

El carbono orgánico en los suelos de Quintana Roo (México) bajo condiciones de vegetación natural

***Fragoso-Servón P.
Pereira-Corona A.
Prezas-Hernández B.***

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Gallardo-Lancho J.F.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España

[Doi:10.19044/esj.2025.v21n33p17](https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n33p17)

Submitted: 12 August 2025

Accepted: 21 November 2025

Published: 30 November 2025

Copyright 2025 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Fragoso-Servón, P., Pereira-Corona, A., Prezas-Hernández, B. & Gallardo-Lancho J.F. (2025). *El carbono orgánico en los suelos de Quintana Roo (México) bajo condiciones de vegetación natural*. European Scientific Journal, ESJ, 21 (33), 17.

<https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n33p17>

Resumen

Quintana Roo está situado en el sureste de México. Posee clima cálido subhúmedo; geológicamente es una zona kárstica muy diversa. Se presentan 14 grupos principales de suelos que sostienen 14 formaciones vegetales principales en buen estado de conservación. Los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) dependen de factores como el clima (temperatura y humedad) y la vegetación que crece sobre ellos. Las generalizaciones del contenido de COS en grandes extensiones no consideran la heterogeneidad edáfica y biológica de Quintana Roo. El objetivo de esta investigación fue determinar el contenido de COS en los primeros -30 cm de los diferentes grupos de suelo asociados a la vegetación mejor conservada. Se identificaron 40 puntos para muestreo de suelos en zonas con vegetación bien conservada. Los resultados muestran que Histosoles, Leptosoles Fluvisoles y Phaeozems tienen los mayores porcentajes de COS, el mayor contenido en Mg C ha⁻¹ lo presentan los Histosoles, Nitisoles y Phaeozems; sin embargo, la superficie con estos tipos edáficos en Quintana Roo es muy pequeña; al contrario, los Leptosoles se encuentran presentes en siete de tipos de vegetación, y aunque con altos porcentajes de COS, no son aptos para almacenar carbono por su escasa profundidad y/o alta pedregosidad (mayor variabilidad). La selva baja

subperennifolia crece en la mayoría de los suelos; pero los de selva baja espinosa inundable y de selva baja subperennifolia poseen más alto contenido de COS en Mg C ha^{-1} . Los resultados muestran que, en condiciones naturales, el contenido de COS está condicionado por el tipo de suelo y las especies que conforman las asociaciones vegetales.

Palabras clave: Factores influyentes, Karst, Selva tropical

Organic Carbon in the Soils of Quintana Roo (Mexico) Under Natural Vegetation Conditions

Fragoso-Servón P.

Pereira-Corona A.

Prezas-Hernández B.

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Gallardo-Lancho J.F.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España

Abstract

Quintana Roo is in southeastern Mexico. It has a warm, subhumid climate; geologically, it is a highly diverse karst area. Fourteen main soil groups are present, supporting fourteen well-preserved plant formations. Soil organic carbon (SOC) contents depend on factors such as climate (temperature and humidity) and the vegetation growing on them. Generalizations of SOC content across large areas do not consider the edaphic and biological heterogeneity of Quintana Roo. The objective of this study was to determine the SOC content in the top 30 cm of the different soil groups associated with the best-preserved vegetation. Forty soil sampling points were identified in areas with well-preserved vegetation. The results show that Histosols, Leptosols, Fluvisols, and Phaeozems have the highest percentages of SOC. Histosols, Nitisols, and Phaeozems have the highest Mg C ha^{-1} content; however, the area covered by these soil types in Quintana Roo is very small. In contrast, Leptosols are present in seven vegetation types and, although they have high percentages of SOC, they are not suitable for carbon storage due to their shallow depth and/or high stoniness (greater variability). Lowland semi-evergreen forest grows on most soils; however, lowland flooded thorn forest and lowland semi-evergreen forest have higher SOC contents in terms of Mg C ha^{-1} . The results show that, under natural conditions, SOC content is influenced by soil type and the species comprising the plant assemblages.

Keywords: Influencing factors, Karst, Tropical rainforest

Introduction

En las últimas décadas el interés por el estudio del ciclo del carbono (C) en el planeta ha ido aumentando debido principalmente al incremento de la concentración de CO₂ de la atmósfera; como es conocido, el CO₂ se considera uno de los gases que favorecen el efecto invernadero, con posibles consecuencias sobre cambio climático global (Odum y Warrett, 2006; Arévalo, 2015; Ghosh et al., 2016).

El suelo contiene C hasta dos veces más que la vegetación y tres veces más que la atmósfera (Avilés Hernández et al., 2009; Montaña et al., 2016; Paz y Etcheveres, 2016; Armas et al., 2017) y el tiempo de residencia en él también es mucho mayor, características que lo hacen un excelente sumidero o almacén (Martínez et al., 2008).

Una de las formas de mitigar el efecto invernadero es reteniendo el carbono en otro compartimento distinto al atmosférico (captura de carbono); se debe considerar que se dispone de cinco grandes almacenes: el mar, el suelo, la vegetación, las rocas y la atmósfera. De ellos, el reservorio más potente y con mucho es el océano, superando enormemente al segundo, que es el suelo (Herrera y Teutli, 2017). La captura de C se define como el proceso por el cual el CO₂ de la atmósfera se incorpora en forma de C (o sales insolubles carbonatadas) en el suelo o en la biomasa, quedando inmovilizado durante largos periodos de tiempo (Gallardo, 2017); dado que la biomasa aérea es más sensible al fuego que el suelo, siempre es preferible el almacenar el C en este último.

Se estima que en las selvas tropicales se pueden acumular entre 700 y 800 Mg C ha⁻¹ considerando la vegetación y el suelo, por lo que ligeros cambios en el contenido de C en el suelo tiene profundas consecuencias en CO₂ atmosférico causante del efecto invernadero y, como consecuencia, en el cambio climático (Chen et al., 2014; Francaviglia et al., 2017; Gallardo, 2017; Arrouays et al., 2018).

Parte de las investigaciones actuales sobre la captura de C se centra en la dinámica del C orgánico de los suelos (COS) y en conocer la influencia que tienen diferentes factores (clima, tipo de roca, geomorfología, textura y estructura edáficas o el tipo de residuo orgánico) sobre el COS (Hontoria et al., 2004). En todo caso, el C edáfico se puede encontrar como componente orgánico (COS) o inorgánico (CIS), no teniéndose este último usualmente en cuenta por su pasividad (Hester y Harrison, 2010).

El COS tiene otras muy importantes funciones, como la de retener e intercambiar nutrientes, favorecer las propiedades físicas edáficas (como la estructura, la densidad aparente, la porosidad o la capacidad de retención de agua), la protección de la erosión o ser el hábitat de la innumerable biota del

suelo. O sea, no sólo se trata de la captura de C por los suelos para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero, sino que el COS acumulado puede, al mismo tiempo, mejorar la calidad edáfica y su productividad (Ramifehiarivo et al., 2017).

Uno de los problemas del COS es la alta variabilidad y distribución en el espacio y tiempo. La variabilidad se debe a que es controlada por diferentes y cambiantes condiciones ambientales (temperatura, precipitación, humedad, geomorfología, cobertura vegetal, actividad microbiana, uso y manejos antrópicos, etc.); por supuesto el tipo de suelo también influye a que la variabilidad sea más o menos acusada (Montaño et al., 2016; Rodríguez et al., 2016; Yescas et al., 2018).

En cuanto a la distribución del COS en el suelo en los ecosistemas forestales existe, por lo general, mayor concentración de COS en los horizontes edáficos más superficiales (FAO, 2002).

La mayoría de los estudios sobre COS se han realizado en ambientes templados o tropicales, generalizándose algunos contenidos o procesos de COS. Armas et al. (2017) y Bolaños et al. (2017) indicaron que existe un alto grado de incertidumbre en las estimaciones asociadas e inconsistencias cuando se analizan las bases de datos empleadas, debido a que no existen mediciones realizadas de manera regular y sistemática, utilizando siempre metodologías consistentes, además de no considerar la complejidad de las relaciones entre el suelo y su ambiente a escala global y regional. Es decir, pueden existir amplias bases de datos en algunas áreas o países, pero muchas veces los datos no se han obtenido con la misma metodología. Esto se ha detectado al analizar los mapas de suelos del reciente Atlas Nacional de México (Cruz Gaistardo et al., 2023a y 2023b), observándose que en zonas hay discrepancias al comparar el mapa de COS y el mapa de materia orgánica del suelo (MOS) al haber utilizado diferentes métodos de determinación.

