

Estimación del contenido de carbono orgánico en suelos y vegetación del estado de Campeche. Propuesta metodológica

Estimate of organic carbon content in soils and vegetation of the State of Campeche. Methodological proposal

Luciano Pool-Novelo¹ , Víctor Kú-Quej¹ , Jesús Chi-Quej¹  y Jorge Mendoza-Vega^{1‡} 

¹ El Colegio de la Frontera Sur Unidad Campeche. Avenida Rancho Polígono, No. 2-A, Ciudad Industrial. 24500 Lerma Campeche, Campeche, México.

‡ Autor para correspondencia (jmendoza@ecosur.mx)

RESUMEN

Estimar el contenido de carbono en suelo y vegetación es una tarea onerosa, de aquí la importancia de desarrollar métodos confiables para su estimación utilizando bases de datos con reducida información. El objetivo del presente estudio fue estimar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y el carbono de la vegetación (COV) para el estado de Campeche, México. Desarrollando una metodología en condiciones de poca disponibilidad de información. Se utilizaron las bases de datos oficiales disponibles en México del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La principal limitante de los datos del INEGI para la estimación del COS por unidad de área, es la falta de información sobre la densidad aparente del suelo. Por lo tanto, la densidad aparente para los suelos se obtuvo a través de regresiones lineales múltiples, utilizando datos de 37 perfiles de suelo que fueron descritos en 10 de los 14 grupos de suelos reportados en el Estado. El COS ha⁻¹ para cada perfil/unidad de suelo para todo el estado, se calculó siguiendo la fórmula propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. La estimación del COV se realizó usando datos de la superficie ocupada por tipo de vegetación del INEGI, reclasificando los tipos de vegetación de 58 a 23, utilizando los valores de COV por ha. La reducción del coeficiente de variación en comparación con los resultados de otros estudios, muestra que la metodología aplicada produce estimaciones más precisas. El carbono total estimado para el estado de Campeche fue de 765 417 Gg, de los cuales 64.1% correspondió a COS y 35.9% a COV.

Palabras clave: carbono en ecosistemas, captura de carbono, densidad aparente, grupos de suelos, uso del suelo.

SUMMARY

Assessing carbon content in soil and vegetation is a burdensome task, hence, the importance of developing reliable methods using databases with scarce information. The objective of the present study was to estimate the content of soil organic carbon (SOC) and organic carbon in vegetation (OCV) for the State of Campeche, Mexico. Developing a methodology in conditions of low availability of information. The official database available in Mexico (Instituto Nacional de Estadística y Geografía; INEGI) was used. The main limiting factor of the INEGI database for estimating the SOC by land unit area is the missing information on soil bulk density. Therefore, the bulk density of the soils was obtained using linear multiple regressions with data from 37 soil profiles that were described in 10 of the 14 soil types reported in the State. The SOC ha⁻¹ for each profile/soil unit for the whole State was calculated using the formula proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. Estimation of OCV was achieved using INEGI database (area for vegetation type), reclassifying the vegetation types, from 58 to 23. The reduction of the coefficient of variation in comparison with the results of other studies shows that the applied methodology produces more precise estimates. The total carbon estimated for the State of Campeche was 765 417 Gg, of which 64.1% accounted for SOC and 35.9% for OCV.

Cita recomendada:

Pool-Novelo, L., V. Kú-Quej, J. Chi-Quej y J. Mendoza-Vega. 2019. Estimación del contenido de carbono orgánico en suelos y vegetación del estado de Campeche. Propuesta metodológica. *Terra Latinoamericana* 37: 317-328.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.461>

Recibido: 24 de octubre de 2018.

Aceptado: 19 de junio de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 317-328.

Index words: carbon in ecosystems, carbon capture, dry bulk density, land use, soil groups.

INTRODUCCIÓN

La concentración promedio global de bióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera durante el año 2016 fue de 403.3 mg kg^{-1} , (WMO, 2017), lo que representa incremento de 44% con respecto a la época preindustrial (280 mg kg^{-1}). Las causas de acumulación de CO_2 en la atmósfera han sido la actividad industrial, la quema de combustibles fósiles, y la deforestación debido al cambio de uso del suelo. Del año 1990 a 2015 se registró una pérdida neta de aproximadamente 129 millones de ha^{-1} de bosque, que representa una tasa anual de pérdida de 0.13%, lo que significa liberación anual de cerca de 546.35 millones de toneladas de carbono por año (FAO, 2015). Para revertir este proceso es necesario reducir la tasa de deforestación y promover la captura de CO_2 atmosférico por medio de la vegetación, acumularlo en la biomasa vegetal y el suelo. El conocimiento de los inventarios de carbono en los suelos y la biomasa vegetal es la base para el monitoreo de la dinámica del Carbono en ecosistemas terrestres para el establecimiento de estrategias y prácticas de manejo que permitan mitigar el cambio climático.

México es el décimo país con mayor contribución de gases de efecto invernadero (GEI) en el planeta (CAIT, 2017); con emisiones anuales de 748 252.2 Gg de CO_2 equivalente (SEMARNAT, 2012). Los sectores que más aportan emisiones de GEI en México son: energía (67.3%), agricultura (12.3%), procesos industriales (8.2%), uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSyS) (6.3%) y desechos (5.9%). En regiones tropicales como el sureste mexicano, las emisiones de GEI por USCUSyS, provienen principalmente de la deforestación, relacionadas a la ampliación de la frontera agropecuaria (Harvey *et al.*, 2005; de Jong *et al.*, 2009; ENCC, 2013). En el estado de Campeche, el USCUSyS contribuye con 80% del total de emisiones, principalmente debido a la conversión de selvas a pastizales para la producción de carne de ganado bovino (Gobierno del Estado de Campeche, 2012¹).

El estado de Campeche cuenta con una base de datos cartográfica digitalizada en edafología y uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Esta base de datos no cuenta con información de densidad aparente del suelo (Dap) y presenta información parcial sobre partículas inorgánicas y orgánicas mayores a 2 mm. Esta información es importante para la determinación del carbono orgánico de los diferentes grupos de suelos del estado de Campeche. Por otro lado, se identifican polígonos de grupos de suelos no respaldados con información de perfiles de suelos y, perfiles de suelos mal clasificados.

