

# Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México

## Spatial and temporal distribution of soil organic carbon in the terrestrial ecosystems of Mexico

Fernando Paz Pellat<sup>1‡</sup>, Jesús Argumedo Espinoza<sup>2</sup>, Carlos O. Cruz Gaistardo<sup>2</sup>,  
Jorge D. Etchevers B.<sup>3</sup> y Ben de Jong<sup>4</sup>

<sup>1</sup> GRENASER, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Av. Héroe de Nacozari Sur 2301, Fracc. Jardines del Parque. 20276 Aguascalientes, Ags., México.

<sup>3</sup> Laboratorio de Fertilidad, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>4</sup> El Colegio de la Frontera Sur. Av. Rancho Polígono 2-A, Ciudad Industrial Lerma. 24500 Campeche, Campeche, México.

### RESUMEN

La distribución espacial del carbono orgánico de los suelos (COS) y su inventario, definen los requerimientos mínimos (diagnóstico) para el desarrollo de políticas públicas de medidas de mitigación de gases efecto invernadero. Las estimaciones del inventario del almacén del COS a escala global son dependientes de las fuentes de información y metodologías usadas, generalmente con alta incertidumbre. Los inventarios del COS en los ecosistemas terrestres en México se revisan en este trabajo y muestran variaciones importantes en las estimaciones nacionales, las cuales son dependientes de los datos utilizados y las consideraciones en la estimación de la densidad aparente y la fracción de fragmentos gruesos (>2mm). Bajo la consideración de que la dinámica del COS puede caracterizarse por los cambios en las clases de uso del suelo y vegetación (USyV) del INEGI, se muestran los resultados de los patrones temporales del COS por USyV así como, de acuerdo con las clases de FAO, para los informes de evaluación de los recursos forestales mundiales. Los resultados muestran la necesidad crítica de desarrollo de políticas conjuntas entre los sectores forestales y agropecuarios. Finalmente, dada la información disponible en México y, para reducir las incertidumbres, se analiza la relación textura-COS por ecosistemas terrestres de México, caracterizando los valores máximos y mínimos del COS en función del porcentaje de arena de los suelos, a profundidades de 0 a 30 cm. Los análisis que se realizaron en este trabajo se discuten con la finalidad de establecer nuevos desarrollos futuros para reducir las incertidumbres en las estimaciones del COS, tanto en su caracterización espacial como su evolución temporal.

**Palabras clave:** inventarios COS; perfiles de suelos; usos del suelo y vegetación; políticas sectoriales; relación textura-COS.

### SUMMARY

The spatial distribution of soil organic carbon (SOC), and inventory, define the minimum requirements (diagnosis) for the development of public policies for mitigation of greenhouse gases. Inventory estimates of SOC reservoirs globally are dependent on sources of information and methodologies used, generally with high uncertainty. Inventories of SOC in terrestrial ecosystems in Mexico are reviewed in this paper, showing significant variations in national estimates, which are dependent on the sample data used and the considerations in the estimation of the bulk density and the fraction of coarse fragments (>2mm). Under the assumption that the dynamics of COS can be characterized by changes in the type of land use and vegetation (LUV) *sensu* INEGI, the results of the temporal patterns of SOC by LUV are shown, and according to classes FAO for reports for assessing world forest resources. The results show the critical need to develop joint policies between forest and agricultural sectors. Finally, given the information available in Mexico and the need to reduce uncertainties, the relationship between texture-SOC is analyzed in the terrestrial ecosystems of Mexico, characterizing the maximum and minimum values of SOC based on the percentage of sand in soil at depths of 0-30 cm. The analysis in this paper is discussed to establish new future developments to reduce uncertainties in the estimates of COS, both in its spatial and temporal evolution characterization.

#### Como citar este artículo:

F. Paz Pellat, 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.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: mayo de 2016:

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 289-310:

**Index words:** *SOC inventories; soil profiles; vegetation and soil land use; sectorial policies; texture-SOC relations.*

## INTRODUCCIÓN

Los suelos tienen múltiples funciones en beneficio del ambiente, que pueden utilizarse dentro de un marco de toma de decisiones, para el desarrollo de políticas públicas para su preservación o incremento (Schulte *et al.*, 2015). En especial, el secuestro de carbono en los suelos mejora su calidad y mantiene la fertilidad, al mejorar su estructura, capacidad de retención de humedad y nutrientes, así como al reducir la erosión, entre otras funciones (Brady y Weil, 2002). La pérdida de materia orgánica del suelo (MOS) reduce la productividad agrícola y forestal e incrementa los problemas relacionados con la seguridad alimentaria (Lal, 2004). Al incrementar la MOS se mantiene o aumenta la fertilidad, se incrementa la productividad y, al mismo tiempo, se aumenta mitigación del CO<sub>2</sub> atmosférico al secuestrarlo en el suelo, con lo que se generan esquemas de “ganar-ganar” entre seguridad alimentaria y cambio climático (Smith y Powlson, 2003; Saynes *et al.*, 2012). El conocimiento de los inventarios de carbono en los suelos es un primer paso hacia el establecimiento de estrategias para su conservación, al menos.

### Estimaciones del Carbono Orgánico de los Suelos a Escala Global

Para el desarrollo de estrategias y políticas de acción para el manejo del carbono orgánico del suelo (COS), es necesario, primero, conocer su estado actual (¿en dónde estamos?), así como la evolución temporal y espacial de ganancias o pérdidas (¿cuáles son las tendencias?). Con el conocimiento del COS en los diferentes usos del suelo/tierra es posible modelar escenarios de cambio de uso del suelo y analizar sus impactos (González *et al.*, 2014). En relación al cambio climático, las simulaciones de la dinámica del COS con modelos, muestran que este almacén es poco sensible (Smith, 2012), pero no para el caso de cambios de uso del suelo o de implementación de prácticas mejoradas de manejo.

A escala global, para el primer metro de profundidad, existen diferentes estimaciones del carbono en los suelos: 1576 Pg C (Eswaran *et al.*, 1993),

1462-1548 Pg C (Batjes, 1996), 1502 Pg C (Jobbagy y Jackson, 2000); 1416 Pg C (Carré *et al.*, 2010), 1417 Pg C (Hiederer y Köchy, 2011). Scharlemann *et al.* (2014) analizaron 27 estimaciones publicadas entre 1951 y el 2011, con un intervalo de 504 a 3 000 Pg C y una mediana de 1460 Pg C. Asimismo, Todd-Brown *et al.* (2013) estimaron un nivel de confianza del 95% para el intervalo de 890 a 1660 Pg C. Las estimaciones anteriores han permitido que algunos organismos internacionales adopten un valor de 1500 Pg C para el primer metro de profundidad (IPCC, 2000; FAO, 2001). Para el caso de la profundidad de 0 a 30 cm, recomendada por el IPCC (2003, 2006) para realizar los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI), el COS es de alrededor del 50% del valor estimado para el primer metro de profundidad (Batjes, 1996; Hiederer, 2009; Carré *et al.*, 2010; Hiederer y Köchy, 2011). No obstante, estudios recientes muestran que para el primer metro el carbono es de 1915 Pg C y para la profundidad de 0 a 30 cm de 1199 Pg C, mayores que las estimaciones previas a esta profundidad de 30 cm (FAO e ITPS, 2015).

Con relación a las pérdidas de carbono en los suelos, las estimaciones son variadas (40 a 537 Pg C año<sup>-1</sup>), con un promedio de 223 Pg C año<sup>-1</sup> (FAO e ITPS, 2015).

### Estimaciones de Otros Almacenes de Carbono en Ecosistemas Terrestres a Escala Global

Para tener una perspectiva del carbono en los suelos en relación a otros almacenes, en la atmósfera se estiman reservorios de 720 Pg C (Falkowski *et al.*, 2000) a 820 Pg C (Mackey *et al.*, 2013) y en la biomasa viva y muerta de 456 Pg C (Carré *et al.*, 2010) a 500 Pg C (Ruesch y Gibbs, 2008). Estas estimaciones ponen en perspectiva el almacén del carbono en los suelos, siendo el más importante en los ecosistemas terrestres.

De las estimaciones recientes (FAO e ITPS, 2015) del carbono en los suelos y en la biomasa, sobresale que los suelos almacenan de la mitad a más de dos terceras partes del carbono en los ecosistemas terrestres, particularmente en la clase no bosque. Además, el carbono en la clase no bosque (p. ej.: pastizales, matorrales, agricultura y otras clases) es de alrededor del 40% de todo el carbono en los ecosistemas terrestres, enfatizando la necesidad de realizar estimaciones de los almacenes de carbono más allá de los bosques y el requerimiento de desarrollo de políticas públicas

multi-sectoriales, que consideren al paisaje rural como un todo y no fragmentado en bosque y no bosque.

### Metodologías de Estimación del Carbono en los Suelos

Para poder mejorar las estimaciones del carbono en los suelos, al agruparlos por propiedades/funciones similares (Kern, 1994), se ha utilizado la taxonomía de suelos (Kern, 1994; Amundson, 2001; Tomlinson y Milne, 2006; Yu *et al.*, 2007) y la clasificación por ecosistemas/ usos del suelo (Kern, 1994; Amundson, 2001; Tomlinson y Milne, 2006). Los resultados obtenidos con los dos enfoques de agrupación, arrojan resultados similares, donde los autores argumentan diferentes ventajas asociadas a interpretación y manejo de los resultados (Kern, 1994; Amundson, 2001).

Con relación a la distribución espacial del COS, las estimaciones se han realizado por diferentes técnicas, que van desde el uso del análisis multivariado (Meersmans *et al.*, 2008; Hiederer, 2009), hasta técnicas más complejas que combinan análisis de regresión con modelación de la variabilidad espacial del carbono en los suelos (Martin *et al.*, 2015). El COS muestra una alta variabilidad espacial (Post *et al.*, 2001) que puede caracterizarse mediante técnicas geoestadísticas (Goovaerts, 1999, 2001) o técnicas multifractales (Paz *et al.*, 2008, 2009 y 2010a), de las que estas últimas tienen la ventaja de modelar la variabilidad espacial y el efecto de escala en forma unificada. El uso de técnicas multivariadas y geoestadísticas se ha extendido para caracterizar la distribución tri-dimensional del carbono en los suelos (Mishra *et al.*, 2009; Meersman *et al.*, 2009; Kempen *et al.*, 2011).

Las estimaciones espaciales del COS requieren de mayor capacidad de análisis y proceso, con relación al uso de las técnicas simplificadas propuestas por el IPCC (2006) en su nivel 1 (*tier*, en inglés) que usa valores por defecto y datos estadísticos agregados. No obstante, Carré *et al.* (2010) mostraron que las estimaciones con nivel 1, profundidad de 0 a 30 cm, generaron estimaciones de únicamente 7.3% más COS en relación a las estimaciones espaciales, lo que concuerda con ejercicios en México de estimaciones mediante el uso de modelos y el nivel 1 del IPCC (González *et al.*, 2010).