Por esta razón hoy es necesario cuantificar el contenido de COS procurando seguir las mismas metodologías, periodos de tiempo, cálculos empleados y a mayores escalas, de manera que se tenga información más precisa de lo que hay para ~~que~~, de este modo, poder estimar el ritmo de cambio en el tiempo (Rodríguez et al., 2016), prestando especial atención a la toma de datos de pedregosidad y densidad aparente (Hontoria et al., 2004).

Existen diferentes sugerencias y tendencias en cuanto a la profundidad para este tipo de muestreos, Gallardo (2017) considera que lo ideal sería referirse siempre a -1,00 m o a la profundidad en la que comienza el horizonte C o R para evitar errores sistemáticos por defecto; la FAO (2002) y el IPCC (2003) buscando hacer accesibles las técnicas y metodologías a países desarrollados y subdesarrollados por igual recomiendan hacer estudios considerando una profundidad de -30 cm. En este trabajo se adoptó este último enfoque en función de los reportes existentes de los tipos de suelo en la zona

de estudio (predominancia de Leptosoles (Fragoso et al., 2017)), dentro de esta profundidad Batjes (2014) reporta contenidos de 201-213 Pg C en los primeros -30 cm de suelo para las zonas tropicales, pero indica que estos valores cambian dependiendo del grupo de suelo.

En México se han realizado estudios que muestran la distribución espacial del C en la cobertura vegetal, necromasa (hojarasca o mantillo) por un lado y en el suelo por otro; la información disponible se refiere principalmente a regiones templadas del centro del país (Segura et al., 2005).

En las zonas tropicales la alta humedad, acompañada de altas temperaturas, crean ambientes que conducen a una alta actividad microbiana que, a su vez, conlleva una alta velocidad de descomposición de los residuos orgánicos y su posterior mineralización, produciendo bajos contenidos de MOS y nutrientes en los suelos (Avilés-Hernández et al. 2009); sin embargo, estos cambios dependerán del tipo de suelo, vegetación y roca, factores que inciden sobre los suelos; por esta razón países como Gran Bretaña, Brasil o Francia consideran tanto el suelo como a la vegetación en las evaluaciones del C de los sistemas y del suelo (Segura et al., 2005).

Se han realizado escasos estudios en México hasta la actualidad relacionando la cobertura vegetal y el contenido de COS en zonas tropicales y, menos aún, en zonas kársticas como la Península de Yucatán donde el relieve es negativo (depresivo), la variabilidad de suelos alta aún en cortas distancias (Fragoso-Servón et al., 2017) y la presencia de roca caliza afectada directamente en su composición por la reacción con los ácidos orgánicos lixiviados o por las tensiones de CO₂ motivadas por la respiración microbiana que se disuelve en forma bicarbonatada (HCO₃⁻), todo ello incentivado por la precipitación acuosa (Gutiérrez, 2008).

De acuerdo con Gallardo (2017) no existe, en general, un conocimiento detallado acerca de la variabilidad espacial asociadas a cambios de uso y cobertura del suelo, aspectos que resultan relevantes para la formulación de políticas públicas en el contexto de conservación de suelos, control de la erosión o del cambio climático.

Para poder proponer estrategias viables es necesario contar con la información básica sobre los contenidos de C en los diferentes almacenes del ecosistema y tener datos finos sobre los almacenes de carbono en cada uno de los sumideros.

La urgencia de la información va de la mano con la pérdida rápida de la capacidad de almacenamiento de carbono en los bosques de México debido a los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (Ordóñez, 2014; Cruz et al., 2023d; Etchevers et al., 2024).

El potencial de captura de C viene ligado al potencial de formación de biomasa y de humificación, lo que indica que las zonas con altos índices de producción de biomasa (o altas producciones de residuos no utilizados por el

hombre) son las que mayor potencial de captura de carbono tienen, mención aparte de una más bien reducida respiración edáfica (Gallardo, 2017). En este sentido, en México tales zonas favorables están localizadas en las llanuras costeras y en el sur y sureste del país (Torres y Guevara, 2002), aunque limitadas en muchos suelos por las altas actividades microbianas.

Quintana Roo (México), poseyendo la zona kárstica más grande del país, es uno de los Estados con vegetación mejor conservada y una gran variedad de grupos de suelos, en general, con altos contenidos de COS (Segura et al., 2005); sin embargo, no existe información detallada sobre el contenido de COS en los diferentes suelos presentes asociados a los diferentes tipos de vegetación.

Por ello, el objetivo de este trabajo es, en consecuencia, evaluar el contenido de COS en los diferentes grupos de suelo asociados a los diferentes tipos de vegetación en mejor estado de conservación en Quintana Roo.

Material y Métodos

Área de estudio

Quintana Roo se localiza en la porción este de la Península de Yucatán (Fig. 1) y ocupa una superficie de 50,843 km²; sus costas tienen 865 km de extensión, colindando con el Mar Caribe (Fragoso et al., 2014).

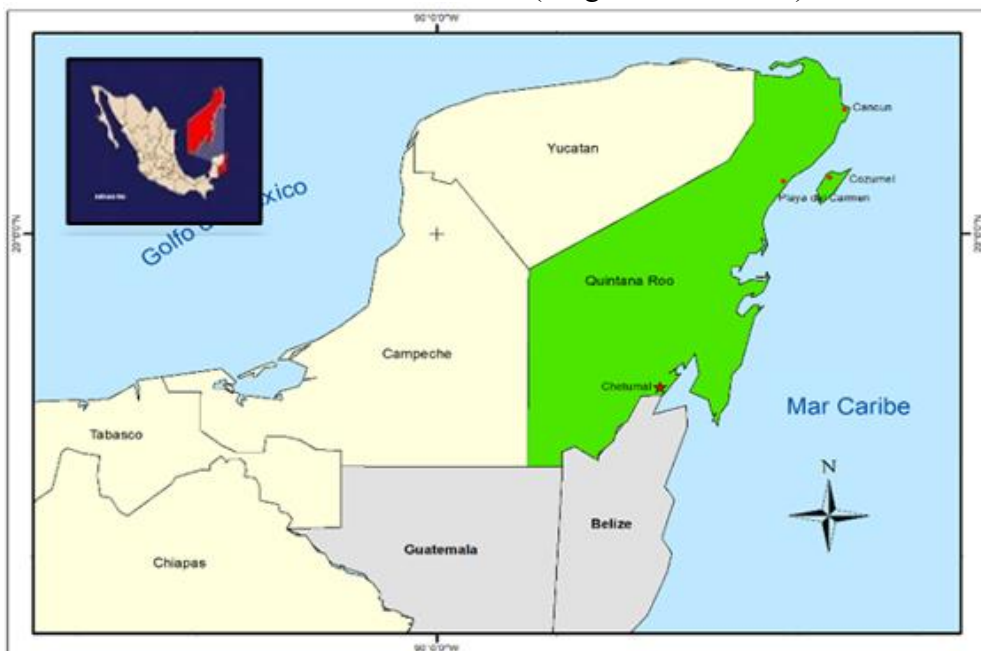


Figura 1: Área de estudio

Geológicamente es parte de una estructura sedimentaria kárstica (la más grande de México) formada durante el Mesozoico, sobre la cual se

depositaron arenas y estructuras de origen orgánico marino a lo largo del Terciario. Está formada de rocas calizas, dolomías, yeso y arenisca (López-Ramos, 1975; Ordoñez y García, 2010). En el Estado predominan las planicies y ligeros acolinamientos hacia el sur.

El clima es cálido húmedo (Aw); se acerca al más húmedo (Aw_2) en las proximidades de la costa, mientras que se hace más seco hacia el centro de la Península (Aw_0); las precipitaciones ocurren mayormente en verano y oscilan entre el intervalo de 800 a los 1500 mm año⁻¹; la temperatura media es de 25.8 °C (C.N.A., 2023).