El objetivo del presente estudio fue estimar el contenido de carbono en suelos y vegetación del estado de Campeche, desarrollando una propuesta metodológica para la estimación del carbono orgánico del suelo en condiciones de reducida disponibilidad de información, que pueda ser utilizada en regiones y países con circunstancias similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estado de Campeche se localiza en el sureste de la República Mexicana, cuenta con una superficie de 57 507 km^2 (INEGI, 2018); limita al norte con el estado de Yucatán, al este con Quintana Roo, al sur con la República de Guatemala y al oeste con el Golfo de México y Tabasco. Tiene una población de 899 931 habitantes. El clima es cálido subhúmedo en la porción central y oriental (92% del estado), cálido húmedo (7.75%) en la parte suroeste y semi seco (0.05%) en su extremo noroeste. La temperatura media anual se ubica entre 26 y 27 °C, precipitación total anual entre 800 y 2000 mm. La vegetación dominante es selva mediana subperenifolia, también se reportan selvas bajas, selvas altas, vegetación de Petén, manglares y otros. Campeche se ubica geológicamente sobre calizas del Terciario y suelos del Cuaternario; fisiográficamente en el estado dominan llanuras (54%), lomeríos (42%), playas (1%) y otros (3%) (INEGI, 2001). De acuerdo al INEGI (2007) existen 14 grupos de suelos en el estado, siendo los más importantes por superficie ocupada, en orden de importancia: Leptosol (31%), Vertisol (26%), Phaeozem (17%) y Gleysol (11%).

¹ Gobierno del Estado de Campeche. 2012. Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Estado de Campeche. Reporte preparado para la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del estado de Campeche, México. 234 pp.

En el presente trabajo se identificaron y consideraron 12 grupos de suelo. En la carta edafológica serie II (INEGI, 2007), se reporta un Calcisol (CL) y un Kastañozem (KS), ambos sin respaldo de datos de campo. El primero, ocupa un pequeño polígono en el extremo sur oeste del estado, en la frontera con Tabasco y Guatemala, el cual es insignificante. El segundo, se reporta como asociado secundario junto con Vertisol (como grupo principal) y Gleysol, en un bajo inundable. Por lo tanto, el CL se integró a la unidad Phaeozem, dominante en esa zona. Y el KS se integró a la Unidad Vertisol.

En la estimación de los contenidos de carbono en el suelo se utilizó la base de datos de perfiles de suelos del INEGI del estado de Campeche (INEGI, 2004, 2014). Se seleccionaron sólo aquellos que contaban con información completa de descripción en campo y datos analíticos de laboratorio. En total se utilizaron datos de 221 perfiles, 184 perfiles de INEGI y 37 descritos por otros autores. Para el cálculo del carbono orgánico del suelo (COS) por hectárea para los grupos de suelos del estado de Campeche se utilizó la fórmula propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Penman *et al.*, 2003), que requiere de los datos de carbono orgánico, densidad aparente (Dap), espesor del horizonte y porcentaje de partículas > 2 mm (piedras y raíces). Debido a que la base de datos de INEGI carece de información sobre Dap,

ésta se estimó con ocho funciones de regresión múltiple (Cuadro 1), que incluyen la Dap obtenida en campo con los métodos del cilindro para suelos no pedregosos (Blake, 1965; USDA, 1999), y excavación del pozo en el suelo (Blake, 1965) para suelos pedregosos, en 182 horizontes de los 37 perfiles descritos por los autores.

En las funciones de regresión lineal múltiple la variable dependiente fue la Dap y las variables independientes fueron: textura (% de arena y % de arcilla), materia orgánica (MO) y profundidad del horizonte (Pr) en cm (Minitab, 2010). Algunos pares de suelos se agruparon por sus similitudes: Leptosol-Phaeozem (LP-PH), Vertisol-Gleysol (VR-GL) y Luvisol-Nitisol (LV-NT); Fluvisol (FL), Regosol (RG), Histosol (HS) y Arenosol (AR), a cada uno se le aplicó una regresión lineal múltiple. La asociación LV-NT se calculó por medio de dos regresiones: LV_{Cars}, exclusiva para la región geológica del Cuaternario, ubicada en la región fisiográfica Carso yucateco, y la regresión de LV-NT_{lomas} para la región fisiográfica Carso y lomeríos de Campeche (Kú-Quej *et al.*, 2017).

Para los Cambisol (CM) y Solonchac (SC), en los que no se realizó perfil y por tanto no se generó una función de regresión lineal, se utilizó la función de suelo AR, por ser suelos con características similares.

Después de estimar la Dap de cada horizonte (805) de los 184 perfiles de INEGI, se identificaron algunos datos de Dap fuera del rango razonable (Weil

Cuadro 1. Funciones de Regresión lineal múltiple para 10 grupos de suelos del estado de Campeche.
Table 1. Multiple linear regression functions for 10 soil groups of the state of Campeche.

Suelo	Dap g cm ⁻³	n	R ²	Función de regresión lineal múltiple
LVCars	1.14 ± 0.16	13	0.53	Dap = 1.744 - 0.0204 MO - 0.01086 A - 0.00623 Ar + 0.000656 Pr
LV-NTlomas	1.36 ± 0.15	38	0.60	Dap = 1.186 - 0.0483 MO + 0.00400 A - 0.00060 Ar + 0.001897 Pr
LP-PH	0.69 ± 0.22	16	0.58	Dap = -0.30 - 0.01355 MO + 0.0124 A + 0.0190 Ar+ 0.00478 Pr
FL	1.27 ± 0.03	19	0.04	Dap = 1.404 + 0.0009 MO - 0.00173 A - 0.00206 Ar - 0.00005 Pr
VR-GL	1.18 ± 0.18	8	0.21	Dap = 0.327 - 0.0533 MO + 0.01518 A + 0.01390 Ar - 0.00348 Pr
HS	0.56 ± 0.25	5	0.99	Dap = -1.722 + 0.07092 MO + 0.03680 A - 0.3100 Ar + 0.05252 Pr
RG	0.68 ± 0.30	5	0.99	Dap = 2.366 - 0.2149 MO + 0.08923 A - 0.2356 Ar - 0.007015 Pr
AR	1.39 ± 0.04	8	0.45	Dap = 3.34 - 0.0970 MO - 0.0193 A - 0.0217 Ar - 0.000214 Pr

Dap = densidad aparente del suelo; n = tamaño de la muestra; R² = coeficiente de determinación; MO = materia orgánica (%); A = arena (%); Ar = arcilla (%); Pr = profundidad (cm); LV = Luvisol; NT = Nitisol; LP = Leptosol; PH = Phaeozem; FL = Fluvisol; VR = Vertisol; GL = Gleysol; HS = Histosol; RG = Regosol; AR = Arenosol.