Dado que el COS proviene, fundamentalmente, de la descomposición del material vegetal, la relación entre el carbono en el almacén del suelo y

el de la biomasa no muestra patrones de correlación significativos (Amundson, 2001). Esto puede deberse a la comparación de los almacenes en estados transitorios, particularmente en la dinámica del COS (Sanderman y Baldock, 2010). Cuando se usan condiciones de equilibrio o estado estacionario, Covaléda *et al.* (2013) muestran relaciones lineales, estadísticamente significativas, entre el almacén de carbono en el suelo y el de la biomasa. Aun con estos hallazgos, la información disponible del COS en México (Etchevers, 2013) y otras partes del mundo, no permite determinar su condición dinámica (estacionaria o no), además de la situación que es más la excepción que la regla, de contar con datos co-localizados de ambos almacenes.

Para poder documentar las diferentes estimaciones y sus hipótesis, en este trabajo se revisan los diferentes ejercicios realizados en México para la estimación del carbono orgánico en los suelos de los ecosistemas terrestres; además, se generan nuevas estimaciones para actualizar los patrones temporales del COS, mediante hipótesis similares a las que se usaron para los inventarios del COS para la Evaluación de Recursos Forestales Mundiales de la FAO en el 2010. En una perspectiva de relacionar las estimaciones de la textura del suelo con el COS para reducir las incertidumbres, se discute esta relación, para definir límites en las estimaciones.

### INVENTARIOS DE CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS DE MÉXICO

El carbono orgánico de los suelos (COS) en términos de densidades se estima de la siguiente Ecuación 1:

$$COS = (DA)(P) \left( 1 - \frac{FG}{100} \right) (COSp)(100) \quad (1)$$

donde COS está en Mg C ha<sup>-1</sup>, DA es la densidad aparente en Mg m<sup>-3</sup>, P es la profundidad en metros, FG es el porcentaje de fragmentos gruesos (>2 mm), COSp está en porcentaje y 100 es un factor de conversión de unidades.

Las tendencias de cambios del COS requieren de mediciones en un mismo punto geográfico en diferentes tiempos, aunque es difícil detectar cambios en tiempos cortos (Post *et al.*, 2001; Schrumpf *et al.*, 2011). En los inventarios realizados en México, los cambios del COS se asocian a cambios en los usos del suelo y vegetación (USyV) definidos en los mapas generados

por el INEGI, con la clasificación taxonómica del INEGI (1997). Esto es, se parte de la hipótesis de que los factores de emisión (densidades del COS) son los mismos para todas las clases de uso del suelo y vegetación y, que las variaciones se deben solamente a cambios en las clases de USyV (datos de actividad).

En lo general, a menos que se defina lo contrario, el método analítico de estimación de la materia orgánica de los suelos en México es el de Walkley-Black (Walkley y Black, 1934; Walkley, 1947). Para obtener el COS a partir de la MOS se asume una recuperación del 76%, por lo que el 58% de la MOS es COS. Las recuperaciones son función del uso del suelo, textura y profundidad de la muestra (Lettens *et al.*, 2007), por lo que los valores del COS de muestreos en diferentes tiempos pueden generar estimaciones diferentes. En ejercicios realizados en México (Padilla *et al.*, 2012), la recuperación promedio obtenida es del 76%, por lo que la estimación del COS por el método de Walkley-Black se considera consistente; con excepción de suelos con carbonatos libres.

#### **Inventario de Segura *et al.* (2004)**

Uno de los primeros inventarios del COS en México fue el realizado por Segura *et al.* (2004) a partir de los datos generados por SEMARNAT-CP (2002). En este trabajo se utilizaron 4583 muestras a una profundidad de 0 a 20 cm, distribuidas en el territorio nacional (Figura 1). La densidad aparente se estimó con el método de la parafina y solo en 1843 muestras del total. El resto de las DA se estimaron a partir de estos valores. No se consideraron los fragmentos gruesos,

por lo que se supuso  $FG = 0$  en la Ecuación (1).

Con los datos de las muestras de carbono orgánico se interpolaron los valores a una malla de  $5 \times 5$  km usando el método del inverso de la distancia. Este método es de tipo global, por lo que las estimaciones son dependientes de la configuración geométrica de las muestras, lo que produce mapas con efectos de anomalías en valores altos del COS (“*bull eyes*”, en inglés) (Goovaerts, 1997).

Para realizar los inventarios del COS, las superficies de las clases de USyV, con los valores promedio de COS asociados, se agruparon por estado, región ecológica, uso del suelo y, grado de influencia del hombre, lo que generó estimaciones del COS ( $FG = 0$  en la ecuación 1) a la profundidad de 0 a 20 cm de 10.5 a 10.7 Pg C. En este trabajo se presentan algunos valores de las densidades de carbono ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) para algunos tipos de uso del suelo y vegetación.

#### **Inventario de Etchevers *et al.* (2006)**

Usando la misma base de datos que Segura *et al.* (2004), Etchevers *et al.* (2006) generaron un mapa nacional de distribución del COS ( $FG = 0$  en la ecuación 1) mediante el método del kriging de geostatística (Goovaerts, 1997). Este método de interpolación global genera anomalías similares al del inverso de la distancia, aunque su error de estimación es menor.

En este trabajo se muestran densidades de carbono por unidad/subunidad de suelo y no se presentan estimaciones globales del COS de México.



**Figura 1. Distribución de las muestras del COS del estudio de SEMARNAT-CP (2002).**



## INEGI de la Tercera Comunicación de México ante la CMNUCC

Como país No Anexo I, México reporta inventarios nacionales de emisiones de gases efecto invernadero (INEGI) en forma voluntaria ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Los primeros dos INEGI de México se realizaron con valores de densidades de carbono por defecto (nivel 1 del IPCC) y estadísticas de uso del suelo nacionales (de Jong, 2012). El tercer INEGI se desarrolló, por primera vez, con información de datos de COS (FG = 0 en la ecuación 1) nacionales (de Jong *et al.*, 2006 y 2010a).

Para el COS, el INEGI se abordó con diferentes aproximaciones en función de la información disponible. Por un lado, los datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la CONAFOR estaban en proceso y no disponibles, por lo que las estimaciones de la biomasa se realizaron con el inventario de la SARH (1994), para el año base 1993. Para el caso del suelo, los datos del estudio SEMARNAT-CP (2002) estaban disponibles, así como datos de perfiles de suelo con mediciones de materia orgánica (INEGI, 2004), con diferentes fechas de muestreo.

En una primera aproximación al INEGI se analizaron 9549 perfiles de suelo con fechas de muestreo alrededor del año 1993 (Balbontín *et al.*, 2004<sup>1</sup>) y se revisaron sus patrones en relación a los tipos de suelo (FAO 68), climas y USyV, generándose

estadísticas del COS (en porciento) por tipo de vegetación y ecorregiones de Norteamérica.

Si se considera que el IPCC (2006) recomienda estimaciones del COS a la profundidad de 0 a 30 cm y que los datos de SEMARNAT-CP (2002) tienen una profundidad de muestreo de 0 a 20 cm, en la segunda aproximación (Balbontín *et al.*, 2005<sup>2</sup>) se expandieron estas estimaciones a la profundidad de 0 a 30 cm usando el modelo lineal:

$$MO_{0-30} = a + bMO_{0-20} \quad (2)$$

Para realizar las estimaciones, se utilizó la base de perfiles de suelo del INEGI (2004) y se seleccionaron 4248 perfiles para estimar las constantes *a* y *b*. Los análisis se realizaron por tipo/subtipo de suelo mediante el uso de la clasificación de FAO 68 (INEGI, 2002), Figura 2.

Otro punto que se consideró en la segunda aproximación, fue el hecho de que los datos de SEMARNAT-CP (2002) solo contenían la densidad aparente en 1820 muestras. Para solucionar este problema, los datos existentes de DA se agruparon por tipos/subtipos de suelo de acuerdo a FAO 68 y se estimaron las DA para los casos con tres o más datos. En los casos de datos insuficientes, se utilizaron las estimaciones de DA de Batjes (1997).

Los resultados de las estimaciones de densidad aparente de los tipos/subtipos de suelos en México se muestran en la Figura 3.

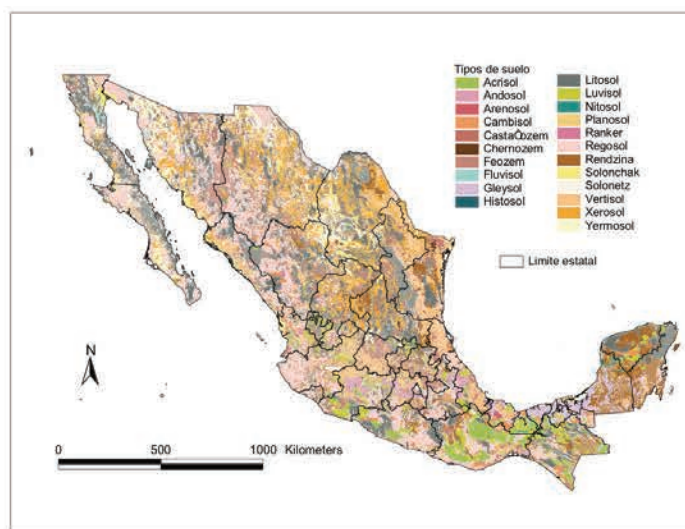


Figura 2. Tipos de suelo en México de acuerdo a la clasificación FAO 68.

<sup>1</sup> Balbontín, C., J. Etchevers y F. Paz. 2004. Inventario de carbono orgánico en los suelos de México. Informe preparado para el Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. D.F., México. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

<sup>2</sup> Balbontín, C., F. Paz y J. Etchevers. 2005. Inventario carbono orgánico en los suelos de México: segunda aproximación. Informe preparado para el Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. D.F., México. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

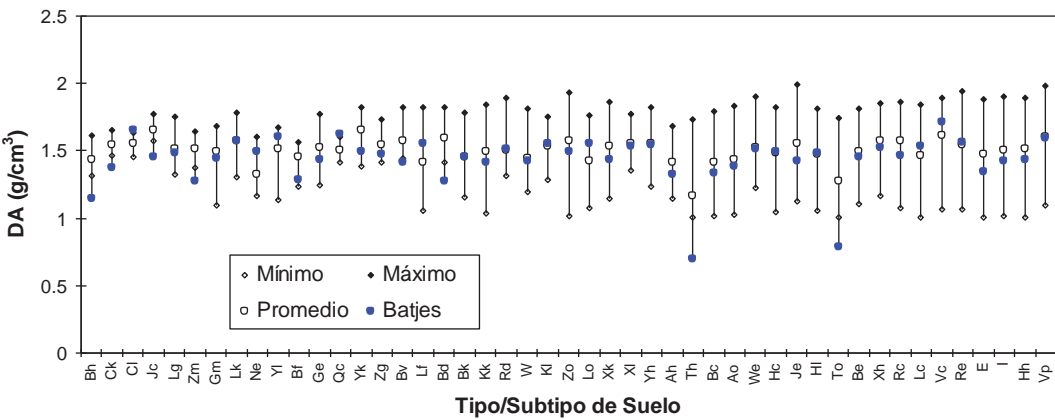


Figura 3. Estimaciones de la densidad aparente (DA) por tipo/subtipo de suelo (FAO 68) de México.