Atendiendo a un enfoque geomorfopedológico (escala 1:50.000) Fragoso et al. (2017) identificaron la presencia de 14 Grupos Principales de Suelos (GPS) en el área de estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1: Suelos presentes en Quintana Roo

GSP primario	Área ocupada (ha)	%
Leptosol	2452346.7	48.86%
Gleysol	782927.5	15.60%
Phaeozems	575975.6	11.47%
Vertisol	377514.6	7.52%
Luvisol	278484.7	5.55%
Cambisol	255075.3	5.08%
Solonchaks	114348.1	2.28%
Histosol	63380.9	1.26%
Arenosol	52623.7	1.05%
Nitisol	45745.8	0.91%
Calcisol	11689.7	0.23%
Kastañozems	7329.1	0.15%
Regosol	1701.4	0.03%
Fluvisol	266.5	0.01%
No dato	10767.2	0.21%
Cuerpo de agua	29194.1	0.58%
Total	5019409.5	100.0%

Recientemente Cruz et al. (2023c) publicaron un mapa de suelos de México en el cual se comprueba que la unidad dominante es el Leptosol en la península de Yucatán.

Por otra parte, se han identificado 14 tipos de vegetación (Cuadro 2) de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) en buen estado de conservación (Conafor-Semarnat, 2018).

Cuadro 2: Tipos de vegetación y especies representativas

Tipo de vegetación	Especies presentes
Selva mediana subperennifolia	Palo de tinte (<i>Haematoxylum campechianum</i>), Pukté' (<i>Bucida buceras</i>), Chechem (<i>Metopium brownei</i>), Sakpaj (<i>Byrsonima bucidaefolia</i>), Zapote bobo o kuche' (<i>Pachira acuatica</i>),
Selva mediana subcaducifolia	Jabín (<i>Piscidia piscipula</i>), Nance (<i>Byrsonima crassifolia</i>), Zapote (<i>Manilkara zapota</i>), Ciricote (<i>Cordia dodecandra</i>), Chakah (<i>Bursera simaruba</i>), Tzalam (<i>Lysiloma bahamensis</i>), Chechem blanco (<i>Sebastiania longicuspis</i>)
Selva baja subperennifolia	Zapote de agua (<i>Pachira aquatica</i>), Bari (<i>Calophyllum brasiliense</i>), Anona (<i>Annona glabra</i>), Nance <i>Byrsonima crassifolia</i> , Sakpaj <i>Byrsonima bucidaefolia</i> , <i>Crescentia cujete</i> , Uva de mar <i>Coccoloba cozumelensis</i> ,
Selva baja subcaducifolia	Tzalam (<i>Lysiloma bahamensis</i>), Despeinada (<i>Beaucarnea pliabilis</i>), Palma kuka (<i>Pseudophoenix sargentii</i>), Chakah <i>Bursera simaruba</i> , las epifitas son abundantes, con presencia de orquídeas.
Selva baja espinosa	Palo de tinte (<i>Haematoxylum campechianum</i>), Pukté (<i>Bucida buceras</i>), Ciricote (<i>Cordia dodecandra</i>), Guaje (<i>Leucaena spp.</i>).
Selva baja inundable	Palo de tinte (<i>Haematoxylum campechianum</i>), Ciricote (<i>Cordia dodecandra</i>), Palma chit (<i>Thrinax radiata</i>), Tasiste (<i>Acoelorrhaphe wrightii</i>)
Manglar	Mangle rojo (<i>Rizophora mangle</i>), Mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>), Mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>) y Mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>)
Duna costera	Pantsil (<i>Suriana maritima</i>), Hierba de arena (<i>Ernodea littoralis</i>), Verdolaga de playa (<i>Sesuvium portulacastrum</i>), Orégano de playa (<i>Lantana involucrata</i>), Riñoñina (<i>Ipomoea pescaprae</i>), Sikimay (<i>Tournefortia gnaphalodes</i>), Margarita de mar (<i>Ambrosia hispida</i>), <i>Scaevola plumieri</i> , Lirio de playa (<i>Crinum americanum</i>).
Matorral costero	Nopales (<i>Opuntia</i>), Frijolillo, Pantsil (<i>Suriana maritima</i>), Riñoñina (<i>Ipomoea sp.</i>), Alfombrilla (<i>Abronia maritima</i>), Lloro sangre (<i>Croton sp</i>), Uva de mar (<i>Coccoloba uvifera</i>),
Palmar natural	Guano (<i>Sabal mexicana</i>), Corozo (<i>Scheelea liebmannii</i>), Tasiste (<i>Acoelorrhaphe wrightii</i>) y Cocoyol (<i>Acrocomia mexicana</i>)
Palmar inducido	Los géneros principales presentes son <i>Brahea</i> y <i>Sabal</i> .
Tular	comunidades de plantas acuáticas arraigadas en el fondo, constituidas por monocotiledóneas, tule (<i>Typha spp.</i>) y tulillo (<i>Scirpus spp.</i>), también en ocasiones se encuentran los carrizales. Incluye a los saibales de <i>Cladium jamaicense</i> .
Petén	islas de vegetación en medio de zonas de inundación, o pantanos de zacates (marismas), las especies características son tasiste (<i>Acoelorrhaphe wrightii</i>), mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>), chit (<i>Thrinax radiata</i>), chaká (<i>Bursera simaruba</i>), chechem (<i>Metopium brownei</i>), pukté (<i>Bucidas buceras</i>),
Popal	Es una cobertura vegetal propia de lugares pantanosos o de agua dulce estancada: platanillo de agua (<i>Thalia geniculata</i>), platanillo (<i>Heliconia sp.</i>) y algunas especies acompañantes de las familias ciperáceas y gramíneas, como <i>Panicum sp.</i> , <i>Paspalum sp.</i> y <i>Cyperus sp.</i>

Metodología

A partir de la información de suelos del Mapa Digital de Suelos de Quintana Roo (Fragoso et al., 2017) combinado con el mapa de vegetación del INFS (Conafor-Smarnat, 2018) y el mapa de uso de suelo y vegetación del

INEGI (2013), se ha utilizado un sistema de información geográfica (*QGIS* 2.18) mediante el cual se seleccionaron los grupos de suelo bajo diferentes tipos de vegetación con mejor estado de conservación, identificándose un total de 40 sitios de muestreo (Cuadro 3).

Cuadro 3: Combinación de suelos y vegetación natural presentes en Quintana Roo

Grupo de suelo (GPS)	Tipo de Vegetación													
	SmSp	SmSc	SbSp	SbSc	Sbe	Sbi	M	Dc	Mc	Pn	T	Pi	Pt	Po
Leptosol (LP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓							
Gleysol (GL)	✓			✓	✓	✓	✓				✓			✓
Vertisol (VR)	✓		✓	✓		✓								
Luvisol (LV)	✓		✓	✓										
Cambisol (CM)	✓		✓	✓										
Solonchak (SC)							✓							
Arenosol (AR)								✓	✓	✓		✓		
Nitisol (NT)				✓										
Regosol (RG)			✓				✓					✓		
Phaeozem (PH)	✓	✓	✓		✓									
Calcisol ((CL)														
Histosol (HS)							✓							
Fluvisol (FL)			✓											
Kastañozem (KS)		✓												

SmSp	Selva mediana subperennifolia	Dc	Duna costera
SmSC	Selva mediana subcaducifolia	Mc	Matorral costero
SbSp	Selva baja subperennifolia	Pn	Palmar natural
SbSc	Selva baja subcaducifolia	Pi	Palmar inducido
Sbe	Selva baja espinosa	T	Tular
Sbi	Selva baja inundable	Po	Popal
M	Manglar	Pt	Petén

En los casos del Calcisol (dado que está siendo utilizado para extracción de roca) y la zona de El Petén (por la dificultad del acceso) no pudieron ser muestreados para este estudio.

Mediante trabajo de campo se verificó la presencia de la vegetación y el grupo de suelo presente con base en el sistema *WRB* (I.U.S.S., 2015). En cada sitio se seleccionó la zona representativa del lugar.

Para la toma de muestras se separó la necromasa (hojarasca, mantillo de la superficie) y el horizonte *O* en tres puntos; en cada uno se hizo una calicata edafológica donde se tomaron muestras de suelo de -30 cm de profundidad (en el caso del Leptosol hasta la roca si fuera menor profundidad); se estimó en campo la pedregosidad presente siguiendo el método y guía propuesto por Siebe *et al*, (1996) y se tomaron las muestras edáficas con cilindro para determinar la densidad aparente en el laboratorio.