Dap = soil dry bulk density; n = sample size; R² = coefficient of determination; MO = organic matter (%); A = sand (%); Ar = clay (%); Pr = depth (cm); LV = Luvisol; NT = Nitisol; LP = Leptosol; PH = Phaeozem; FL = Fluvisol; VR = Vertisol; GL = Gleysol; HS = Histosol; RG = Regosol; AR = Arenosol.

and Brady, 2016), por lo que se revisó la información de cada perfil, detectando algunas denominaciones de suelo incorrectas. Estos perfiles de suelos fueron reclasificados y de nueva cuenta se aplicó la regresión lineal múltiple correspondiente al grupo de suelo para estimar su Dap. Posteriormente se calculó el COS ha⁻¹ para cada perfil/grupo de suelo (Figura 1), siguiendo la fórmula propuesta por el Penman *et al.* (2003). Para usar esta fórmula se convirtieron los datos a las unidades solicitadas por el Penman (2003), como se muestra en la Ecuación 1:

$$COS = \sum COS_{horizonte} = \sum \left(\frac{[COS] * Dap * Profundidad * (1 - frag)}{10} \right)_{horizonte} \quad (1)$$

dónde: COS=carbono orgánico del suelo, representativo del grupo de uso del suelo en cuestión, en toneladas de C ha⁻¹; COS_{horizonte}= contenido de carbono orgánico del suelo para un horizonte de suelo constituyente, en toneladas de C ha⁻¹; [COS]= concentración de carbono orgánico del suelo, obtenida de análisis de laboratorio en g kg⁻¹; Dap=densidad aparente (g cm⁻³); Profundidad= profundidad del horizonte o espesor de la capa de suelo, en metros; frag= volumen porcentual del fragmentos gruesos/100 (fragmentos de diámetro mayor a 2 mm), sin dimensiones. Este valor se obtiene

restando a la unidad el porcentaje de fragmentos mayores a 2 mm en el suelo.

Mediante el software ARCGIS10, se integró una capa de perfiles de suelos con los 184 perfiles de INEGI (INEGI, 2004; INEGI, 2014) y los 37 generados por otros autores (Figura 2); dicha capa se sobrepuso a la capa Edafológica Serie II del estado de Campeche (INEGI, 2007), para identificar la asociación de suelos en la que se ubica cada perfil y estimar el COS para cada grupo de suelo de la asociación. Se identificaron aquellos polígonos que tuvieran dentro de sus límites alguno(s) de los 221 perfiles; se identificó la asociación de suelos del polígono y se calculó la superficie que ocupa cada grupo de suelo en la asociación. El peso específico que se le asignó a cada unidad de suelo de la asociación fue de acuerdo a los rangos propuestos por INEGI (2011): asociación con tres grupos de suelo, el principal 60%, secundario 25% y terciario 15%; asociación con dos grupos de suelo, el principal 70% y secundario 30%; polígono con un grupo de suelo ocupa 100%.

Una vez calculada la superficie proporcional que ocupó cada grupo de suelo de la asociación, se multiplicó por el COS del perfil de cada uno de los grupos de suelo en la misma, obteniendo el COS total del polígono, sin considerar el grupo de uso del suelo.

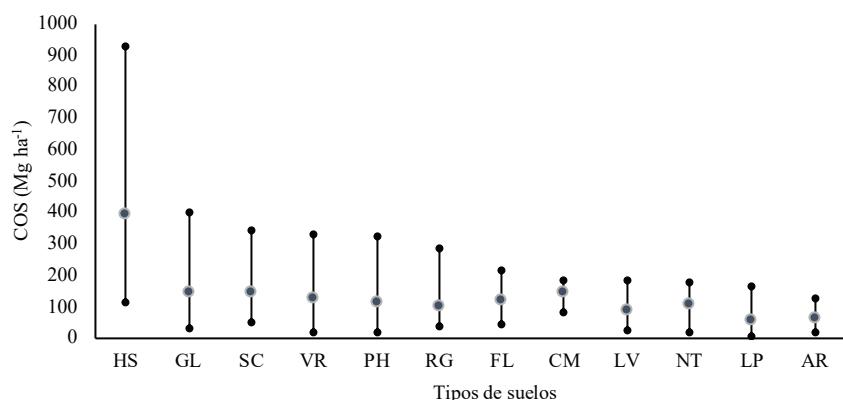


Figura 1. Acumulación de COS (valores promedio, máximo y mínimo) en los perfiles de suelos del estado de Campeche. COS = carbono orgánico del suelo; HS = Histosol; GL = Gleysol; SC = Solonchac; VR = Vertisol; PH = Phaeozem; RG = Regosol; FL = Fluvisol; CM = Cambisol; LV = Luvisol; NT = Nitisol; LP = Leptosol; AR = Arenosol.

Figure 1. Accumulation of COS (average, maximum and minimum values) in the soil profiles of the state of Campeche. COS = soil organic carbon; HS = Histosol; GL = Gleysol; SC = Solonchac; VR = Vertisol; PH = Phaeozem; RG = Regosol; FL = Fluvisol; CM = Cambisol; LV = Luvisol; NT = Nitisol; LP = Leptosol; AR = Arenosol.