Para generar estimaciones de las densidades de carbono por tipo de suelo, se homologaron las clasificaciones de WRB (World Resources Base), USDA (U.S. Department of Agriculture) e IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change), Cuadro 1.

Para realizar estimaciones de las densidades de carbono se usaron los datos de SEMARNAT-CP (2002) para la Serie III (año base 2002) de USyV del INEGI, extrapolados a la profundidad de 0 a 30 cm. Para el caso de la Serie II (año base 1993) se utilizaron

8664 perfiles de suelo (INEGI, 2004), para realizar estimaciones del COS a la profundidad de 0 a 30 cm, Figura 4.

Los datos de carbono, para 1993 y 2002 se utilizaron para estimar densidades de carbono por tipo de suelo y USyV. La Figura 5 muestra los resultados para las clases de USyV.

Del análisis de la Figura 5 sobresale la alta incertidumbre asociada a las estimaciones del COS por clase de USyV y las diferencias al usar bases de datos independientes del COS. La gran variabilidad asociada

Cuadro 1. Clasificación de los tipos de suelos según WRB, USDA y su equivalente para IPCC (Adaptado de las directrices del IPCC del 2003).

WRB		Clasificación	
		USDA	IPCC
Albeluvisoles	Leptosoles	Alfisoles básicos	Suelos con arcillas de alta actividad (HAC)
Alisoles	Luvisoles	Aridisoles	
Calcisoles	Phaeozemes	Inceptisoles	
Cambisoles	Regosoles	Mollisoles	
Chernozem	Solonetz	Vertisoles	
Gypsisoles	Umbrisoles		
Kastanozem	Vertisoles		
Acrisoles		Alfisoles ácidos	Suelos con arcillas de baja actividad (LAC)
Durisoles		Oxisoles	
Ferralsoles		Ultisoles	
Lixisoles			
Nitisoles			
Arenosoles		Psammentes	Arenosos
Podzoles		Spodosoles	Espódicos
Andosoles		Andisoles	Volcánicos
Gleysoles		Aquic	Tierras húmedas (no-Histosoles)



Figura 4. Distribución de los perfiles de suelo para el año base 1993.

a las estimaciones de COS a escala global y local, se deben al uso de datos de diferentes fechas, integrados en una base de datos común, reflejando diferentes usos del suelo y manejo, climas, técnicas analíticas, etc. (Lettens *et al.*, 2007; FAO e ITPS, 2015).

Para el INEGI de la Tercera Comunicación (de Jong *et al.*, 2006 y 2010a), dada la información disponible, se decidió utilizar las estimaciones de biomasa con la base de datos de SARH (1994) para el año base 1993 y la base de datos del COS de SEMARNAT-CP (2002) para el año base 2002. Las estimaciones de biomasa y COS por clases de USyV se usaron para estimar el carbono a partir de los mapas de USyV del INEGI. Así, la dinámica de cambio se asoció a los cambios en

los mapas de USyV (solo se consideraron cambios en los datos de actividad, dejando los factores de emisión como fijos).

El inventario de COS nacional, a la profundidad 0 a 30 cm, fue de 15.381 Pg C usando el mapa de USyV del INEGI Serie II (año base 1993) y para la Serie III (año base 2002) de 15.307 Pg C.

#### Inventario de Balbontín *et al.* (2009)

El INEGI y el Colegio de Postgraduados iniciaron en el 2007 una colaboración para expandir la base de perfiles de suelo en México, al digitalizar la información archivada en papel del INEGI de perfiles de suelo y

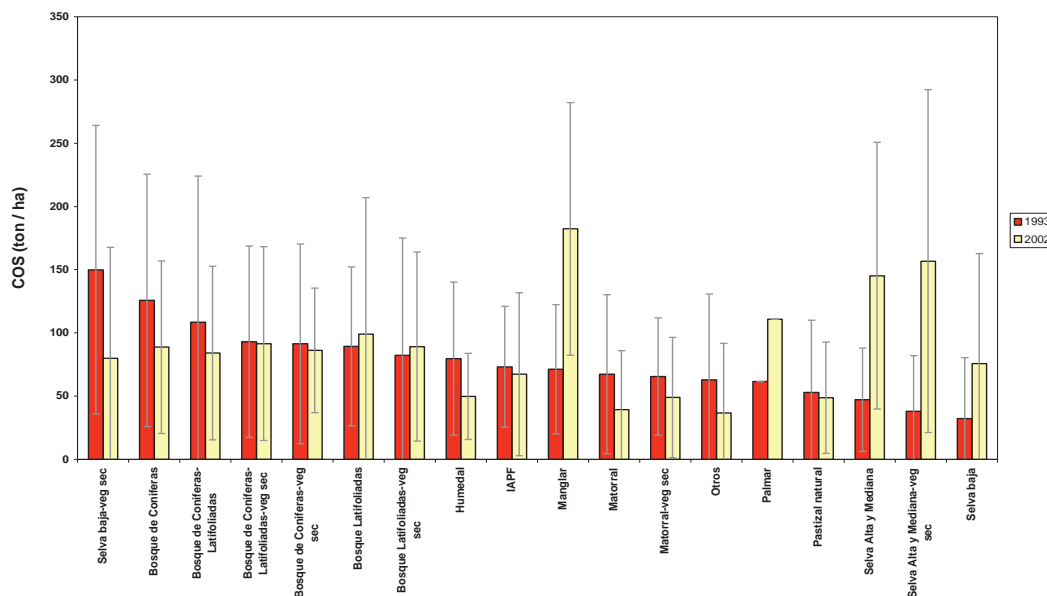


Figura 5. Estimaciones de COS por clases de USyV en los ecosistemas terrestres de México.

realizar un proceso detallado de digitalización para asignar coordenadas geográficas a los puntos de muestreo de los perfiles. Las bases de datos que se generaron consistieron de datos de laboratorio (textura, materia orgánica y otras mediciones analíticas de variables químicas) y de campo (compactación, estructura, génesis, etc.). Como resultado preliminar de esta colaboración fue posible contar con 12 224 perfiles para realizar una estimación del inventario del COS en México. Todos los perfiles se asociaron a tipos de suelo de FAO 68, de acuerdo con el mapa de la Figura 2.

Como la mayoría de los perfiles de suelo no contienen datos de densidad aparente, ésta se estimó a partir de los datos de campo y laboratorio. La profundidad del suelo se asignó en función del esqueleto del suelo, la cementación y limitación física, con una profundidad promedio nacional de 48.5 cm. Un 22.7% de los perfiles tuvieron una profundidad menor a 10 cm.

Las estimaciones del COS se realizaron a la profundidad de 0 a 100 cm (o hasta la profundidad efectiva) por unidad de suelo, ecorregiones y condiciones de aridez. El inventario de COS por grupo climático fue de 15.057 Pg C (desviación estándar de 14.971 Pg C) y por ecorregiones de 15.180 Pg C (desviación estándar de 15.381 Pg C), sobresaliendo la alta incertidumbre asociada a las estimaciones.

### INEGEI de la Cuarta Comunicación de México ante la CMNUCC

Para realizar el INEGEI de la Cuarta Comunicación de México ante la CMNUCC (de Jong *et al.*, 2009a) se utilizó una actualización de la base de perfiles de suelos del INEGI-COLPOS, que consistió en 21 806 perfiles.

Los valores de COS de los perfiles para la profundidad de 0 a 30 cm se estimaron con un promedio ponderado por el espesor ( $E_i$ ) de cada horizonte  $i$  (hasta 30 cm o la profundidad efectiva):

$$COS_{0-30} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i COS_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (3)$$

En el caso de la densidad aparente, el 98% de los perfiles de suelo no contaron con ese dato, por lo que

fue necesario estimarlas indirectamente. Para estimar la DA se utilizó el procedimiento de FAO (2006), que consistió en asignar la DA en función de la clase textural (0 a 30 cm, estimada de un promedio ponderado por horizonte del suelo, similar a la ecuación 3), estructura y consistencia y, el contenido de COS. Para los casos con  $COS > 1.2\%$ , se realizó una disminución de la DA de  $0.03 \text{ Mg m}^{-3}$  por cada 0.6% de incremento en el valor del COS.

La fracción gruesa, ecuación (1), se estimó de los datos de campo de los perfiles de suelo para dos casos: (a) solo existían estimaciones del contenido de gravas (2.5 a 7.5 cm), guijarros (7.5 a 25 cm) y piedras ( $> 25$  cm) de acuerdo con la escala de valores definida en los formatos de campo del INEGI (0 = sin fragmentos, 1 = menor del 5%, 2 = 5-10%, 3 = 10-20%, 4 = 20-40%, 5 = 40-80%, 6 =  $> 80\%$ ); y (b) existía información del esqueleto del suelo ( $sk = 40\%$ ,  $skp = 40\%$  y  $hk = 80\%$ ). En el 31% de los casos solo había información del contenido de gravas, guijarros y piedras, donde se estimó FG de la suma de los porcentajes y, el resto contenía información del esqueleto del suelo, estimándose directamente FG.

De lo anterior, por primera vez se estimó el COS de acuerdo a la ecuación (1) considerando todos sus factores.

Para los mapas de USyV, estos fueron revisados a detalle, homologando las clases de vegetación de las Serie II (año base 1993), Serie III (año base 2002) y Serie IV (año base 2007), para realizar el INEGEI para el periodo 1990 al 2006.

Las estimaciones de COS se realizaron para las clases de USyV, así como para las clases de suelos de acuerdo al WRB, FAO, USDA e IPCC. No se mostraron estimaciones de COS a escala nacional.

### Informe México para FAO FRA 2010

Con el objetivo de contar con inventarios consistentes del carbono en los ecosistemas terrestres de México para diferentes organismos internacionales, para el Informe de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010 (FAO FRA 2010) (CONAFOR, 2010), se homologaron las clases de FAO con las de los INEGEI. Para el caso del COS, se utilizó la misma base de perfiles de suelo y las estimaciones de carbono que el INEGEI de la Cuarta Comunicación (Paz *et al.*, 2010<sup>3</sup>).