Las muestras edáficas obtenidas fueron procesadas en el laboratorio y analizadas por triplicado. Se utilizó el método de Walkley-Black para la determinación del porcentaje de COS dado que es lo que establecen las normas oficiales mexicanas para este análisis.

Para obtener el contenido de COS en los primeros -30 cm de suelo (expresado en Mg C ha^{-1}) se calculó mediante la fórmula que usa el contenido de COS, la densidad aparente edáfica (D_{ap}), la profundidad (P_{prof}) y la pedregosidad (F_p) (Ramifehiarivo *et al.*, 2017):

$$\text{COS (MgCha}^{-1}\text{)} = \text{COS (gCkg}^{-1}\text{)} \times D_{ap} \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{Prof. (m)} \times (1 - CF_p)$$

Una vez procesadas todas las muestras se aplicaron los estadísticos descriptivos de media, desviación estándar y varianza correspondientes.

Resultados

Se identificaron en campo 13 de los 14 grandes tipos de vegetación, a saber, Selva mediana (subperennifolia y subcaducifolia), Selva baja (subcaducifolia, subperennifolia, espinosa e inundable), Palmar (natural e inducido), Manglar, Vegetación de duna costera, Petén, Popal y Tular.

Por otra parte, se evidenciaron 13 de los 14 grupos principales de suelos (GPS), a saber, Leptosol, Gleysol, Phaeozems, Vertisol, Luvisol, Solonchak, Histosol, Arenosol, Nitisol, Kastañozem, Regosol y Fluvisol.

En las muestras edáficas correspondientes en 11 de los 13 GPS analizados, el porcentaje de COS oscila entre alto a muy alto; las unidades de suelos que presentan los porcentajes más altos de COS son Histosol y Leptosol (25.9 y 11.2%), los que presentan los menores valores son Solonchak y Arenosol con 1,1 y 1,5 % respectivamente (Fig. 2), el Luvisol presenta valores medios y el resto de los suelos presentan valores muy altos de acuerdo con la NOM 021 (Semarnat, 2002).

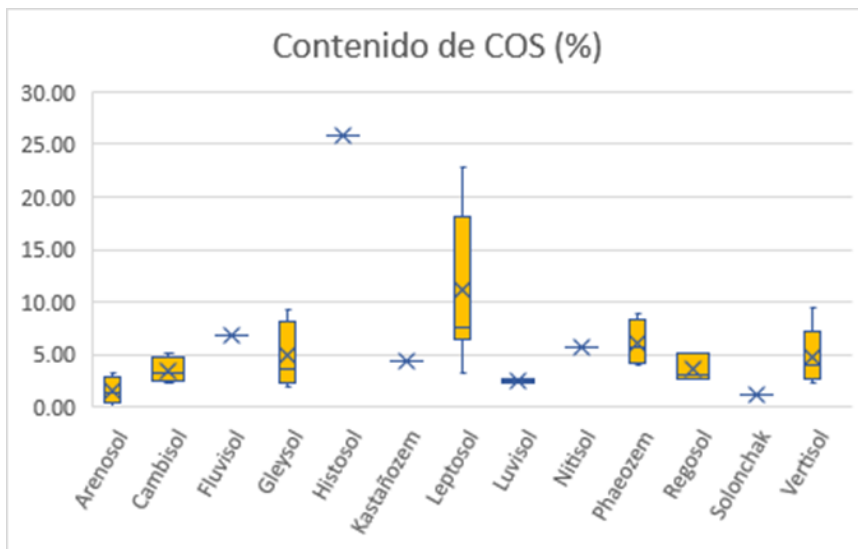


Figura 2: Contenido de COS en porcentaje por tipo de suelo en el Estado de Quintana Roo (México)

En cuanto a la variación de los porcentajes de COS obtenidos se observó que el Leptosol es el que presenta una mayor variación debido a que está presentes en 7 tipos de vegetación, lo que hace suponer que la variación de su contenido de COS va a depender también de la cobertura vegetal.

Ahora bien, considerando los contenidos de COS expresados en Mg C ha^{-1} (teniendo en cuenta la densidad aparente, la profundidad y la pedregosidad) los resultados se presentan en la Fig. 3.

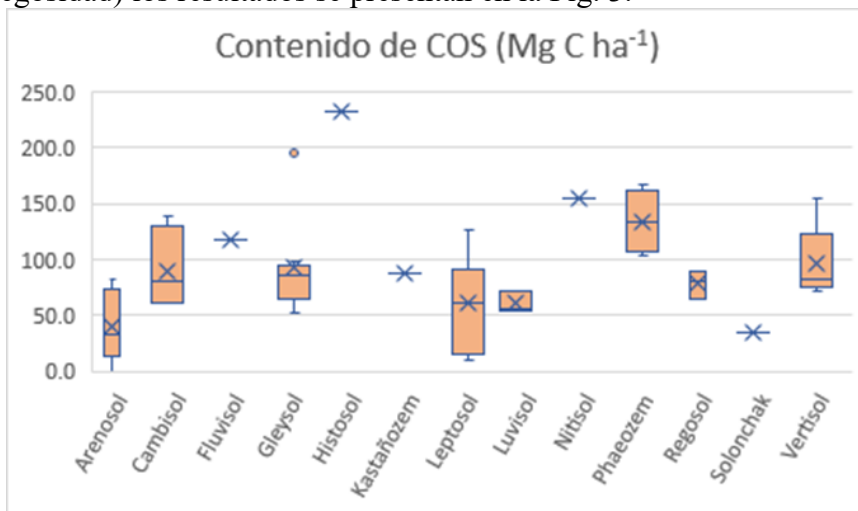


Figura 3: Contenidos medios de COS por tipo de suelo en el Estado de Quintana Roo (México)

De nuevo los dos suelos con mayor contenido de COS por unidad de área (Mg C ha^{-1}) son Histosol y Nitisol; por el contrario, los que presentan menor contenido son Solonchak, Arenosol y Luvisol; todos ellos están referidos a la misma profundidad de -30 cm.

Estos cinco GPS junto con los Regosoles y los Kastañozems representan únicamente el 5.92% de la superficie total del Estado haciendo su contribución neta a todo al COS una parte pequeña (Cuadro 4)

Cuadro 4: Contenidos de COS por área en el Estado de Quintana Roo (México)

Suelo	Área (%) ocupada	COS (%)	COS (Mg C ha^{-1})	Mg C /Estado
Leptosol	48.5	11 $\pm 7,0$	61 $\pm 41,2$	155797587.1
Phaeozem	11.4	6 $\pm 2,2$	134 $\pm 27,8$	108277656.8
Gleysol	15.5	4 $\pm 2,5$	93 $\pm 44,2$	104559962.3
Luvisol	5.5	2,5 $\pm 0,23$	60 $\pm 10,5$	38978386.6
Vertisol	5.0	5 $\pm 2,9$	96 $\pm 33,5$	22992486.6
Cambisol	5.1	4 $\pm 1,2$	90 $\pm 37,2$	18558217.7
Nitisol	0.9	6 $\pm 1,8$	155 $\pm 50,1$	7080984.6
Histosol	1.3	26 $\pm 1,2$	233 $\pm 11,0$	5339203.6
Solonchak	2.3	1 $\pm 1,0$	34 $\pm 3,1$	3871826.7
Arenosol	1.0	2 $\pm 1,3$	39 $\pm 31,7$	2045484.8
Kastañozem	0.14	4,3 $\pm 0,10$	88 $\pm 20,2$	644376.2
Regosol	0.03	4 $\pm 1,8$	78 $\pm 12,2$	108087.4
Fluvisol	0.01	7 $\pm 3,3$	117 $\pm 56,6$	31155.9

Por su parte los Phaeozem, Gleysoles, Vertisoles, Cambisoles, Luvisoles y Leptosoles representan el 94.08% de la superficie del estado, lo que aunado a sus contenidos altos los convierten en el principal reservorio de carbono del Estado.

A continuación, se presentan los GPS con características que los diferencian del resto de los suelos en el Estado. En la Figuras 4 y 5 se muestran los contenidos de COS de los diferentes suelos por tipo de vegetación.