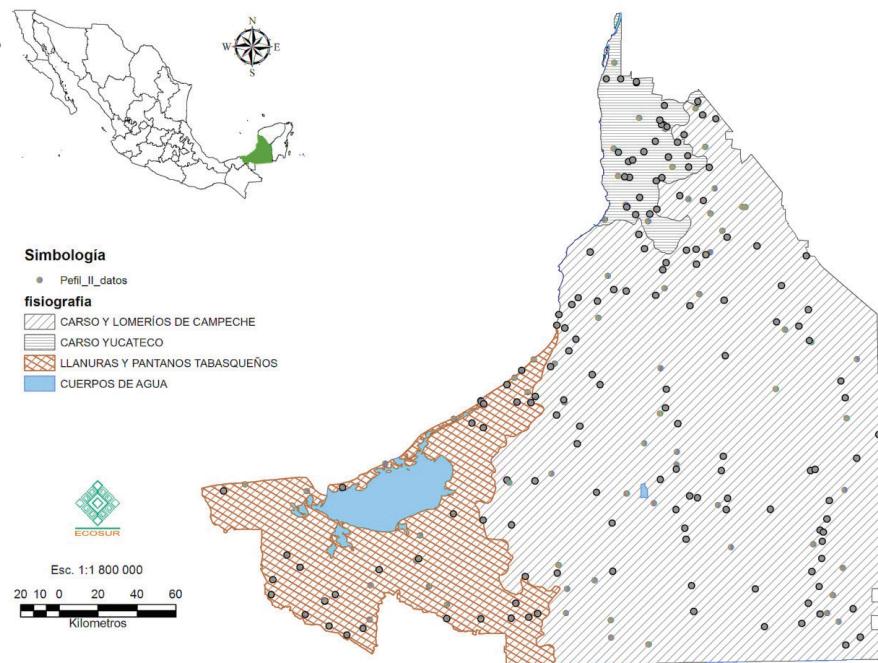


Figura 2. Ubicación de los 221 perfiles de suelos en el estado de Campeche y sistemas fisiográficos.
Figure 2. Location of the 221 soil profiles in the state of Campeche and physiographic systems.

En polígonos sin perfiles de suelos dentro de ellos, se tomó el valor del perfil del grupo de suelo más próximo dentro de la misma región fisiográfica, geológica y climática, con condiciones similares de cobertura vegetal y grupos de suelos asociados.

En la Carta de uso del suelo y vegetación (USyV) serie V (INEGI, 2014) se reportan 58 tipos de coberturas de los suelos en el estado de Campeche y la superficie que ocupan. Estas coberturas fueron reclasificadas para facilitar el manejo de la información, con base en de Jong *et al.* (2012), disminuyendo de 58 a 23 clases de tipos de vegetación y usos del suelo. INEGI desagrega en 14 clases de agricultura por manejo de humedad y tiempo de uso; todas ellas fueron agrupadas en una sola clase: agricultura. Las selvas degradadas herbáceas, arbustivas y arbóreas se integraron en 7 clases, respetando características como la altura y caída de hojas, pasando de 20 a 7 clases. Popal y tular se integraron en una sola, al igual que pastizal cultivado y natural, así mismo, pastizal halófilo se integró a vegetación halófila hidrófila y, debido a que de Jong *et al.* (2012), no reportan valores de COV para estos tipos de vegetación, se les asignó el valor de pastizales y sabanas por tener valores similares de COV (Mollard *et al.*, 2013; Deago y Pizarro, 2015).

Se calculó la superficie para cada uso del suelo y vegetación y se tomó el valor promedio por hectárea de COV para cada tipo de vegetación propuesto por de Jong *et al.* (2012). La vegetación de Petén es dominada por selva mediana subperennifolia razón por la cual se le asignó el valor de éste tipo de vegetación.

Para conocer el USyV en cada uno de los 12 grupos de suelos y asociaciones del estado de Campeche, se traslapó la carta de uso del suelo y vegetación serie V (INEGI, 2014) con la carta Edafológica serie II (INEGI, 2007), con lo que fue posible calcular la superficie, el uso y el grupo de suelo de cada polígono. Se identificó el perfil o perfiles incluidos en cada polígono y su valor de COS. En los polígonos que no tuvieron perfiles de suelos, se tomó el valor del perfil más próximo con la misma clasificación de suelo y dentro de la misma región fisiográfica, geológica y climática. Para cada tipo de uso del suelo y vegetación, los valores de COS fueron obtenidos de los promedios ponderados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de carbono orgánico total (COT), estimado para el estado de Campeche, fue de 765 417 Gg. Correspondiendo 490 973 Gg (64.1%)

al COS y 274 443 Gg (35.9%) al COV (Cuadro 2). Mientras el valor promedio de C por hectárea fue de 140.6 Mg ha⁻¹ de C, 90.2 Mg ha⁻¹ de COS y 50.4 Mg ha⁻¹ de COV. Segura-Castruita *et al.* (2005) reportan para el estado de Campeche un COS promedio de 49.3 Mg ha⁻¹, 45% inferior al nuestro. Desafortunadamente los datos no son comparables debido a que la estimación del COS hecha por dichos autores se limitó a los primeros 30 cm de profundidad del suelo y la del presente estudio se estimó valorando el COS registrado en cada horizonte del suelo.

La superficie estatal es ocupada en 86.8%, por cuatro de los doce grupos de suelos descritos en

el estado de Campeche; Leptosoles (LP), Vertisoles (VR), Phaeozems (PH), y Gleysoles (GL) (Cuadro 3). Siendo los LP los que mayor superficie ocupan (33%); sin embargo, son los suelos con menor contenido de COS por hectárea (54.97 Mg ha⁻¹). En el otro extremo, tanto en superficie ocupada y contenido de carbono orgánico, se encuentran los Histosoles (HS), estos suelos apenas ocupan 0.3% de la superficie estatal; sin embargo, su contenido medio de carbono orgánico es de 390.71 Mg ha⁻¹, el valor más alto entre todos los suelos del estado (Cuadro 3 y Figura 3). Con valores intermedios de COS se encuentran los Nitisoles (NT), Cambisoles (CM), GL, VR, Fluvisoles (FL),

Cuadro 2. COS, COV y COT en Gg por cobertura vegetal en el estado de Campeche.

Table 2. COS, COV and COT in Gg by plant cover in the state of Campeche.