<sup>3</sup> Paz, F., C. O. Cruz, J. A. Argumedo y J. D. Etchevers. 2010. Cálculo de COS para las diferentes clases de vegetación consideradas en el informe nacional sobre evaluación de recursos forestales mundiales, México 2010. Informe preparado para CONAFOR. Texcoco, Estado de México. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)



Las estimaciones de COS se realizaron en forma espacialmente explícita, mediante el siguiente procedimiento:

- Se utilizaron los mapas de USyV de las Series II, III y IV del INEGI y cada polígono se etiquetó de acuerdo con el tipo de ecosistema y clase de USyV, considerando vegetación primaria y secundaria (sucesión herbácea, arbustiva o arbórea, *sensu* INEGI).
- Para cada polígono de las series del INEGI se estimó el COS promedio (y desviación estándar) y se le asignó a éste. En casos con datos menores a tres, no se estimó la desviación estándar.
- En caso de no contar con datos un polígono dado de USyV, el valor del COS promedio se asignó mediante el polígono más cercano con la misma clase

de USyV. En caso de no existir esta información, se usó el valor promedio del COS del tipo de ecosistema.

El procedimiento anterior permitió obtener un mapa de la distribución espacial del COS que refleja los USyV de los mapas del INEGI, armonizando ambos mapas a una misma distribución espacial de polígonos del carbono de la biomasa y del suelo.

La Figura 6 muestra el mapa de la distribución del carbono orgánico de los suelos a una profundidad de 0 a 30 cm y la Figura 7 el mapa a la profundidad de 0 a 100 cm, ambos para la Serie IV de USyV del INEGI (año base 2007).

Para el año base del 2007, el inventario nacional del COS a la profundidad de 0 a 30 cm fue de 9.160 Pg C y para la profundidad de 0 a 100 cm fue de 14.059 Pg C.

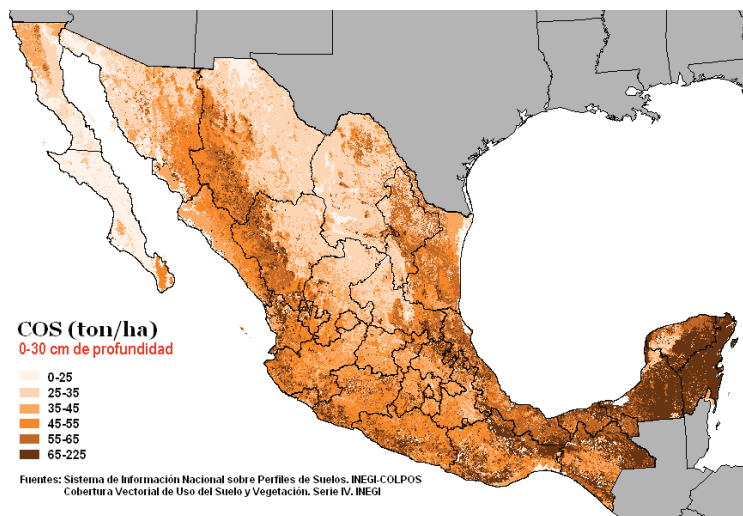


Figura 6. Distribución espacial del COS a la profundidad de 0 a 30 cm para el año base 2007.

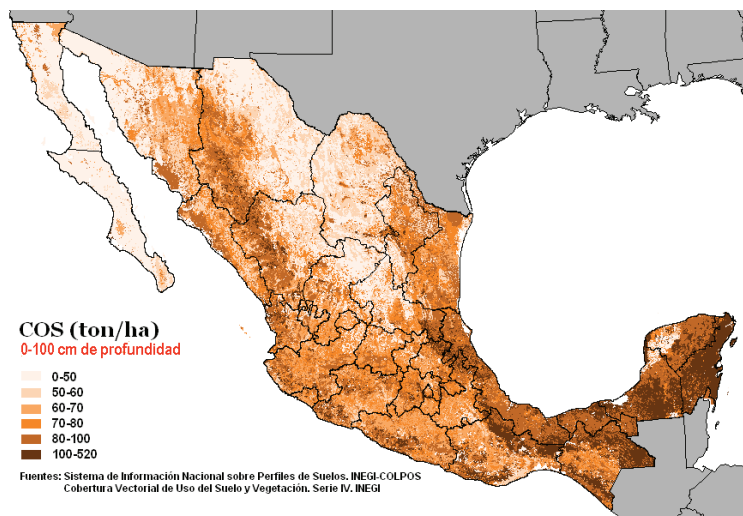


Figura 7. Distribución espacial del COS a la profundidad de 0 a 100 cm para el año base 2007.

En el caso del carbono en la biomasa viva, aérea y subterránea, se estimó de acuerdo con el procedimiento definido por de Jong *et al.* (2009<sup>4</sup>), extendido a todas las series de USyV del INEGI.

En el informe de México para FAO FRA 2010 (CONAFOR, 2010), por primera vez, el país reportó inventarios de carbono en la biomasa y el suelo, para el periodo 1990 a 2010; aunque no se reportaron las incertidumbres asociadas a las estimaciones.

### **INEGEI de la Quinta Comunicación de México ante la CMNUCC**

El INEGEI de la Quinta Comunicación de México ante la CMNUCC (Ordoñez *et al.*, 2012) no incluyó el carbono orgánico de los suelos.

### **Informe México para FAO FRA 2015**

El Informe México para FAO FRA 2015 (CONAFOR, 2014) no incluyó el carbono orgánico de los suelos.

### **Primer Informe Bienal de México ante la CMNUCC**

En el Primer Informe Bienal de México ante la CMNUCC, los datos reportados (INECC y SEMARNAT, 2015) están agregados y no es posible estimar la información asociada al COS. En el informe se menciona solamente que se usaron 1433 muestras del INFyS y 4657 muestras de la base de perfiles INEGI-COLPOS.

### **Nivel de Referencia de Emisiones Forestales de México**

En el informe de propuesta de nivel de referencia de emisiones forestales de México (CONAFOR-SEMARNAT, 2014) se presentaron las emisiones GEI para la deforestación y los incendios forestales, con la degradación forestal como anexo. En este informe se menciona que las emisiones asociadas a los suelos minerales no son significativas, por lo que no fueron consideradas.

El primer informe de México fue revisado por la CMNUCC (UNFCCC, 2015), proponiendo solo considerar la deforestación bruta y revisar las hipótesis

en las estimaciones de las emisiones GEI del suelo. En la revisión se estableció que México justificó que el carbono en los suelos minerales no es significativo, con un promedio anual de emisiones de 1118.6 Gg CO<sub>2eq</sub>, que representan alrededor del 2.5% de las emisiones de la biomasa viva. Las recomendaciones de la CMNUCC fueron consideradas por México en el envío de la versión modificada de las emisiones (CONAFOR-SEMARNAT, 2015), usando el mismo tratamiento previo para las emisiones de los suelos minerales y con el análisis de 29 611 muestras de COS.

### **Otros inventarios más recientes del carbono orgánico en los suelos de México**

Con base en un total de 21 196 perfiles del suelo de México, Paz *et al.* (2012) usaron un procedimiento de asignación del COS a los polígonos de USyV por adyacencia y estimaron inventarios del COS para las series de USyV del INEGI: Serie II: 8.466 Pg C, Serie III: 8.540 Pg C y Serie IV: 8.578 Pg C.

En otro ejercicio de asignación del COS de los perfiles de suelos a los polígonos de USyV del INEGI para la Serie IV (Cruz y Paz, 2013) la estimación del COS nacional fue de 9.146 Pg C.

A partir de la base de datos de SEMARNAT-CP (2002), Cruz *et al.* (2014) generaron estimaciones de la distribución espacial del COS (FG = 0 en la ecuación 1) en México usando el método del kriging de geoestadística (Goovaerts, 1997), sin reportar resultados a escala nacional.

### **Emisiones GEI de los suelos minerales de México**

En los INEGEI de la tercera y cuarta comunicación de México ante la CMNUCC (de Jong *et al.*, 2006 y 2009a), las emisiones GEI de los suelos minerales representaron entre el 25 al 35% de las emisiones totales. En inventarios estatales como el de Chiapas (de Jong *et al.*, 2010<sup>5</sup>), las emisiones GEI de los suelos minerales fueron alrededor del 50% de las totales. En el caso de Chiapas, las densidades de COS de los USyV se revisaron y homologaron a los criterios usados en el INEGEI de la Cuarta Comunicación (Paz *et al.*, 2010<sup>6</sup>).

En el informe de CONAFOR-SEMARNAT (2015) se definen emisiones GEI de los suelos minerales, por periodos, de: 1993-2002: 1298 Gg CO<sub>2eq</sub> año<sup>-1</sup>,

<sup>4</sup> de Jong, B. H. J., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, V. de la Cruz y F. Leyva. 2009. Informe del mapa de contenido de biomasa leñosa por hectárea año 2007. Informe preparado para CONAFOR. Texcoco, Edo. de México. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

<sup>5</sup> de Jong, B.H.J., F. Rojas, M. Olguin, V. de la Cruz, F. Paz, G. Jiménez y M.A. Castillo. 2010. Establecimiento de una línea base de las emisiones actuales y futuras de Gases de Efecto Invernadero provenientes de Agricultura, Silvicultura y otros usos del suelo. Informe final de consultoría para Conservación Internacional México A.C. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

<sup>6</sup> Paz, F., C.O. Cruz, J. A. Argumedo, M. I. Marín y J. Etchevers. 2010. Documento de referencia del carbono orgánico en el suelo (COS), en el Estado de Chiapas. Anexo 2 del Informe final consultoría para Conservación Internacional México A.C. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

2002-2006: 1465 Gg CO<sub>2eq</sub> año<sup>-1</sup> y 2007-2013: 596 Gg CO<sub>2eq</sub> año<sup>-1</sup>. Estas estimaciones son altamente contrastantes con las realizadas en el INEGI de la Tercera Comunicación (de Jong *et al.*, 2006) para el periodo 1993-2002 de 30.2 Tg CO<sub>2eq</sub> año<sup>-1</sup> y del INEGI de la Cuarta Comunicación (de Jong *et al.*, 2009a) de 17 598 Gg CO<sub>2eq</sub> para el año 1993 y 23 868 Gg CO<sub>2eq</sub> para el año 2007.

### ESTIMACIONES ESPACIALES Y MULTI-TEMPORALES DEL COS EN MÉXICO

Con el objetivo de realizar estimaciones multi-temporales del COS en los ecosistemas terrestres de México, se realizó un ejercicio de ampliación de las estimaciones usadas en el Informe México de FAO FRA (CONAFOR, 2010) para la Serie V del INEGI (año base 2011) y Serie VI (año base 2014) del PMC (2015), con hipótesis similares. Esta última serie se generó con procedimientos y metodologías similares a las usadas por el INEGI para el desarrollo de las Series II, III, IV y V, para tener un producto interoperable.