Leptosoles.- El Leptosol constituye el GPS más abundante en el Estado (48.5 % del territorio); son suelos que, en condiciones naturales, presentan la mayor variabilidad en cuanto al porcentaje o contenido de COS (Fig. 2). También son suelos sobre los que se desarrolla la mayor diversidad de tipos de vegetación (siete en total: M, Sbi, SbSc, SbSp, SmSc, SmSp y Sbe; Fig. 4), pero su escasa profundidad (frecuentemente menos de -25 cm) y, en algunos casos, su abundante pedregosidad (más del 80 %) limitan los contenidos de COS en cuanto a unidades de masa por área, pasando de ser el segundo suelo con mayor porcentaje de COS al décimo lugar por su contenido de C expresado en Mg C ha^{-1} (Cuadro 4).

Figura 4: Contenido de COS presente en Leptosoles bajo diversos tipos de vegetación en el Estado de Quintana Roo (México)

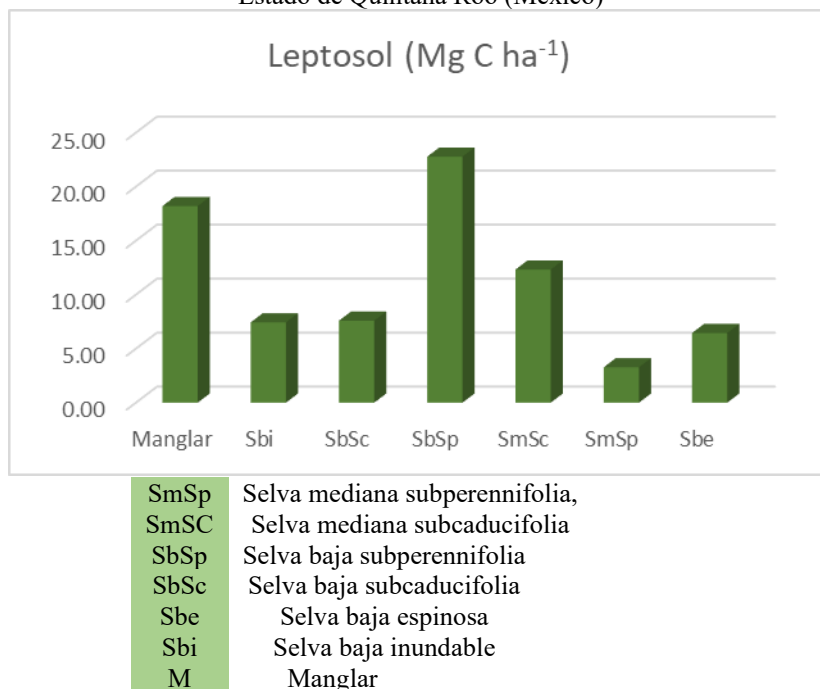
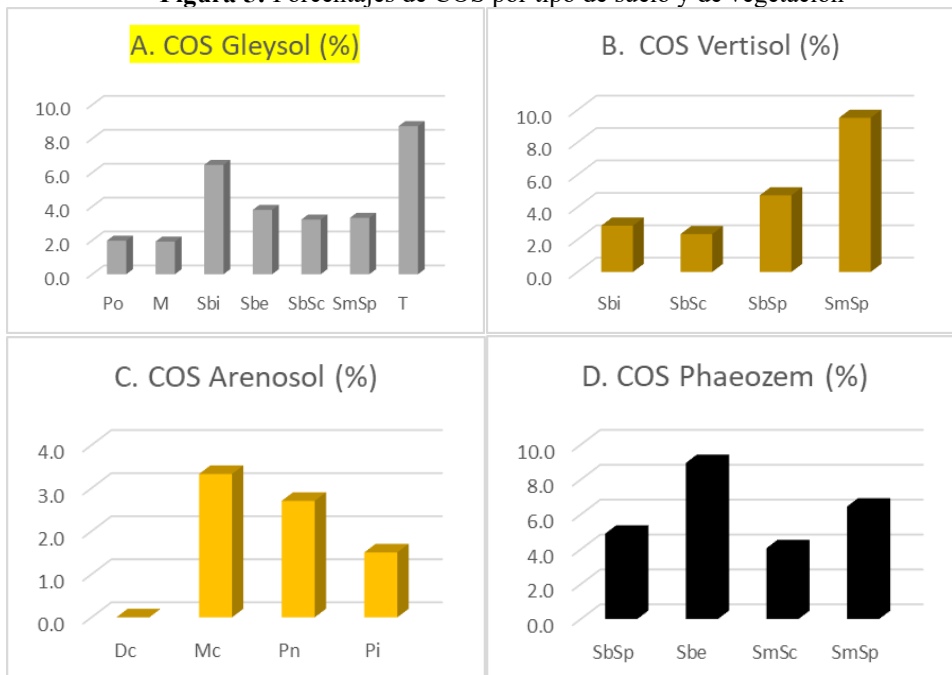
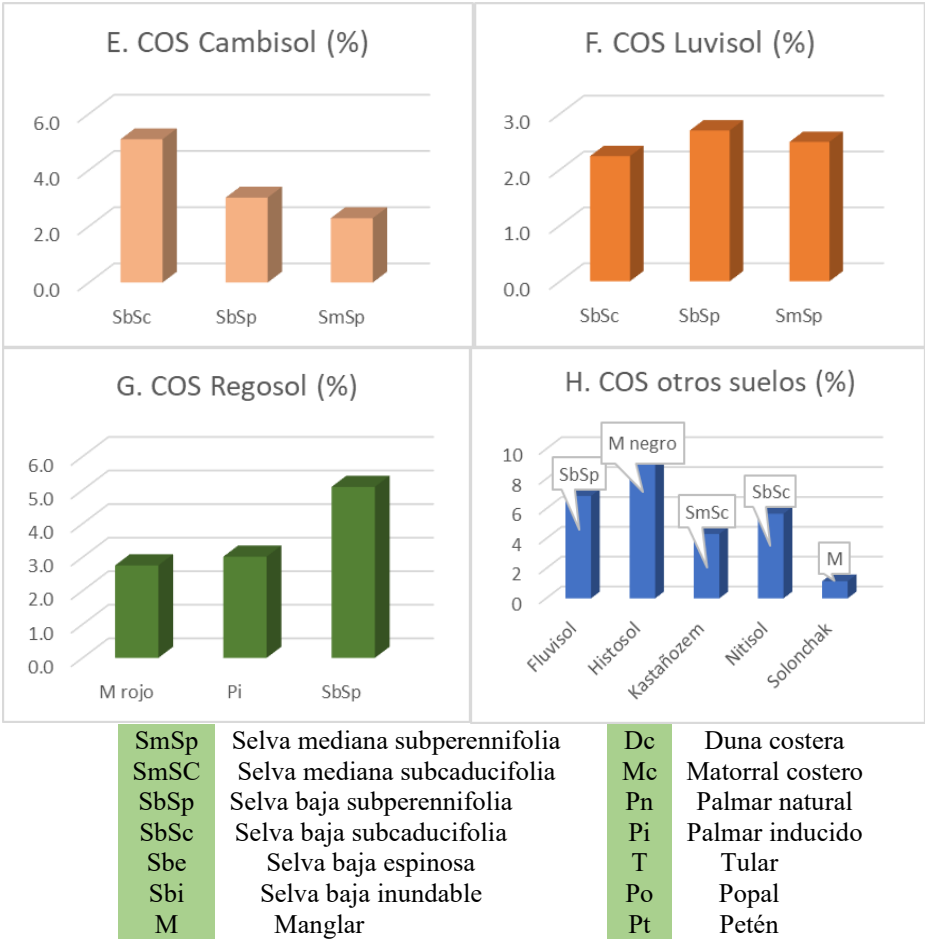


Figura 5: Porcentajes de COS por tipo de suelo y de vegetación





Gleysols

El Gleysol es el segundo GPS más abundante en Quintana Roo (15.5 %). El contenido medio de COS es de 4,2 % (muy alto); por su contenido en C (92.5 Mg C ha⁻¹) ocupa el sexto cuarto lugar (Fig. 3), soportando también 7 tipos de vegetación (Po, M, Sbi, Sbe, SbSc, SmSp y T). Presenta menor variabilidad que los Leptosols. Se puede observar que los contenidos extremos de COS en los Gleysols están asociados a la naturaleza de la vegetación inundable, ya que el tular y la selva baja se comportan como vegetación ribereña o de galería, en tanto que el popal y el manglar son formaciones de sabana inundable (Fig. 5A).