Uso	Total	COV	COS	COT
		Ha	Gg	Gg
Selva alta perennifolia	7755	772	1283	2055
Selva alta subperennifolia	56 989	5676	5977	11 653
Selva mediana subperennifolia	440 146	31 338	45929	77 268
Selva mediana subcaducifolia	47 532	3337	5144	8481
Selva baja perennifolia	1358	96	75	170
Selva baja subperennifolia	330 144	23 308	31 277	54 585
Selva alta perennifolia degradada	5808	509	620	1130
Selva alta subperennifolia degradada	53 265	4671	5755	10 426
Selva mediana subperennifolia degradada	1 624 996	113 425	128 233	241 657
Selva mediana subcaducifolia degradada	808 384	53 192	57 261	110 453
Selva mediana caducifolia degradada	278 447	4177	27 760	31 937
Selva baja subperennifolia degradada	285 364	15 552	20 779	36 332
Selva de galería degradada	1082	7	139	146
Bosques de encino degradado	9713	496	1247	1743
Manglar	180 956	8849	36 104	44 953
Manglar degradado	834	13	61	74
Bosque cultivado	8639	17	846	863
Pastizal	704 729	4369	67 079	71 449
Sabana	84 909	526	6091	6618
Popal/Tular	202 068	1253	19 390	20 643
Vegetación hidrófila	3241	20	441	462
Agrícola	272 415	218	22 019	22 237
Petén	36 810	2621	7462	10 083
Total	5 445 584	274 443	490 973	765 417
Promedio (Mg ha ⁻¹)		50.4	90.2	140.6

COS = carbono orgánico del suelo; COV = carbono en la vegetación; COT = carbono orgánico total; Gg = giga gramos.

COS = soil organic carbon; COV = carbon in vegetation; COT = total organic carbon; Gg = giga grams.

PH y Solonchac (SC), entre 106.40 y 146.57 Mg ha⁻¹. Finalmente, los de menor contenido, además de los LP, son los Arenosoles (AR), Luvisoles (LV) y Regosoles (RG) con valores medios entre 54.97 y 99.02 Mg ha⁻¹.

La alta diversidad ambiental dentro un mismo grupo de suelo y el reducido número de datos disponibles se ven reflejados en el alto coeficiente de variación (CV) del COS. El CV global de COS en los suelos del estado de Campeche, de acuerdo a nuestros resultados es de 83%, éste disminuye cuando se estima para cada uno de los doce grupos de suelos, a excepción de Regosoles (RG) que se ubica por encima del valor medio (92%) (Cuadro 3). Los doce grupos de suelos se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo al CV del COS: en el nivel más alto (92% a 71%) se encuentran RG, HS, SC y GL; nivel medio (66% a 52%) representados por LP, FL, AR, PH y LV; y el nivel más bajo (< 52%) incluye a VR, NT y CM.

El uso de funciones de regresión lineal múltiple para la estimación de la Dap en los perfiles que carecían de ella, permitió aumentar la precisión en la generación de información. Para continuar aumentando la precisión es necesario buscar métodos alternativos, entre los que se encuentran la organización de los perfiles de suelos

dentro de unidades ambientales similares (unidades fisiográficas, sistemas de topoformas y tipos de vegetación). Igualmente se podría disminuir el CV con un mayor número de muestras (perfiles); sin embargo, esto significaría un gran esfuerzo en campo y demanda de recursos económicos para su realización, ya que habría que incrementar en quince tantos el número de perfiles analizados para reducir el CV a valores inferiores de 10%; pasar de 221 a 3 340 perfiles de suelos (Cuadro 3).

Los tipos de vegetación dominante en el estado de Campeche son las selvas medianas (superrennifolias, subcaducifolias y caducifolias) las cuales ocupan casi 59% de la superficie estatal, y se encuentran distribuidas en una gran diversidad de grupos de suelos (Cuadro 4); sin embargo, la mayoría de las selvas medianas están degradadas (85%). A las selvas medianas le siguen en importancia por superficie ocupada los pastizales, con 13.10% y las selvas bajas con 11.35%, de las cuales aproximadamente 50% se encuentran degradadas.

El contenido de COV en Mg ha⁻¹ en los diferentes tipos de vegetación en el estado de Campeche varía de 0.8 Mg ha⁻¹ para terrenos agrícolas a 99.6 Mg ha⁻¹ para selvas altas (Cuadro 4). La diferencia en COV es

Cuadro 3. Contenido promedio de COS y algunas estadísticas de los suelos del estado de Campeche.
Table 3. Average COS content and some statistics of the soils of the state of Campeche.

Suelo	Superficie	Perfiles	Media COS	Des. Est. COS	CV	Tamaño de muestra	
	ha	%	No.	Mg ha ⁻¹	%	No.	
LP	1 807 264.24	33.0	43	54.97	36.31	66	182
VR	1 419 472.56	25.9	59	126.33	58.32	46	86
PH	932 488.15	17.0	46	113.11	63.91	57	130
GL	599 251.05	10.9	13	144.41	101.83	71	236
LV	205 513.14	3.8	9	89.37	46.51	52	144
SC	198 487.28	3.6	5	146.57	113.44	77	272
NT	101 105.58	1.8	16	106.4	41.54	39	69
RG	100 612.87	1.8	6	99.02	91.38	92	997
FL	35 714.54	0.7	4	117.81	78.22	66	447
AR	33 120.99	0.6	10	63.2	40.30	64	208
CM	23 158.21	0.4	4	145.31	45.33	31	147
HS	17 785.01	0.3	6	390.71	312.22	8	422
Total	5 473 973.62		221			83	3340

LP = Leptosol; VR = Vertisol; PH = Phaeozem; GL = Gleysol; LV = Luvisol; SC = Solonchac; NT = Nitisol; RG = Regosol; FL = Fluvisol; AR = Arenosol; CM = Cambisol; HS = Histosol; COS = carbono orgánico del suelo; CV = coeficiente de variación. [†] Tamaño necesario de muestra para reducir el CV < 10%. LP = Leptosol; VR = Vertisol; PH = Phaeozem; GL = Gleysol; LV = Luvisol; SC = Solonchac; NT = Nitisol; RG = Regosol; FL = Fluvisol; AR = Arenosol; CM = Cambisol; HS = Histosol; COS = soil organic carbon; CV = coefficient of variation. [†] Necessary sample size to reduce the CV < 10%

