc>

Rontard, B., Reyes H. H., Aguilar R. M. (2020). Payments for Carbon Sequestration in the Voluntary Market in Mexico: Diversity and Complexity of Implementation in Chiapas and Oaxaca. *Sociedad y Ambiente*. (22), 212-236. <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2106>

Saavedra R, Vasquez R, Sorroza L. (2024). Aislamiento e identificación de *Bacillus spp.* de manglar: Características morfológicas, bioquímicas, fisiológicas y pruebas de inhibición. *Revista Manglar*. 21 (4), 507-516. <http://doi.org/10.57188/manglar.2024.055>

Sarker, S., Masud-Ul-Alam, M., Hossain, M. S., Rahman Chowdhury, S., & Sharifuzzaman, S. M. (2021). A review of bioturbation and sediment organic geochemistry in mangroves. *Geological Journal*. 56(5), 2439-2450. <https://doi.org/10.1002/gj.3808>

Ticona-Cortavitar B, Vasquez-Regalado J, Quispe-Poma M. (2024). Comparación del método de cilindro y de probeta para determinar la densidad aparente del suelo. *IDESIA*. 42 (4), 61-68. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292024000400061>

Vázquez-Vázquez, L. L., Jiménez-Pérez, Nelly del Carmen, Cruz-Elizondo, Yadeneyro De la, Rodríguez-Luna, Ana Rosa, & Morales-Bautista, Carlos Mario. (2024). Áreas afectadas por el defoliador (*Hylesia colimatifex*) en zona de manglar de la Laguna Mecoacán, Tabasco. *Acta universitaria*. 34, 1-11. <https://doi.org/10.15174/au.2024.4066>

Velázquez-Pérez, C., Lizarraga, J. A. A., Morales, P. M., & Romero-Berny, E. I. (2025). Ecosistemas de carbono azul en Chiapas, México: la relevancia de su conservación. *Recursos Naturales y Sociedad*. 11(1), 288-303. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0019>

CC BY-NC-ND