Histosoles

El Histosol es el suelo que presenta los contenidos más altos de COS en el perfil en Quintana Roo (Fig. 5H); sin embargo, ocupan una extensión muy pequeña en el Estado, estando asociados principalmente a lugares que

presentan mangle negro (el menos abundante dentro de los tipos de manglares prevalecientes en el Estado).

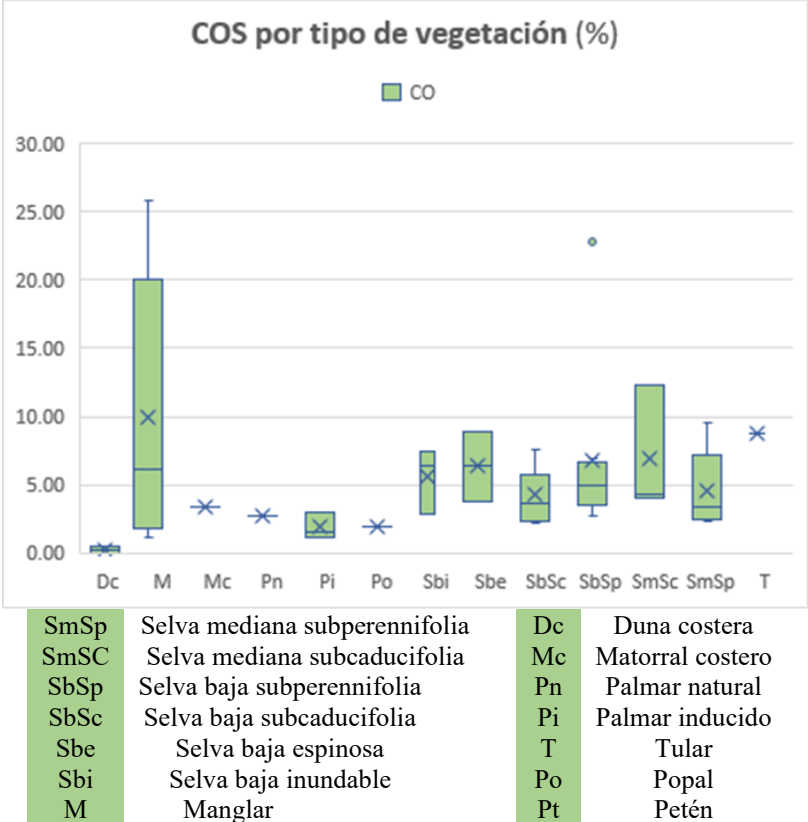
Nitisoles y Fluvisoles

Las unidades de Nitisol y Fluvisol son suelos que presentan altos contenidos de COS en los primeros -30 cm (expresados en Mg C ha⁻¹); cada uno de estos GPS tiene una cobertura vegetal característica, ocupando sólo pequeñas áreas en el Estado, cubriendo ambos solo el 0.92% de la superficie total de este (Fig. 5H).

Influencia de la vegetación

En cuanto al porcentaje de COS relacionado con la vegetación se encontró que los suelos con cobertura de mangle tienen los valores más altos (Cuadro 3), seguidos por las coberturas de tular, selva mediana subcaducifolia, selva baja subperennifolia, selva baja espinosa; los porcentajes más bajos fueron en suelos con coberturas de palmar, popal y duna costera. Esto es, en ocho tipos de vegetación los valores de COS son muy altos, en tres son altos (matorral costero y los dos tipos de palmar), en uno contenido medio (popal) y sólo en la duna costera el porcentaje de COS es bajo (Fig. 6).

Figura 6: Porcentajes de COS por tipo de vegetación en buen estado de conservación



Además, el Manglar fue la asociación vegetal que presenta la mayor variación, ya que se desarrolla en cinco grupos de suelo con diversas profundidades y grados de desarrollo, desde los Histosoles con gruesas capas de MOS, Gleysoles con problemas de drenaje, Solonchaks (suelos con sales), Regosoles (suelos poco desarrollados) y Leptosoles (suelos incipientes, muy delgados).

Las selvas baja subcaducifolia y baja subperennifolia son formaciones vegetales que muestran mayor tolerancia al tipo de suelo, pudiendo encontrarse sobre siete GPS diferentes, seguidas por la selva mediana subperennifolia que se desarrolla sobre seis suelos. Las tres citadas selvas abarcan a los suelos con mayor área en el Estado. A estas tres selvas se las puede denominar formaciones euriedáficas; en cambio, mientras que la vegetación costera (duna, matorral y palmar) se desarrollan sobre Arenosoles, el tular y el popal sólo están presentes sobre Gleysoles; consecuentemente, estas dos últimas formaciones vegetales podrían considerarse como estenoedáficas.

Dentro de los manglares identificados (botoncillo, blanco, rojo y negro), el mangle negro está presente sólo sobre Histosoles y el mangle rojo (asociado con el botoncillo y blanco) sobre los Regosoles; están presentes el mangle botoncillo y el blanco sobre Leptosoles, Gleysoles y Solonchaks.

Finalmente, se encontró que las selvas bajas espinosas e inundables son las que obtuvieron los mayores contenidos de COS (en Mg C ha^{-1}), seguidas por las selvas medianas, selvas bajas y manglar (Fig. 7).

Discusión

Como señaló Batjes (2014) son aún limitados los estudios confiables sobre el contenido de C en cada uno de los reservorios aún debido a que no se han considerado las relaciones entre los suelos, la cobertura vegetal, el clima, el relieve, el material parental y el uso del suelo. Tampoco es posible generalizar los contenidos de C de un ecosistema basándose en el tipo de vegetación sabiendo que debajo de ella pueden existir distintos suelos, con diferentes comportamientos y capacidades para servir como almacén o como emisor de C.

En el caso de los estudios del contenido de COS no hay uniformidad en cuanto profundidad de suelo a considerar, ya que algunos autores utilizan 0-20, otros 0-30 e, incluso, 0-100 cm (más recomendable según Gallardo (2017)); las unidades en las que se reportan los contenidos de COS igualmente son variables (unos usan las concentraciones en porcentajes, mientras que otros expresan contenidos en Mg C ha^{-1} , más fiable (Gallardo, 2017). Se puede añadir que la nomenclatura que utilizan se basa en clasificaciones tradicionales, no siempre coincidentes; estas diferencias entre los estudios no permiten hacer comparaciones de los diversos contenidos de C entre sitios,

dificultado por diferentes escalas utilizadas, lo que impide poder inferir las condiciones de un suelo en su contenido de COS a escala local partiendo de las generalizaciones hechas con fuentes de datos tan heterogéneas.

Avilés et al. (2009) hicieron hincapié en que la variabilidad de valores de COS depende de la vegetación, de la diferencia de velocidad de descomposición de los residuos orgánicos y de la MOS, lo que se relaciona a su vez en las zonas tropicales con las altas temperaturas y precipitaciones que llevan a una alta actividad microbiana. Batjes (2014) reportó un contenido de COS medio de 31 Mg C ha^{-1} a nivel mundial, mientras que Zhang et al. (2016) reportaron 40.9 a $51.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$ bajo condiciones de clima cálido en zonas kársticas en China, lo que sólo está ligeramente por debajo de lo reportado en este estudio para similares condiciones kársticas.

Leptosoles

En Quintana Roo el GPS con mayor cobertura de superficie es el Leptosol; eso no implica que su aporte neto al C almacenado en los suelos del Estado sea igualmente el mayor. Debido a su escasa y muy variable profundidad y pedregosidad, así como su relativa baja densidad aparente, el C neto almacenado en este GPS está casi al final del listado de suelos por su aportación global. La variabilidad mencionada para el Leptosol ha sido reportada por diversos autores para diferentes lugares en el mundo como FAO (2002), Batjes (2014), Ramifehiarivo et al. (2016), coincidiendo únicamente en que es el GPS más abundante a nivel mundial. Para el caso de la Península de Yucatán los datos que se reportan son similares a otros autores como Ortiz (2010) y Delgado et al. (2017) tanto en los contenidos como en la variabilidad que presentan. Los resultados obtenidos en este trabajo para Quintana Roo alcanzan un valor medio similar a los reportados a nivel internacional ($61 \pm 41.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$), pero con una gran variabilidad para este GPS. Considerando estos elementos y el enfoque morfogénico utilizado se ven como consistentes los resultados que muestran mayor diferencia con los reportados para sitios como Madagascar (Ramifehiarivo et al., 2016) que las diferencias reportadas para otras zonas de la Península de Yucatán (Delgado et al., 2017).