La base de datos del COS se obtuvo del análisis de 21 806 perfiles de suelo (Figura 8), procesados para estimar COS a la profundidad de 0 a 30 cm de acuerdo con las metodologías que se utilizaron para el Informe México de FAO FRA 2010 descritas anteriormente.

Para las clases de USyV y los tipos de ecosistemas, el Cuadro 2 muestra las estimaciones de las densidades de COS de la Serie IV del INEGI (año base 2007). Para el caso de no contar con datos para una determinada clase se utilizó el valor del ecosistema. Para la clase de USyV secundaria (fase sucesional herbácea, arbustiva o arbórea, cuando es aplicable), cuando no se contó con

datos, se utilizó el COS de la clase de USyV primaria, como criterio conservador.

En relación al uso de los diferentes mapas de USyV (series), las densidades de carbono por clase fueron estimadas de la intersección espacial de la localización de los perfiles de suelo con los polígonos de las clases de USyV de las series, generando situaciones donde el número de perfiles que se usó fue menor al disponible, al presentarse casos de clases de USyV de los perfiles sin contraparte de polígonos de USyV de las series que se analizaron.

Los valores de los promedios y desviaciones estándar del COS asociado a las clases de USyV del Cuadro 2 muestran valores altos de incertidumbre, que se asocian a la variabilidad espacial del COS y, posiblemente, a errores en las etiquetas de las clases de USyV, las cuales tienen un factor subjetivo importante de interpretación y asignación.

En el Cuadro 3 se muestran las superficies e inventarios del COS por tipo de vegetación y clase de FAO. Los inventarios del almacén COS corresponden a los años 1993, 2002, 2007, 2011 y 2014, generando una serie temporal suficiente para analizar los patrones de ganancias y pérdidas del COS en los ecosistemas terrestres de México. Las estimaciones del COS utilizan promedios del carbono orgánico de los suelos por tipo de vegetación o ecosistema que varía en función del número de datos utilizados (que intersectan los polígonos de USyV).

En relación a las incertidumbres de las estimaciones del Cuadro 2, la Figura 9 muestra la relación entre el promedio y la desviación estándar, usando una regresión lineal forzada a pasar por el origen. De esta figura, la desviación estándar de las estimaciones

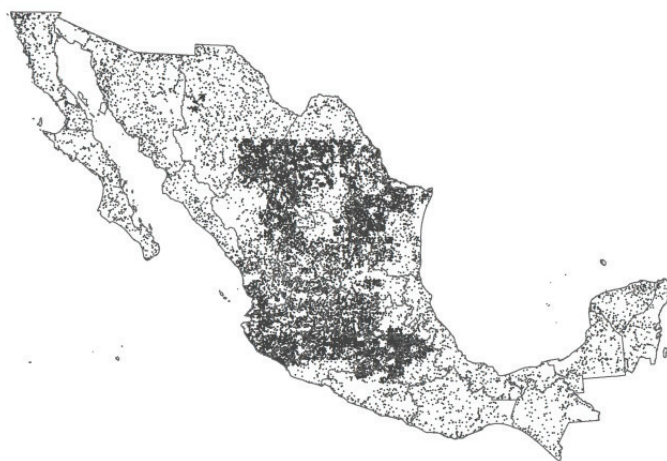


Figura 8. Distribución espacial de los perfiles de suelos usados en las estimaciones multi-temporales.

**Cuadro 2. Estimaciones del carbono orgánico de los suelos (COS) por tipos de vegetación y ecosistema.**

Ecosistema	Tipo de vegetación	Primaria			Secundaria		
		No. datos	Promedio COS	Desv. Est. COS	No. datos	Promedio COS	Desv. Est. COS
		- - - - mg C ha <sup>-1</sup> - - - -			- - - - mg C ha <sup>-1</sup> - - - -		
Bosque de coníferas	Bosque de ayarín	1	175.58		1	61.61	
	Bosque de cedro	0	69.66	66.81	0	69.66	66.81
	Bosque de oyamel	34	167.47	103.86	2	62.05	
	Bosque de pino	334	68.03	66.40	59	84.76	74.87
	Bosque de pino-encino	617	65.83	62.35	117	60.16	51.46
	Bosque de táscate	25	52.80	43.47	9	84.96	93.91
	Matorral de coníferas	0	69.66	66.81	0	69.66	66.81
Bosque de encino	Bosque de encino	456	51.05	48.77	265	50.40	44.2
	Bosque de encino - pino	165	47.28	37.82	61	54.01	45.79
Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña	44	99.61	80.84	13	147.26	121.14
Selva perennifolia	Selva alta perennifolia	30	110.53	70.28	44	90.25	48.94
	Selva alta subperennifolia	1	29.40		2	68.07	
	Selva mediana perennifolia	1	67.28		0	67.28	
	Selva mediana subperennifolia	71	131.64	75.00	90	96.68	75.17
	Selva baja perennifolia	9	76.21	30.29	1	134.06	
Selva subcaducifolia	Selva mediana subcaducifolia	73	52.24	38.63	218	84.45	63.82
	Selva baja subcaducifolia	6	79.84	113.68	0	79.84	113.68
Selva caducifolia	Selva mediana caducifolia	12	44.76	52.06	5	37.70	26.17
	Selva baja caducifolia	359	44.31	40.61	511	52.47	46.11
	Matorral subtropical	81	43.34	40.95	115	44.04	34.12
Selva espinosa	Selva baja espinosa	26	45.21	38.83	27	29.10	19.06
	Selva baja subperennifolia	14	83.77	39.31	2	150.52	
	Mezquital (MKE)	0	31.72	22.74	0	32.11	21.68
Vegetación hidrófila	Selva de galería	0	74.03	96.44	0	74.03	96.44
	Bosque de galería	3	48.96	20.84	0	48.96	20.84
	Petén	0	74.03	96.44	0	74.03	96.44
	Manglar	44	88.58	106.98	1	99.00	
	Vegetación de galería	32	32.89	51.09			
	Vegetación halófila hidrófila (VHH)	0	74.03	96.44	0	74.03	96.44
	Popal	4	169.63	216.42			
	Tular	24	88.40	86.77			
	Mezquital (MK)	377	32.12	21.97	1	32.32	
Especial otros tipos de vegetación	Palmar natural	1	26.93		0	26.93	
	Vegetación de dunas costeras	12	12.65	10.35	0	12.65	10.35



**Cuadro 2 (continuación). Estimaciones del carbono orgánico de los suelos (COS) por tipos de vegetación y ecosistema.**

Ecosistema	Tipo de vegetación	Primaria			Secundaria		
		No. datos	Promedio COS	Desv. Est. COS	No. datos	Promedio COS	Desv. Est. COS
		- - - - mg C ha <sup>-1</sup> - - - -			- - - - mg C ha <sup>-1</sup> - - - -		
Matorral xerófilo	Matorral espinoso tamaulipeco	717	33.95	22.45	62	48.12	26.66
	Matorral sarco-crasicaule	71	9.77	10.52	0	9.77	10.52
	Matorral sarco-crasicaule de neblina	6	7.83	3.54	0	7.83	3.54
	Matorral sarcocaulle	163	11.88	17.55	4	23.01	13.12
	Matorral submontano	355	59.11	46.34	105	53.73	36.52
	Chaparral	157	37.82	38.58	11	26.84	39.15
	Mezquital (MKX)	79	29.84	26.19	6	34.19	32.11
	Matorral crasicaule	220	32.11	27.92	69	38.76	26.92
	Matorral desértico micrófilo	3 160	28.03	23.49	581	26.41	17.53
	Matorral desértico rosetófilo	831	34.28	32.41	45	32.41	25.81
	Matorral rosetófilo costero	15	17.29	12.76	1	22.68	
	Vegetación de desiertos arenosos	85	9.67	8.88	0	9.67	8.88
	Vegetación gipsófila	15	17.58	14.17	0		
	Vegetación halófila (VH)	485	24.79	24.38	60	22.88	25.13
Pastizal	Pastizal natural	787	33.9	27.00	474	30.64	20.23
	Pastizal halófilo	351	24.24	20.14	64	25.86	18.95
	Pastizal gipsófilo	40	54.71	36.31	0	54.71	36.31
	Pradera de alta montaña	2	49.22		0		
	Sabana	36	52.13	52.40	0		
Vegetación inducida	Bosque inducido	0	47.67	43.53			
	Sabanoide	1	10.35				
	Pastizal inducido	1 236	47.6	43.43			
	Palmar inducido	6	68.84	62.91			
Información agrícola - pecuaria - forestal	Información agrícola - pecuaria - forestal	6 878	46.03	43.43			
Información complementaria	Zona Urbana	9	39.66	29.65			
	Cuerpos de agua	14	37.27	32.99			
	Área desprovista de vegetación	0					
	Asentamiento humano	0					
Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente	104	19.03	24.32			
Vegetación secundaria herbácea	Vegetación secundaria herbácea	51	51.85	57.89			
Bosque cultivado	Bosque cultivado	8	26.72	17.34			