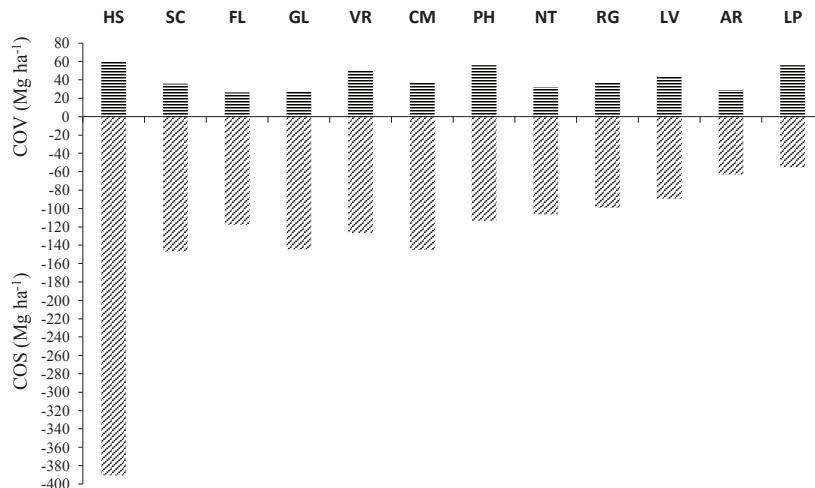


Figura 3. Acumulación de carbono orgánico promedio ponderado en suelo (COS) y vegetación (COV) para el estado de Campeche. COS = carbono orgánico del suelo; COV = carbono vegetal; HS = Histosol; SC = Solonchac; FL = Fluvisol; GL = Gleysol; VR = Vertisol; CM = Cambisol; PH = Phaeozem; NT = Nitisol; RG = Regosol; LV = Luvisol; AR = Arenosol; LP = Leptosol.

Figure 3. Accumulation of weighted average organic carbon in soil (COS) and vegetation (COV) for the state of Campeche. COS = soil organic carbon; COV = carbon in vegetation; HS = Histosol; SC = Solonchac; FL = Fluvisol; GL = Gleysol; VR = Vertisol; CM = Cambisol; PH = Phaeozem; NT = Nitisol; RG = Regosol; LV = Luvisol; AR = Arenosol; LP = Leptosol.

mínima entre las selvas medianas y selvas bajas, 71.20 y 70.60 Mg ha⁻¹ respectivamente.

El Petén y los manglares tienen los valores más altos del carbono orgánico total (COT) por hectárea (Cuadro 4). A diferencia del Cuadro 3, donde se presentan los valores de COS por grupo de suelo, en el Cuadro 4 el COS se estimó, a través de una ponderación por superficie ocupada por los suelos bajo el tipo de vegetación en cuestión. Además de los factores ambientales, las asociaciones de vegetación y suelos tienen una influencia recíproca entre sí en su desarrollo y a la vez determinan el contenido de carbono en el ecosistema. Por ejemplo, en gran proporción, los Petenes y los manglares crecen sobre HS, los suelos con mayor contenido de COS en el estado (Cuadro 4) y en el mundo por unidad de área (Eswaran *et al.*, 1993). Precisamente es debido a las condiciones anaeróbicas que estos suelos acumulan la mayor cantidad de COS por unidad de área (Tarnocai, 1998; Kayranli *et al.*, 2010). Así mismo las selvas altas en el estado de Campeche se ubican en climas con alta humedad y principalmente sobre suelos profundos que son afectados temporalmente por inundaciones: FL,

GL y VR (Cuadro 4). Por lo tanto, en los inventarios de carbono en ecosistemas terrestres, es crucial la inclusión de las asociaciones de tipo de vegetación y de suelo en las estimaciones del COT.

Los valores de COS para el estado de Campeche estimados en el presente trabajo, en términos generales, son mayores que los valores a nivel nacional (Paz *et al.*, 2016), con excepción de las selvas medianas subperennifolias. Esto puede atribuirse a varios factores: 1. El sustrato calizo del estado de Campeche, permite una mayor acumulación de COS (Mendoza-Vega y Messing, 2005); 2. Una menor degradación de suelos en el estado, por tener un historial más reciente de cambio en el uso del suelo; y 3. Diferencias en las metodologías utilizadas. Los datos a nivel nacional se estimaron a una profundidad menor (30 cm).

Es importante observar que, en todos los tipos de vegetación, con excepción de la selva baja perennifolia, el COS es mayor que el COV (Cuadro 4), resultados que coinciden con los obtenidos por otros autores (Eswaran *et al.*, 1993; Batjes, 1996; Carré *et al.*, 2010; Ruesch, 2008; FAO-ITPS, 2015).

Cuadro 4. Valores promedio de COV y COS.**Table 4. Average values of COV and COS.**