Luvisoles

En caso del Luvisol se observa un comportamiento inverso respecto al Leptosol. Por su porcentaje de COS (2.2 a 2.7%) este GPS se ubica en el lugar 11 de 13, en tanto que por su aportación (en Mg C ha^{-1}) sube a ocupar el séptimo lugar con valores que oscilan entre 53.1 a $72.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$. De acuerdo con los datos obtenidos son sólo tres los tipos de vegetación que, en general, se desarrollan sobre estos suelos (SbSc, SbSp y SmSp); sin embargo, en particular para la SmSp la cobertura vegetal es particularmente importante por

la abundancia de especies forestales de gran valor económico como el cedro y la caoba.

Los dos GPS arriba discutidos representan en buena medida las razones que subyacen respecto a la variabilidad observada en los reportes para las selvas tropicales; por ejemplo, a nivel internacional mientras que Chen et al. (2004) reportaron contenidos medios de 6.3 Mg C ha^{-1} en China, Vargas et al. (2008) señalaron que a los -30 cm hay más de $93.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en Centro y Sudamérica.

Gleysols

Los Gleysols son los suelos que ocupan el 15.47% de la superficie en Quintana Roo, por su características de drenaje sobre él se desarrollan siete tipos diferentes de vegetación destacándose el Tular, la Selva baja inundable y el Manglar que se desarrollan en zonas con periodos de inundación permanente y temporal, por su aporte de CO es el séptimo (media de 4.2%) y sexto en aporte por superficie ($92.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$), dentro de la vegetación que se desarrolla sobre este suelo destaca el Manglar por ser una especie protegida, Herrera-Silveira y Teutli-Hernández et al. (2017) reportan contenidos de COS en zonas de manglar de 219 Mg C ha^{-1} para la Península de Yucatán en los primeros 30 cm de suelo, valor que está muy por encima de los $51.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ obtenidos en este trabajo para el Gleysol, no es el manglar la vegetación que más le aporta CO a este suelo, es la selva baja inundable con $195.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, cabe aclarar que no se encontró Mangle negro asociado a este suelo.

Phaeozem y Vertisol

Estos GPS ocupan los lugares tres y seis respectivamente por su área ocupada en el Estado y los lugares tres y cinco en cuanto a su contenido de Mg C ha^{-1} , sobre estos suelos en condiciones naturales crece las selvas medianas y bajas subperennifolias y subcaducifolias, son muy ricos en contenido de C (más de 4.7% de COS), por ello son suelos que son utilizados para agricultura, principalmente en el sur de Quintana Roo.

Cambisol

Estos suelos tienen un comportamiento muy similar a los Luvisols en cuanto a área ocupada, tipos de vegetación, pero contienen mayor contenido de CO y de CO por área, el resto de los GPS (Nt, KZ, HS, RG, AR, SC y FV) representan una cobertura de superficie y una aportación neta al carbono orgánico del Estado mínima (solo el 5.92%)

Influencia de la vegetación en el COS

En el Cuadro 5 se puede observar los valores de COS determinados por diferentes autores para distintos tipos de vegetación y los resultados de este trabajo:

Autores	Valores de COS en México
Segura et al. (2014)	111 Mg C ha ⁻¹ en Selvas húmedas 106 Mg C ha ⁻¹ en Manglares 186.8 MgCha ⁻¹ en Quintana Roo
Ordoñez (2014)	115 Mg C ha ⁻¹ en Selvas perennes 100 Mg C ha ⁻¹ en Selvas deciduas
Álvarez et al. (2014)	76,2 Mg C ha ⁻¹ en Bosques tropicales perennifolios en Chamula, Jal. 207 Mg C ha ⁻¹ en los Tuxtlas, Ver.
Ortíz (2010)	110.5 Mg C ha ⁻¹ en las Selvas húmedas 69.6 Mg C ha ⁻¹ en las Selvas secas
Esta investigación	De 83.2 a 121.7 MgCha ⁻¹ abarcando 13 tipos de vegetación

En el presente trabajo la vegetación con la mayor cantidad de COS se presenta en la selva baja espinosa con 121.7 Mg C ha⁻¹ en sólo tres grupos de suelo; en cambio la selva baja subperennifolia, donde se desarrollan siete grupos de suelo, el suelo contiene 8.,2 Mg C ha⁻¹, ocupando el lugar 8 de los 13 tipos de vegetación analizados.

Si bien estas diferencias en cuanto a contenidos se deben al tipo de árboles y a la rapidez de descomposición de los residuos vegetales, Fragoso et al. (2014 y 2017) señalaron que esa gran variación también está ligada probablemente al relieve negativo producido por la disolución de la roca caliza (clásico de los karts).

Al respecto Chen et al. (2014) indicaron igualmente que existe la citada relación entre suelo y vegetación en las zonas kársticas en China; la distribución de suelos es discontinua y el impacto que tiene la cobertura vegetal sobre ellos es crítica. Los altos contenidos de C en suelos delgados y susceptibles a la erosión que hay en las selvas provienen a veces de la concentración de hojarasca (muestreados conjuntamente), por lo que los contenidos de COS tienden a ser sobreestimados cuando se generaliza con las zonas homogéneas de vegetación y distribución continua de suelos en otras partes del mundo.

Cada suelo tiene una dinámica diferente y son necesarios estudios más integrales y con mayor número de casos y combinaciones considerando el suelo, la necromasa, la vegetación, el clima, la geomorfología y la geología para comprender mejor el flujo de C que hay en ellos.

Vista toda esta variabilidad y las diferentes fuentes de la misma se considera urgente normalizar los métodos y unidades de presentación de resultados, de modo que la información obtenida pueda ser utilizada para estimar la degradación ambiental por deforestación, cambio de uso del suelo,

erosión, *etc.*, así como su funcionalidad como sumidero o emisor de C (útil en las modelizaciones de cambio climático) y para guiar a los tomadores de decisiones a la implementación de políticas de mitigación.

Conclusiones

En este estudio se analizaron los contenidos de COS en 13 suelos presentes en 13 tipos de vegetación; en todos los suelos el porcentaje de COS presentó una gran variabilidad, desde alto a muy alto, siendo los Histosoles y Leptosoles los que presentan los valores más altos (25,9 y 11,2 %).

Los suelos que contienen mayor contenido de COS (en Mg C ha^{-1}) son Histosoles, Nitisoles y Faeozems (233, 155 y 134), considerados muy altos, mientras que los grupos Solonchaks y Arenosoles presentan los valores más bajos (tanto en porcentaje como en contenido).

Los Leptosoles son los suelos que presentan la mayor variación de COS al estar presentes en 7 tipos diferentes de vegetación; son los segundos en cuanto a porcentaje de COS, pero ocupan el lugar 10 por su contenido ($61 \pm 41.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Considerando los diferentes GPS y su cobertura relativa en el estado son el Leptosol, Gleysol, Phaeozem, Vertisol, Luvisol y Cambisol representan el 95.92% del total del Carbono es decir 449 164 297.17 Mg de carbono acumulado en los suelos del Estado en tanto que el resto de los suelos solo representan el 4.08% es decir 19 121 119.22 Mg de Carbono.

Totalizando para el Estado 468 285 416.39 Mg de Carbono acumulado en los primeros 30 cm de suelos en Quintana Roo, México.

Las formaciones vegetales con mayor cobertura en los diferentes grupos de suelo fueron la Selva baja subperennifolia, la Selva baja subcaducifolia y la Selva mediana subperennifolia.

Las formaciones vegetales que presenta los contenidos más altos de COS (en Mg C ha^{-1}) es la Selva espinosa, la Selva baja inundable y la Selva mediana subperennifolia, las tres contabilizan valores de COS superiores a 100 Mg C ha^{-1} . La vegetación con los contenidos menores de COS son el Palmar inducido, el Popal y la Duna costera, con menos de 70 Mg C ha^{-1} .

Conflicto de intereses: Los autores no declararon ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de los datos: Todos los datos están incluidos en el contenido del artículo.