**Cuadro 3. Estimaciones multi-temporales del COS por tipo de vegetación y clases de FAO.**

Clase FAO	Tipo de vegetación	1993		2002		2007		2011		2014	
		Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C
Bosques	Bosque de ayarín	40 045	5 479	40 007	5 472	39 850	5 444	39 850	5 223	39 850	5 584
	Bosque de cedro	2 521	176	2 246	156	1 979	138	1 979	144	1 979	144
	Bosque de oyamel	147 520	23 680	143 579	22 399	144 144	22 486	144 144	22 381	144 144	22 404
	Bosque de pino	7 527 230	541 631	7 277 254	529 800	7 279 002	530 094	7 279 002	557 991	7 279 002	542 943
	Bosque de pino-encino	8 915 737	574 168	8 689 256	555 971	8 658 794	553 845	8 658 794	548 950	8 658 794	550 255
	Bosque de táscate	324 763	22 381	315 454	22 028	317 598	22 265	317 598	20 349	317 598	24 010
	Bosque de encino	11 382 925	578 677	11 096 796	563 804	11 099 329	563 907	11 099 329	567 056	11 099 329	555 275
	Bosque de encino - pino	4 318 649	211 216	4 230 735	207 901	4 216 131	207 311	4 216 131	212 151	4 216 131	210 104
	Bosque mesófilo de montaña	1 803 680	217 869	1 711 615	211 780	1 702 639	210 498	1 702 639	230 837	1 702 639	230 807
	Selva alta perennifolia	3 772 081	375 501	3 574 239	350 634	3 448 868	338 920	3 448 868	316 244	3 448 868	306 812
	Selva alta subperennifolia	174 371	9 466	158 518	8 429	153 767	8 111	153 767	9 065	153 767	8 229
	Selva mediana perennifolia	1 099	74	550	37	550	37	550	43	550	41
	Selva mediana subperennifolia	5 815 131	622 255	5 428 486	579 686	5 325 448	570 131	5 325 448	589 158	5 325 448	574 565
	Selva baja perennifolia	56 002	4 299	44 164	3 559	39 794	3 247	39 794	3 472	39 794	4 429
	Selva mediana subcaducifolia	4 606 628	371 493	4 323 880	351 732	4 162 058	338 061	4 162 058	340 542	4 162 058	337 513
	Selva baja subcaducifolia	71 553	5 713	68 634	5 480	74 263	5 929	74 263	3 992	74 263	4 008
	Selva mediana caducifolia	1 107 947	42 777	998 376	38 574	971 515	37 571	971 515	40 743	971 515	40 190
	Selva baja caducifolia	15 452 673	754 001	14 460 224	704 173	14 166 078	689 517	14 166 078	693 621	14 166 078	675 843
	Selva baja espinosa	704 443	24 057	650 484	22 014	604 982	20 583	604 982	21 962	604 982	23 050
	Selva baja subperennifolia	1 028 865	126 027	991 203	122 514	984 625	121 804	984 625	134 045	984 625	144 228
	Mezquital (MKE)	81 522	2 593	72 684	2 312	73 827	2 348	73 827	4 692	73 827	4 641
	Selva de galería	2 782	206	2 445	181	1 963	145	1 963	399	1 963	367
	Bosque de galería	24 980	1 223	19 719	965	19 428	951	19 428	1 129	19 428	1 140
	Petén	44 708	3 310	44 648	3 305	44 869	3 322	44 869	4 502	44 869	4 515
	Manglar	914 610	81 113	882 033	78 602	886 561	79 149	886 561	84 156	886 561	85 815
	Mezquital (MK)	387 324	12 451	321 285	10 329	315 714	10 151	315 714	9 252	315 714	9 178
	Palmar natural	12 741	343	11 242	303	17 817	480	17 817	517	17 817	713
	Bosque inducido	290	14	58	3	360	17	360	225	360	225
	Total	68 722 818	4 612 190	65 559 811	4 402 145	64 751 953	4 346 463	64 751 953	4 422 837	64 751 953	4 367 026

**Cuadro 3 (continuación). Estimaciones multi-temporales del COS por tipo de vegetación y clases de FAO.**

Clase FAO	Tipo de vegetación	1993		2002		2007		2011		2014	
		Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C
Otras tierras boscosas	Matorral de coníferas	911	63	975	68	911	63	911	0	911	0
	Matorral subtropical	1 355 489	58 994	1 338 762	58 266	1 337 038	58 191	1 337 038	56 471	1 337 038	55 700
	Matorral espinoso tamaulipeco	3 460 945	129 783	3 289 821	123 718	3 263 050	122 491	3 263 050	124 141	3 263 050	121 896
	Matorral sarco-crasicaule	2 371 723	23 162	2 341 521	22 867	2 333 239	22 787	2 333 239	22 472	2 333 239	20 350
	Matorral sarco-crasicaule de neblina	580 135	4 544	570 750	4 471	568 963	4 457	568 963	4 428	568 963	4 268
	Matorral sarcocaulé	5 425 573	66 031	5 393 128	65 543	5 369 021	65 200	5 369 021	63 417	5 369 021	68 122
	Matorral submontano	2 817 996	164 191	2 772 725	161 573	2 758 033	160 756	2 758 033	157 563	2 758 033	157 463
	Chaparral	2 140 711	77 975	2 120 109	77 002	2 106 201	76 544	2 106 201	78 408	2 106 201	73 223
	Mezquital (MKX)	2 618 665	79 721	2 461 031	75 078	2 391 249	72 969	2 391 249	71 043	2 391 249	71 877
	Total	20 772 148	604 465	20 288 822	588 587	20 127 706	583 458	20 127 706	577 943	20 127 706	572 898
Otras tierras	Vegetación de galería	175 521	5 772	139 102	4 574	139 974	4 603	139 974	4 929	139 974	6 099
	Vegetación halófila (VHH)	462 851	34 267	444 581	32 914	432 378	32 010	432 378	27 099	432 378	28 004
	Popal	158 062	26 813	143 807	24 394	142 147	24 113	142 147	24 071	142 147	21 441
	Tular	898 875	79 459	908 775	80 334	909 719	80 418	909 719	81 203	909 719	89 726
	Vegetación de dunas costeras	169 126	2 139	159 429	2 017	157 505	1 992	157 505	1 910	157 505	1 939
	Matorral crasicaule	1 586 132	53 606	1 534 164	51 530	1 514 861	50 860	1 514 861	51 185	1 514 861	51 715
	Matorral desértico micrófilo	22 022 673	614 094	21 728 149	605 797	21 522 612	600 015	21 522 612	591 531	21 522 612	581 539
	Matorral desértico rosetófilo	10 647 792	364 390	10 628 769	363 713	10 619 500	363 400	10 619 500	364 983	10 619 500	358 970
	Matorral rosetófilo costero	488 310	8 576	471 587	8 272	468 291	8 212	468 291	8 248	468 291	8 356
	Vegetación de desiertos arenosos	2 172 960	21 014	2 159 908	20 888	2 147 683	20 770	2 147 683	20 818	2 147 683	21 724
	Vegetación gipsófila	46 149	811	46 149	811	28 356	499	28 356	836	28 356	850
	Vegetación halófila (VH)	2 674 823	66 009	2 568 949	63 363	2 494 669	61 549	2 494 669	72 304	2 494 669	59 919
	Pastizal Natural	10 412 371	339 797	10 235 461	334 026	10 046 625	328 028	10 046 625	319 218	10 046 625	298 308
	Pastizal Halófilo	1 922 431	46 807	1 892 193	46 107	1 781 133	43 346	1 781 133	44 859	1 781 133	43 672
	Pastizal Gipsófilo	42 306	2 314	39 155	2 142	35 222	1 927	35 222	2 219	35 222	2 115
	Pradera de alta montaña	17 069	840	16 471	811	16 472	811	16 472	812	16 472	818
	Sabanoide	170 905	1 769	186 246	1 928	184 821	1 913	184 821	1 573	184 821	1 468
	Sabana	292 681	15 258	196 273	10 232	188 933	9 850	188 933	8 219	188 933	6 832
	Pastizal inducido	6 218 188	295 997	6 651 946	316 645	6 676 333	317 806	6 676 333	286 080	6 676 333	359 550

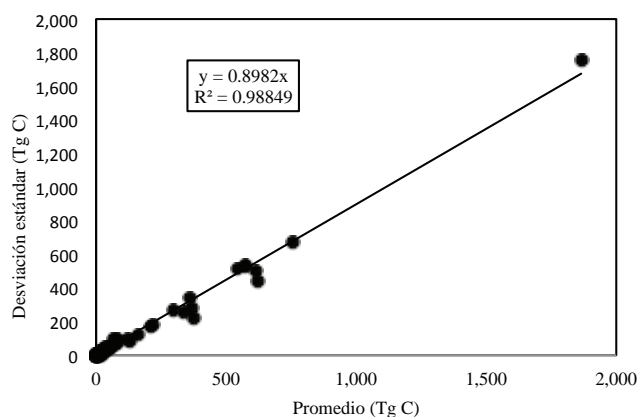
**Cuadro 3 (continuación). Estimaciones multi-temporales del COS por tipo de vegetación y clases de FAO.**

Clase FAO	Tipo de vegetación	1993		2002		2007		2011		2014	
		Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS total Gg C	Superficie ha	COS Total Gg C
	Palmar inducido	112 103	7 717	118 576	8 163	109 304	7 524	109 304	6 633	109 304	6 612
	Información agrícola - pecuaria - forestal	40 519 783	1 865 202	44 458 110	2 046 491	45 934 808	2 114 466	45 934 808	2 101 375	45 934 808	2 114 534
	Zona Urbana	1 112 466	44 115	1 112 466	44 115	1 112 466	44 115	1 112 466	46 825	1 112 466	47 881
	Área desprovista de vegetación	6 031	0	12 820	0	63 480	0	63 480	0	63 480	0
	Asentamiento humano	0	0	50 401	0	153 710	0	153 710	0	153 710	0
	Área sin vegetación aparente	957 283	18 216	994 242	18 919	976 503	18 582	976 503	18 469	976 503	25 912
	Vegetación secundaria herbácea	190 940	9 899	226 451	11 741	188 368	9 766	188 368	9 640	188 368	19 633
	Total	103 477 829	3 924 883	107 124 180	4 099 927	108 045 872	4 146 575	108 045 872	4 095 041	108 045 872	4 157 617
Agua	Cuerpos de agua	1 396 821	52 057	1 349 296	50 286	1 358 573	50 632	1 358 573	53 319	1 358 573	53 460
	Total	1 396 821	52 057	1 349 296	50 286	1 358 573	50 632	1 358 573	53 319	1 358 573	53 460
Bosque cultivado	Bosque cultivado					33 014	882	33 014	1 591	33 014	1 470
	Total					33 014	882	33 014	1 591	33 014	1 470
Totales		194 369 616	9 193 596	194 322 109	9 140 945	194 317 118	9 128 010	194 317 118	9 150 731	194 317 118	9 152 471

es 90% del promedio, por lo que resulta en una alta incertidumbre.

Las clases de uso del suelo y vegetación, así como las de ecosistemas, se dejaron acordes con las de INEGI (1997), con clases particulares entre paréntesis (*sensu* INEGI) para definiciones específicas.

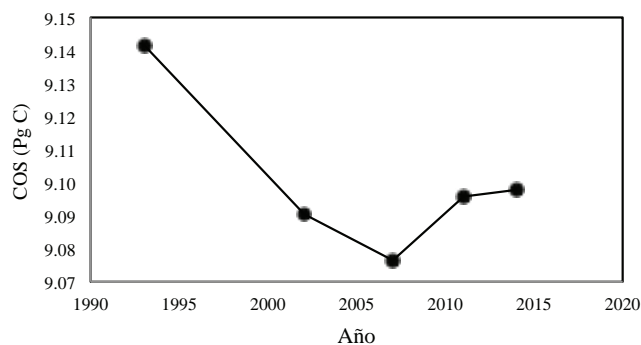
La Figura 10 muestra la evolución temporal del COS total en el país, donde a partir del 2007 se presenta una mejoría en las reservas del COS, revirtiendo la tendencia a la disminución en el periodo 1993-2007.