Tipo de vegetación	Total	COV	COS	COT	Grupo de suelo	
					ha	%
Selva alta perennifolia	7 754.80	0.14	99.60	165.40	265.00	VR,GL,FL
Selva alta subperennifolia	56 989.42	1.05	99.60	104.87	204.47	LP,PH,VR,GL,FL
Selva mediana subperennifolia	440 145.83	8.08	71.20	104.35	175.55	LP,VR,PH,GL,SC,CM,FL,RG,LV
Selva mediana subcaducifolia	47 532.11	0.87	70.20	108.23	178.43	VR,LP,PH,GL,LV,RG
Selva baja perennifolia	1 358.19	0.02	70.60	54.88	125.48	GL,SC,PH,FL,CM,VR
Selva baja subperennifolia	330 143.95	6.06	70.60	94.74	165.34	VR,LP,PH,GL,SC,LV,FL,AR,CM,RG
Selva alta perennifolia degradada	5 808.09	0.11	87.70	106.79	194.49	VR,PH,GL,LP,FL,CM
Selva alta subperennifolia degradada	53 264.86	0.98	87.70	108.04	195.74	LP,PH,VR,GL,FL
Selva mediana subperennifolia degradada	1 624 995.51	29.84	69.80	78.91	148.71	LP,VR,PH,GL,RG,LV,SC,AR,CM,FL,HS
Selva mediana Subcaducifolia degradada	808 383.88	14.84	65.80	70.83	136.63	LP,PH,LV,VR,NT,GL,RG,CM,HS,FL,SC,AR
Selva mediana caducifolia degradada	278 447.31	5.11	15.00	99.70	114.70	LP,PH,LV,VR,NT,RG,CM,GL,SC,HS
Selva baja subperennifolia degradada	285 364.24	5.24	54.50	72.82	127.32	VR,LP,GL,PH,FL,LV,RG,NT,SC,CM,HS
Selva de galería degradada	1 082.49	0.02	6.20	128.30	134.50	HS,FL,VR,LP,PH,LV
Bosques de encino degradado	9 712.92	0.18	51.10	128.39	179.49	GL,VR,RG,CM,PH,FL,LV
Manglar	180 956.27	3.32	48.90	199.52	248.42	SC,GL,AR,RG,FL,VR,HS,PH,LP,CM
Manglar degradado	834.35	0.02	15.70	73.25	88.95	AR,VR,SC,GL
Bosque cultivado	8 639.23	0.16	2.00	97.94	99.94	VR,PH,LP,GL,NT,LV,RG,HS,SC
Pastizal	704 728.67	12.94	6.20	95.18	101.38	VR,LP,GL,PH,RG,LV,SC,CM,AR,FL,NT,HS
Sabana	84 908.52	1.56	6.20	71.74	77.94	GL,VR,SC,LP,RG,PH,AR,CM,FL,LV
Popal/Tular	202 067.95	3.71	6.20	95.96	102.16	GL,SC,VR,FL,PH,RG,AR,LP,CM,HS
Vegetación hidrófila	3 240.62	0.06	6.20	136.23	142.43	SC,GL,RG,AR,FL,HS
Agrícola	272 415.04	5.00	0.80	80.83	81.63	LP,VR,LV,NT,PH,GL,RG,CM,AR,FL,SC,HS
Petén	36 810.01	0.68	71.20	202.72	273.92	SC,HS,RG,PH,GL,LP,CM

COS = carbono orgánico del suelo; COV = carbono en la vegetación; COT = carbono orgánico total. VR = Vertisol; GL = Gleysol; FL = Fluvisol; LP = Leptosol; PH = Phaeozem; SC = Solonchac; CM = Cambisol; RG = Regosol; LV = Luvisol; AR = Arenosol; HS = Histosol; NT = Nitisol. Fuente: COV (de Jong, 2012) y COS (presente trabajo).

COS = soil organic carbon; COV = carbon in vegetation; COT = total organic carbon. VR = Vertisol; GL = Gleysol; FL = Fluvisol; LP = Leptosol; PH = Phaeozem; SC = Solonchac; CM = Cambisol; RG = Regosol; LV = Luvisol; AR = Arenosol; HS = Histosol; NT = Nitisol. Source: COV (de Jong, 2012) and COS (present work).

Comparando el CV en la estimación del COS en 19 tipos de vegetación en común con lo publicado por Paz *et al.* (2016); en la mayoría, excepto 5, dichos autores reportan menor precisión (> CV), en un rango de 40.0 y 130% versus 20.0 y 100% (Cuadro 5). Con base en lo anterior, es de considerar que la precisión en la estimación del COS aumenta con la metodología utilizada en la presente investigación.

CONCLUSIONES

- El uso de regresiones múltiples en el cálculo de la densidad aparente del suelo, en lugar de utilizar valores por defecto, en condiciones de poca disponibilidad de información, y la ponderación de los valores de carbono orgánico del suelo (COS) considerando el tipo de cobertura vegetal, permitió aumentar

Cuadro 5. Comparación del CV del COS por cobertura vegetal entre el estado de Campeche y valores a nivel nacional.
Table 5. Comparison of the CV of the COS for plant cover between the state of Campeche and national values.

Cobertura vegetal	COS Campeche				COS Nacional (Paz <i>et al.</i> 2016)			
	n	Media	DS	CV	n	Media	DS	CV
Selva alta perennifolia	3	165.4	30.2	0.2	30	110.5	70.3	0.6
Selva mediana subperennifolia	47	104.4	64.3	0.6	71	131.6	75.0	0.6
Selva mediana subcaducifolia	12	108.2	80.5	0.7	73	52.2	38.6	0.7
Selva baja perennifolia	8	54.9	51.1	0.5	9	76.2	30.3	0.4
Selva baja subperennifolia	13	94.7	46.9	0.5	14	83.8	39.3	0.5
Selva alta perennifolia degradada	14	106.8	67.7	0.6	44	90.3	48.9	0.5
Selva mediana subperennifolia degradada	24	78.9	95.0	0.9	90	96.7	75.2	0.8
Selva mediana subcaducifolia degradada	34	70.8	91.0	0.8	218	84.5	63.8	0.8
Selva mediana caducifolia degradada	18	99.7	55.1	0.4	5	37.7	26.2	0.7
Selva de galería degradada	6	128.3	42.2	0.3	0	74.0	96.4	1.3
Bosque de encino degradada	11	128.4	36.9	0.3	265	50.4	44.2	0.9
Manglar	19	199.5	223.0	1.0	44	88.6	107.0	1.2
Bosque cultivado	23	97.9	52.1	0.5	0	47.7	43.5	1.0
Pastizal	27	95.2	34.3	0.4	1236	47.6	43.4	0.9
Sabana	22	71.7	36.7	0.5	36	52.1	52.4	1.0
Popal/Tular	12	96.0	66.1	0.6	24	88.4	86.8	1.0
Vegetación hidrófila	10	136.2	96.2	0.8	0	74.0	96.4	1.3
Agrícola	30	80.8	54.8	0.7	6878	46.0	43.4	0.9
Petén	14	202.7	218.3	0.8	0	74.0	96.4	1.3

COS = carbono orgánico del suelo; CV = coeficiente de variación; DS = desviación estándar; n = tamaño de muestra.

COS = soil organic carbon; CV = coefficient of variation; DS = standard deviation; n = sample size.

la precisión en la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos, demostrando ser una buena opción metodológica. En comparación con otros estudios, el carbono de la vegetación (CV) en la estimación del COS en el presente trabajo, se redujo. Para reducir aún más el CV del COS se recomienda aumentar el número de muestras (perfíles) y organizar los perfíles en unidades ambientales similares (fisiográficas y de cobertura vegetal).