Declaración de financiación: Los autores no obtuvieron financiación para esta investigación.

Agradecimientos

Agradecemos al laboratorio de Ecología y Ordenamiento Territorial de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (México) por el apoyo al proyecto de investigación “*Evaluación del carbono secuestrado en los suelos de Quintana Roo, México*” origen de este artículo.

References:

1. Arévalo-Madrigal, R.M. (2015). Estimación de Almacenamiento de Carbono Orgánico en el Suelo, entre Rodales, en un Bosque de *Pinus rudis* en la Sierra el Coahuilón, Arteaga, Coahuila (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.
2. Armas, D., Guevara, M., Alcaraz-Segura, D., Vargas, R., Soriano-Luna, Á., Durante, P. y Oyonarte, C. (2017). Mapa digital del perfil del carbono orgánico en los suelos de Andalucía, España. *Ecosistemas*, 26(3), 80-88.
3. Arrouays, D., N.P.A. Saby, H. Boukir, C. Jolivet, C. Ratié, M. Schrumpf, L. Merbold, B. Gielen, S. Gogo, N. Delpierre, G. Vincent, K. Klumpp y D. Loustau. (2018). Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon. *International Agrophysics/International Advertising Association*. New York. 32(4), 633-643.
4. Avilés-Hernández, V., Velázquez-Martínez, A., Angeles-Pérez, G., Etchevers-Barra, J., los Santos-Posadas, D. y Llanderal, T. (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencia*, 43(5), 457-464.
5. Batjes, N.H. (2014). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European J. Soil Science*, 65(1), 10-21.
6. Bolaños González, Y., Bolaños González, M.A., Paz Pellat, F. y Ponce Pulido, J.I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86.
7. C.N.A. (Comisión Nacional del Agua). (2023). Servicio Meteorológico Nacional, México. Consultado enero de 2023: <<http://smn.cna.gob.mx>>.
8. Chen, X.B., Zheng, H., Zhang, W., He, X.Y., Li, L., Wu, J.S. y Su, Y.R. (2014). Effects of land cover on soil organic carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil distribution. *J. Mountain Science*, 11, 774-781.
9. Conafor-Semarnat (2018). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Forestal Nacional, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 200 pp.

10. Cruz Gaistardo, C.O., Etchevers, J.D. y Gallardo, J.F. (2023a). Mapas del Atlas Nacional de México: “Carbono orgánico del suelo” Consultado en Mayo 2024:
11. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=319812517513762&set=a.101615696000113>.
12. Cruz Gaistardo, C.O., Etchevers, J.D. y Gallardo, J.F. (2023b). Mapas del Atlas Nacional de México: “Soil organic matter”. Consultado en Mayo 2024:
13. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=326395920188755&set=a.101615696000113>.
14. Cruz Gaistardo, C.O., Ramos, Zavala et al. (2023c). Mapas del Atlas Nacional de México: “Diversidad geográfica del suelo”. Consultado en Mayo 2024:
15. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=160919383403077&set=a.101615696000113>.
16. Cruz Gaistardo, C.O. et al. (2023d). Mapas del Atlas Nacional de México: “Deforestación”. Consultado en Mayo 2024: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=154386350723047&set=a.101615696000113>.
17. Delgado-Carranza, C., Bautista-Zúñiga, F., Calvo-Irabien, L.M., Aguilar-Duarte, Y.G. y Martínez-Tellez, J.G. (2017). El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 4(10), 31-38.
18. Etchevers, J.D., Gallardo Lancho, J.F y Cruz-Gaistardo C.O. (2024). La degradación del suelo y el futuro de la humanidad. Revista MIX-TEC, 4(6): 28-39.
19. FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia. 61 pp.
20. Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O. y Pereira, A. (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 31(1), 127-137.
21. Fragoso-Servón P., F. Bautista, Pereira, A. y Zapata, G. 2017. Digital Soil Map of Quintana Roo. J. Maps, 13, 449-456.
22. Francaviglia, R., Renzi, G., Doro, L., Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., & Ledda, L. (2017). Soil sampling approaches in Mediterranean agro-ecosystems. Influence on soil organic carbon stocks. Catena, 158, 113-120.

23. Gallardo, J.F. (2017). La materia orgánica del suelo. Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco (México). 423 pp.
24. Ghosh, A., Bhattacharyya, R., Dwivedi, B.S., Meena, M.C., Agarwal, B.K., Mahapatra, P. y Agnihorti, R. (2016). Temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition as affected by long-term fertilization under a soybean-based cropping system in a sub-tropical Alfisol. *Agriculture, Ecosystems, & Environment*, 233, 202-213.
25. Gutiérrez, M., (2008). Geomorfología. Pearson/Prentice Hall, Madrid. 920 pp.
26. Hernández, J.B. y Pérez, J.T. (2003). Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 69-75.
27. Herrera-Silveira, J. A., & Teutli-Hernández, C. (2017). Carbono azul, manglares y política pública. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(1), 43-52.
28. Hester, R.E. y Harrison, R. (2010). Carbon Capture Sequestration and Storage, 1ª edn. The Royal Society of Chemistry, Londres (G. B.). 300 pp.
29. Hontoria, C., Rodríguez-Murillo, J.C. y Saa, A. (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España Peninsular. *Edafología*, 11(2), 149-157.
30. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013. Uso del suelo y vegetación Consultado en junio de 2017: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usuarios/Default.aspx.pdf>.
31. IPCC (2003). Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human-induced degradation of forest and vegetation of others vegetation types. IGES, IPCC, Hayama, Japón, 32 pp.
32. IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo, 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos, N° 106. *FAO*, Roma.
33. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22.
34. López-Ramos, E. (1975). Geological summary of the Yucatan Peninsula. En: Naim, A.E.M. (ed.), *The Gulf of Mexico and the Caribbean*: Plenum Press, New York. Pp: 257-282.

35. Martínez, E., Fuentes, J.P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96.
36. Mi, N.A., Wang, S., Liu, J., Yu, G., Zhang, W. y Jobbagy, E., 2008. Soil inorganic carbon storage pattern in China. *Glob. Change Biol.*, 14, 2380–2387.
37. Montaña, N.M., Ayala, F., Bullock, S.H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R. y Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59.
38. Odum, E.P. y G. W. Warrett. (2006). *Fundamentos de Ecología*, 5th ed. Thomson, México. 616 pp.
39. Ordoñez-Crespo, I., García-Rodríguez, M., 2010, Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México): M+A *Revista electrónica de Medio Ambiente*, 9, 15-35.
40. Ordoñez, L.A. (2014) Estudios del Carbono en México. En: Orozco, M.E. y Mireles, P. Carbono en ambientes biofísicos y productivos. Ed. Universidad Autónoma del Estado de México. Pp: 11-25.
41. Ortiz, C. (2010). *Edafología*. Universidad Autónoma de Chapingo. 8ª. Ed. Departamento de Suelos, Texcoco (México).335 pp.
42. Paz, F. y Etchevers, J.D. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
43. Ramifefiarivo, N., Brossard, M., Grinand, C., Andriamananjara, A., Razafimbelo, T., Rasolohery, A. y Razakamanarivo, H. (2017). Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. *Geoderma Regional*, 9, 29-38.
44. Rodríguez J.R., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J.J., Corbí, J.G., & Boluda, R. (2016). Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 264, 117-125.
45. Semarnat (Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. DIARIO OFICIAL (Segunda Sección). Semarnat, México
46. Segura, M.A., Sánchez, P., Ortiz, C. A. y Gutiérrez, M.C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21-28.
47. Siebe C., Jahn R. y Stahr K.. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.

48. Torres-Rojo, J.M.T. y Guevara-Sanginés, A.G. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, (63), 40-59.
49. Vargas, R., Allen, M.F. y Allen, E.B. (2008). Biomass and carbon accumulation in a fire chrono-sequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology*, 14(1), 109-124.
50. Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V.D.P., Segura-Castruita, M.A., García-Carrillo, M., Hernández-Hernández, V. y González-Cervantes, G. (2018). Variabilidad espacial del carbono orgánico e inorgánico del suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 591-610.
51. Zhang, X., Song, Z., McGrouther, K., Li, J., Li, Z., Ru, N. y Wang, H. (2016). The impact of different forest types on phytolith-occluded carbon accumulation in subtropical forest soils. *J. Soils & Sediments*, 16, 461-466.