**Figura 9. Relación entre el promedio y la desviación estándar de las estimaciones del Cuadro 2 para los tipos de vegetación.**

Para analizar en forma desagregada la evolución temporal con las clases de FAO, en la Figura 11 se muestran los patrones de la clase Bosques y Otras Tierras (No Bosques), donde para Bosques el patrón de pérdidas de COS se ha estabilizado a partir del 2007 y para Otras Tierras el patrón de ganancias también se ha estabilizado en las mismas fechas. En el caso de la clase Otras Tierras Boscosas, el patrón de pérdidas de COS se ha mantenido hasta el 2014.

Es importante señalar que las tendencias de las Figuras 10 y 11 tienen alta incertidumbre, dadas las desviaciones estándar (Figura 9) e intervalos de



**Figura 10. Evolución temporal del COS total en el país.**



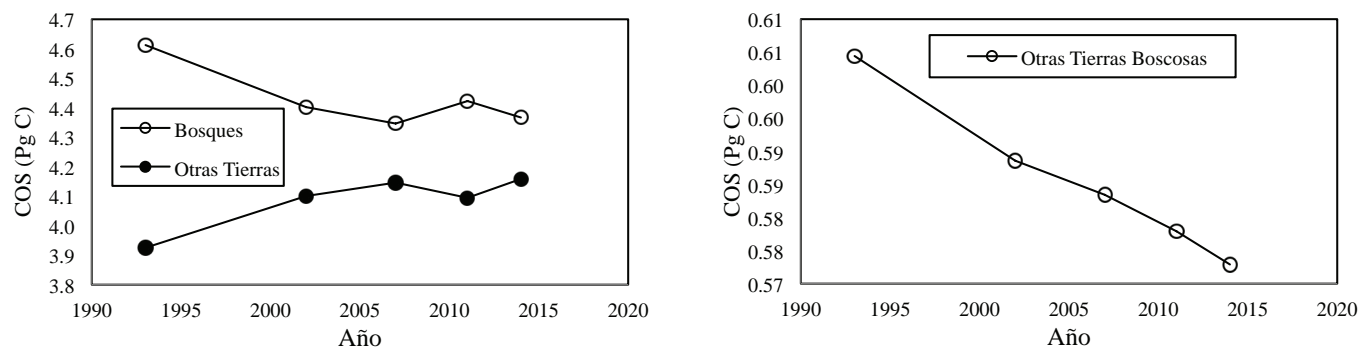


Figura 11. Patrones temporales para las clases Bosques, Otras Tierras y Otras Tierras Boscosas.

confianza asociados, por lo que los patrones de pérdidas y ganancias muestran traslapes importantes, que hacen altamente inciertas las conclusiones.

El análisis de la evolución temporal por sectores (Bosques para CONAFOR y Otras Tierras para SAGARPA; donde Otras Tierras Boscosas muestra traslapes entre CONAFOR y SAGARPA – ver Cuadro 3 para análisis de los USyV asociados) indica la necesidad de una coordinación entre sectores gubernamentales para instrumentar políticas conjuntas para mitigación de gases efecto invernadero (Paz, 2010<sup>7</sup>). En términos generales, el sector forestal muestra pérdidas de COS y el agropecuario ganancias; aunque además de inciertas estas tendencias no son claras las posibles explicaciones de estos patrones.

El análisis que se muestra, parte de la hipótesis de que los cambios de COS entre los diferentes años de los mapas del INEGI (datos de actividad) son independientes del tiempo y, que reflejan patrones agregados de la dinámica del COS. Esto es, no se considera la evolución temporal en forma explícita de cada polígono de USyV, pudiéndose presentar inconsistencias de cambios fuertes del COS en tiempos cortos, incoherentes con la dinámica esperada del COS.

## CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS Y TEXTURA

Dadas las altas incertidumbres en las estimaciones del carbono orgánico en los suelos, es importante analizar si es posible reducirlas al considerar otras variables asociadas a las bases de datos disponibles.

Muchos trabajos publicados establecen una relación funcional entre el COS y la textura del suelo, particularmente de la fracción limo + arcilla: suelos tropicales (Feller y Beare, 1997) y suelos templados

(Hassink, 1997; Konen *et al.*, 2003; Müller y Höper, 2004; Arrouays *et al.*, 2006). En la base INEGI-COLPOS de datos de perfiles de suelo de México y en el INFyS de la CONAFOR, los únicos datos disponibles son el COS total y la textura del suelo (Etchevers, 2013), por lo que es importante analizar los patrones COS-Textura, particularmente para revisar si las estimaciones del COS pueden mejorarse al usar datos de textura de los suelos.

En una perspectiva dinámica, la textura del suelo es un rasgo estático y el COS una propiedad dinámica, que varía en función del clima, uso del suelo, tipo de suelo, mineralogía, etc. Así, se espera que, para una textura dada del suelo, el COS varíe en función del estado de la vegetación (p. ej.: cambio de bosque a cultivo), rompiendo la relación con la textura, como propiedad estática; aunque para el caso de vegetación no perturbada (valores máximos del COS) se esperan relaciones más o menos bien definidas.

Con base en los perfiles de suelos de la sección anterior, se analizaron los patrones textura-COS por tipo de ecosistema, con el porcentaje de arena de los suelos (recíproco del porcentaje limo + arcilla, que generalmente se usa) y el COS a la profundidad 0 a 30 cm. El porcentaje de arena se calculó como un promedio ponderado por estrato, en forma similar al caso del COS, ecuación (3).

La Figura 12a muestra la relación Arena-COS para el ecosistema Bosque de Pino y la Figura 12b para Matorral Xerófilo. Para todos los ecosistemas se definió la envolvente superior (COS máximo) de los diagramas Arena-COS (Figura 12), para tener un estimado del valor máximo del COS para una textura dada.

Para caracterizar las envolventes superiores (COS máximo), la recta del límite a la izquierda (valores bajos de Arena) se definió como  $\text{COS (\%)} = A1 +$

<sup>7</sup> Paz, F. 2010. Evaluación, importancia y perspectivas de la captura de carbono y reducción de emisiones de gases efecto invernadero en pastizales y matorrales: hacia la implementación de REDD++. En: M. E. Velasco, M. Salvador, M. L. Adriano, R. A. Perezgrovas y B. Sánchez (eds). Memorias del I Congreso Internacional de Pastizales Chiapas 2010. SOMMAP. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. pp. 7-22.

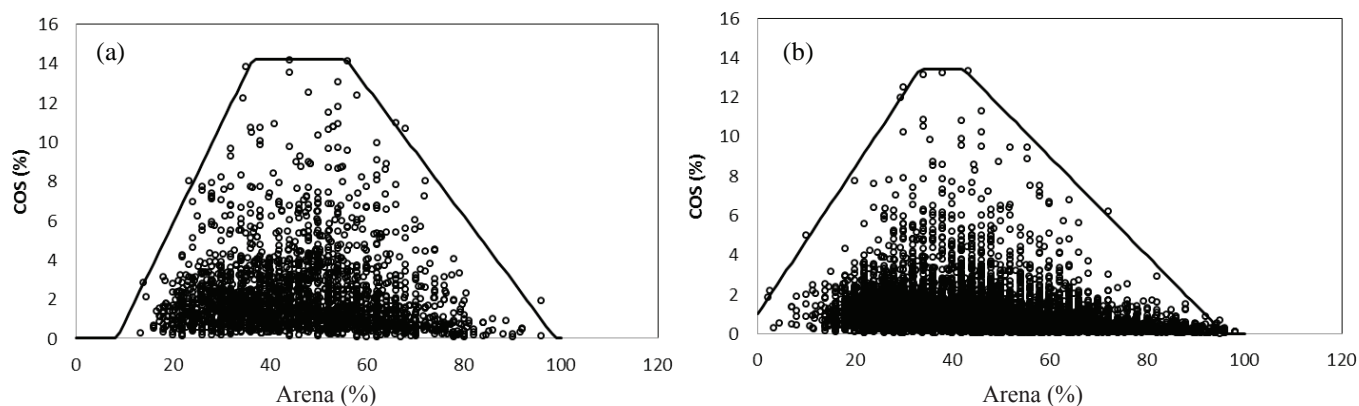


Figura 12. Dispersión de la relación Arena-COS y las envolventes superiores. (a) Bosque de Pino y (b) Matorral Xerófilo.

B1 Arena (%) y el límite a la derecha como COS (%) =  $A2 + B2 \text{ Arena} (\%)$ . Las constantes A1, B1, A2 y B2 se estimaron por regresión lineal con los puntos muestrales de los límites. El Cuadro 4 muestra los resultados que se obtuvieron para definir la envolvente superior para los ecosistemas de México.

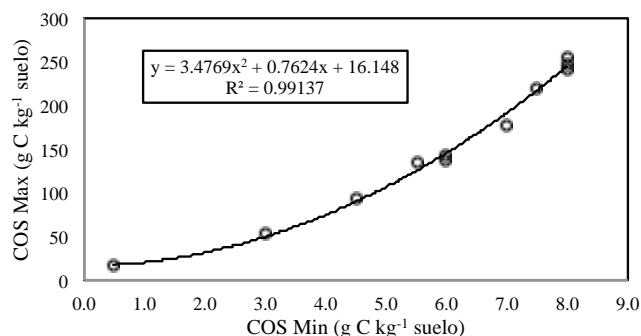
En el caso de los valores mínimos, la gran mayoría es cero o cercana a cero, Figura 12. Para la técnica de Walkley-Black, De Vos *et al.* (2007) establecieron su límite de detección en alrededor de 0.05%, por lo que este valor se utilizó como un mínimo general para establecer los valores de COS mínimo para los ecosistemas. De esta consideración, en un análisis de estimación del COS mínimo se eliminaron los valores

con  $\text{COS} < 0.05\%$  y se revisaron los histogramas de los valores mínimos de las muestras de los perfiles de suelos, estableciéndose estimaciones del COS mínimo para los ecosistemas, tal como se muestra en el Cuadro 4.

De los valores del Cuadro 4, la relación entre el COS máximo y el mínimo se muestra en la Figura 13, la cual puede usarse para establecer, como primera aproximación, la ganancia máxima de COS a obtener, dado un valor de COS actual del ecosistema. La estimación del déficit de ganancia (COS máximo – COS actual) define áreas de oportunidad para intervención, focalizándolas en donde es posible obtener la máxima ganancia de COS.

Cuadro 4. Parametrización de la envolvente superior de la relación Arena-COS y COS Min.