- Se obtuvo una línea base de carbono orgánico en suelo y vegetación para el estado de Campeche, generada a partir de información de INEGI, de expertos en la estimación del carbono orgánico vegetal y fortalecida con estudios propios que permitieron hacer estimaciones de COS, usando los lineamientos propuestos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

LITERATURA CITADA

- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163. doi: https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2.
- Blake, G. R. 1965. Bulk density. pp. 374-395. In: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. American Society of Agronomy. Inc. Publisher. Madison, WI, USA.*
- CAIT (Climate Data Explorer). 2017. Introducing climate watch. World Resources Institute. Washington, DC, USA. Available online at: <http://cait.wri.org> (Consulta: noviembre 16, 2017).
- Carré, F., R. Hiederer, V. Blujdea, and R. Koeble. 2010. Background guide for the calculation of land carbon stocks in the biofuels sustainability scheme drawing on the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. EUR 24573 EN. European Communities. Luxembourg. ISBN: 978-92-79-17455-1.
- de Jong, B., M. Olguín, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C. Cruz y J. Argumedo. 2009. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 a 2006.*

- Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- de Jong, B., S. Hernández Daumas, D. Raj Aryal, V. Maldonado, G. Jiménez y A. Flores. 2012. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y bosques. pp. 21-90. In: Gobierno del Estado de Campeche 2012. Inventario estatal de emisiones de gases invernadero. Reporte preparado para la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable del Gobierno del Estado de Campeche. Campeche, México.
- Deago, E. M. y G. E. Pizarro. 2015. *Typha angustifolia* L. evaluada como sustrato sólido orgánico natural para biorremediar agua subterránea contaminada con nitrato. Rev. I+D Tecnol. 11: 41-54.
- ENCC (Estrategia Nacional de Cambio Climático). 2013. Estrategia nacional de cambio climático. Visión 10-20-40. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Gobierno de la República, México, D. F.
- Eswaran, H., E. Van Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 192-194.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2015. Global forest resources assessment 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>. Rome, Italy. ISBN: 978-92-5-108826-5.
- FAO-ITPS (Agriculture Organization of the United Nations-Intergovernmental Technical Panel on Soils). 2015. Status of the World's soil resources (SWSR) – Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>. Rome, Italy. ISBN: 978-92-5-109004-6.
- Harvey, C. A., F. Alpizar, M. Chacón, and R. Madrigal. 2005. Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: Historical overview and future perspectives. Asociación Conservación de la Naturaleza. San José, Costa Rica. doi: 10.13140/RG.2.1.2898.9524. ISBN: 9968-9557-1-X.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2001. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. Formato vectorial. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. Información nacional sobre perfiles de suelo, Versión 1.2. INEGI. Aguascalientes, México. ISBN: 970-13-2557-5.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. Carta edafológica Serie II, Escala 1:250 000. Formato vectorial. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2011. Guía para la interpretación de cartografía. Edafología escala 1:250,000 serie II. INEGI. Aguascalientes, México. ISBN: 9786074941623.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectoriales perfiles de suelos escala 1:1 000 000 (formato electrónico). INEGI. www.inegi.org.mx. Aguascalientes, México. (Consulta: febrero 20, 2018).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Uso del suelo y vegetación Serie V Escala 1:250 000. Conjunto de datos vectoriales. Periodo de toma de datos 2012 a 2013. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2018. Cuéntame. Información por entidad. Campeche. INEGI. Aguascalientes, México. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/default.aspx?tema=me&e=04> (Consulta: febrero 17, 2018).
- Kayranlı, B., M. Scholz, A. Mustafa, and A. Hedmark. 2010. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review. Wetlands 30: 111-124. doi: <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>.
- Kú-Quej, V., L. Pool-Novelo, J. Chi-Quej y J. Mendoza-Vega. 2017. Inventario del carbono orgánico del suelo en el estado de Campeche: Una propuesta metodológica. pp. 558-564. In: Paz, F. y R. Torres (eds.). 2017. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2017. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-5-0.
- Mendoza-Vega, J. and I. Messing. 2005. The influence of land and fallow period on the properties of two calcareous soils in the humid tropics of southern Mexico. Catena 60: 279-292. doi: 10.1016/j.catena.2004.12.002.
- Minitab. 2010. Minitab 17 Statistical Software. State College, PA: Minitab, Inc. www.minitab.com. (Consulta: marzo 10, 2017).
- Mollard, F., M. Roy, and A. Lee Foote. 2013. *Typha latifolia* plant performance and stand biomass in wetlands affected by surface oil sands mining. Ecol. Eng. 58: 26-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.017>.
- Paz Pellat, F., J. Argumedo Espinoza, C. O. Cruz Gaistardo, J. D. Etchevers B. y B. de Jong. 2016. Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. Terra Latinoamericana 34: 289-310.
- Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Japan. ISBN: 4-88788-003-0.
- Ruesch, A. 2008. New IPCC Tier-1 Global biomass carbon map for the year 2000. Carbon Dioxide Information Analysis Center (<http://cdiac.ornl.gov>). Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN, USA.
- Segura-Castruita, M., P. Sánchez-Guzmán, C. Ortiz-Solorio y M. Gutiérrez-Castorena. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamericana 23: 21-28.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. México. Quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. SEMARNAT-INECC. México, D. F.
- Tarnocai, C. 1998. The amount of organic carbon in various soil orders and ecological provinces in Canada. pp: 81-92. In: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.). Soil processes and the carbon cycle. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica). 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Alberto Luters y Juan Carlos Salazar (trad.). Instituto de Suelos CRN – CNIA – INTA. Buenos Aires, Argentina.

Weil, R. R. and N. C. Brady. 2016. The nature and properties of soils. Pearson Education Limited. Columbus, OH, USA. ISBN: 978-0133254488.

WMO(World Meteorological Organization).2017.WMOgreenhouse gas bulletin. The state of greenhouse gases in the atmosphere

based on global observations through 2016. WMO. https://ane4bf-datas1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_EN_final_1_1.pdf?LGJNmHpwKkEG2Qw4mEQjdm6bWxgWAJHa (Consulta: enero 15, 2018).