Ecosistema	A1	B1	A2	B2	COS Max	COS Min
- - - - - % - - - - -						
Sin vegetación aparente	-0.745	0.068	2.485	-0.025	1.5	0.05
Matorral xerófilo	1.008	0.372	24.016	-0.251	13.4	0.55
Pastizal	0.388	0.180	19.807	-0.210	9.5	0.45
Otros tipos de vegetación	-4.599	0.336	12.168	-0.121	5.3	0.30
Bosque de coníferas	-4.279	0.508	32.487	-0.329	14.2	0.60
Bosque de encino	-10.888	0.918	22.282	-0.234	13.8	0.60
Bosque mesófilo de montaña	-2.539	0.385	49.067	-0.579	17.7	0.70
Selva caducifolia	2.403	0.771	36.756	-0.382	25.6	0.80
Selva espinosa	-0.619	0.381	72.637	-0.761	22.0	0.75
Selva subcaducifolia	3.064	0.259	57.427	-0.618	24.1	0.80
Selva perennifolia	-5.503	0.758	57.950	-0.598	24.7	0.80
Vegetación hidrófila	-4.277	0.581	53.296	-0.556	22.7	0.75



**Figura 13. Relación entre el COS Min y el COS Max para los ecosistemas terrestres de México.**

## CONCLUSIONES

- La estimación del almacén del carbono orgánico en los suelos (COS) minerales de México se ha realizado con diferentes conjuntos de muestras y diferentes metodologías, e hipótesis implícitas, con valores que difieren entre sí en función de la aproximación utilizada. Aunque el uso de esquemas de agregación por tipo de suelo o tipo de uso de suelo y vegetación da resultados similares, las hipótesis implícitas en los procesos de estimación son fuentes altas de incertidumbre. En lo general, el método de estimación de la densidad aparente produce estimaciones diferentes del COS nacional, por lo que es una de las fuentes de mayor error en las estimaciones (Schrumpf *et al.*, 2011). En el caso de no considerar la fracción de fragmentos gruesos (>2 mm) del suelo conduce a sobre estimaciones del COS, por lo que es necesario corregir los valores del COS por este factor.
- Independientemente de la metodología utilizada y sus bases de datos, las estimaciones realizadas tienen el defecto de que no pueden validarse al no utilizar modelos predictivos y solo agregaciones estadísticas asociadas a polígonos de uso del suelo y vegetación y, de otros tipos.
- El uso de bases de datos de mediciones de COS con diferentes fechas, agregadas en una sola base de datos, puede explicar las diferencias en las estimaciones del almacén (FAO e ITPS, 2015), por lo que es necesario considerar la situación de suponer como invariantes al tiempo las mediciones del COS.
- Las revisiones realizadas de inventarios del COS y las nuevas estimaciones parten de cambios en las clases de uso del suelo y vegetación (USyV) de los mapas

de INEGI y suponen que éstos no tienen incertidumbre, reflejando que la dinámica del COS es solo producto de cambios de las clases de USyV. En realidad, esto no es así, por lo que se requiere urgentemente estimar las incertidumbres de los mapas de actividad del INEGI para poder realizar estimaciones realistas, con la incertidumbre asociada.

- Una de las mayores limitaciones de las estimaciones que se analizaron en este trabajo, además de no proporcionar medidas de incertidumbre en esquemas de calibración-validación, fue que las mediciones del COS no fueron simultáneas a las de la biomasa, para poder establecer patrones entre ambos almacenes en las clases de USyV, así como para establecer condiciones de equilibrio, o no, en la dinámica del COS. A partir del 2009, la CONAFOR ha realizado mediciones conjuntas de ambos almacenes en el INFyS, por lo que su consideración en futuros inventarios definirá nuevas aproximaciones. El procesamiento de los datos de suelos del INFyS se está llevando a cabo actualmente (Tiscareño *et al.*, 2013), con algunas estimaciones preliminares de las densidades de COS y otros almacenes (Saynes *et al.*, 2012).
- El uso de técnicas geoestadísticas (variabilidad espacial) que fusionen diferentes fuentes de información y consideren el conocimiento de la dinámica del COS (Goovaerts, 1997), así como el efecto de escala (Paz *et al.*, 2006<sup>8</sup>), permitirá mejores estimaciones espaciales.
- La consideración de la textura del suelo, asociada al COS de una clase dada, está limitada en términos predictivos, dado el carácter dinámico del COS, solo pudiendo establecer valores límites máximo y mínimo de las estimaciones.
- La evolución temporal del COS en las clases de los Informes de Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales de FAO, indica la necesidad de estructurar políticas conjuntas de intervención para mitigar, al menos, gases efecto invernadero entre el sector forestal y el agropecuario.

## LITERATURA CITADA

- Amundson, R. 2001. The carbon budget in soils. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29: 535-562.
- Arrouays, D., N. Saby, C. Walter, B. Lemerrier, and C. Schvartz. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use Manage.* 22: 48-51.

<sup>8</sup> Paz, F., C. Balbontín y J. Etchevers. 2006. Integración de información terrestre y satelital: un ejemplo para el caso del carbono orgánico en los suelos. Documento de trabajo COLPOS. Montecillo, Estado de México. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)

- Balbontín, C., C. O. Cruz, F. Paz, and J. D. Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. pp. 71-96. *In*: R. Lal and R. F. Follett (eds.). Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. SSSA special publication 57. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI, USA.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 161-163.
- Batjes, N. H. 1997. A World data set of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modelling. *Soil Use Manage.* 13: 9-16.
- Brady, N. C. and R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- 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. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- CONAFOR (Comisión Nacional Foresta). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional. FAO. Rome, Italy.
- CONAFOR (Comisión Nacional Foresta). 2014. Global forest resources assessment 2015. Country Report Mexico. Rome, Italy.
- CONAFOR-SEMARNAT (Comisión Nacional Foresta-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2014. National Forest Reference Emission Level Proposal Mexico. Report prepared for United Nations Framework Convention on Climate Change. Lima, Peru.
- CONAFOR-SEMARNAT (Comisión Nacional Foresta-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2015. National Forest Reference Emission Level Proposal Mexico (Modified Version). Report prepared for United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris, France.
- Covaleda, S., F. Paz y B. De Jong. 2013. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. pp. 29-34. *In*: F. Paz, M. Bazan y V. Saynes (eds.). Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México.
- Cruz, C. y F. Paz. 2013. Mapa de carbono orgánico de los suelos de la República Mexicana. pp. 187-191. *In*: F. Paz, M. Bazan y V. Saynes (eds.). Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México.
- Cruz, G., L. López, C. A. Ortiz, J. L. Villaseñor, E. Ortiz, J.T. Silva, and F. Estrada. 2014. Interpolation of Mexican soil properties at a scale of 1:1 000 000. *Geoderma* 213: 29-35.
- de Jong, B. H. J. 2012. Step-wise approach in improving greenhouse gas inventories. The case of Mexico. pp. 47-52. *In*: B. Mora, M. Herold, V. De Sy, A. Wijaya, L. Verchot, and J. Penman. Capacity development in National Forest Monitoring. Experiences and Progress for REDD+. Joint report by CIFOR and GOF-C-GOLD. Bogor, Indonesia.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martinez, G. Guerrero, and C. Balbontin. 2010a. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 260: 1689-1701.
- de Jong, B., O. Masera, R. D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. Balbontín, M. Motolinía y G. Guerrero. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1993-2002. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y bosques. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- De Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C. O. Cruz y J. A. Argumedo. 2009a. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1990-2006. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- De Vos, B., S. Lettens, B. Muys, and J. A. Deckers. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: Recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use Manage.* 23: 221-229.
- Eswaran, H., E. Van Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-104.
- Etchevers, J. D. 2013. Estado actual de la investigación de los almacenes de carbono en México. pp. 27-31. *In*: F. Paz, M. Bazan y V. Saynes (eds.). Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México.
- Etchevers, J. D., O. Masera, C. Balbontín, D. Gómez, A. Monterroso, R. Martínez, M. Acosta, M. Martínez y C. Ortiz. 2006. Soil carbon sequestration in Mexico and Central America (Biome A). pp. 119-146. *In*: R. Lal, C. C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers, and E. Cerri (eds.). Carbon Sequestration in Soils of Latin America. Howarth Press, Inc. New York, NY, USA.
- Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Höglberg, S. Linder, F. T. MacKenzie, B. Moore, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, and W. Steffen. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system. *Science* 290: 291-296.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2001. Soil organic sequestration for improved land management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. Guidelines for Soil Description. Fourth Edition. Rome, Italy.
- FAO-ITPS (Food and 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. Rome, Italy.
- Feller, C. and M. H. Beare. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- González, L., J. D. Etchevers, F. Paz, R. Valdez, J. M. González, and E. C. Moreno. 2010. Estimation of changes in soil organic carbon in hillside systems on a regional scale. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 12: 57-67.



- González, L., M. Acosta, F. Carrillo, A. Baez y J. M. González. 2014. Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso del suelo en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 1275-1285.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil sciences: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89: 1-45.
- Goovaerts, P. 2001. Geostatistics modeling and uncertainty in soil science. *Geoderma* 103: 3-26.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191: 77-87.
- Hiederer, R. 2009. Distribution of organic carbon in soil profile data. EUR 23980 EN. Office of Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- Hiederer, R. and M. Köchy. 2011. Global soil organic carbon estimates of the harmonized world soil database. EUR 25225 En. Publication Office of the European Union. Luxembourg.
- INECC-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2015. Primer informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. INECC / SEMARNAT. Mexico.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1997. Base de datos geográficos. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación (vectorial). Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2002. Información geográfica sobre edafología. Serie I escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. Información nacional sobre perfiles de suelo Versión 1.2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, U. K.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. In: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner (eds.). Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Vienna, Austria.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jobbag, E. G. and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Applic.* 10: 423-436.
- Kempen, B., D. J. Brus, and J. J. Stoorvogel. 2011. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma* 162: 107-123.
- Kern, J. S. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 439-455.
- Konen, M. E., C. L. Burras, and J. A. Sandor. 2003. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in North Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1823-1830.
- Mackey, B., I. C. Colin Prentice, W. Steffen, J. I. House, D. Lindenmayer, H. Keith, and S. Berry. 2013. Untangling the confusion around land carbon science and climate change in mitigation policy. *Nature Climate Change* 3: 552-557.
- Martin, M. P., T. G. Orton, E. Lacarce, J. Meersmans, N. P. A. Saby, J. B. Paroissien, C. Jollivet, L. Boulonne, and D. Arrouays. 2015. Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale. *Geoderma* 223-225: 97-107.
- Meersmans, J., F. de Ridder, F. Cauters, S. de Baets, and M. Van Moile. 2008. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 143: 1-13.
- Meersmans, J., B. van Wesemael, F. De Rodder, and M. Van Molle. 2009. Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 152: 43-52.
- Mishra, U., R. Lal, B. K. Slater, F. Calhoun, D. Liu, and M. Van Meirvenne. 2009. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 614-621.
- Müller, T. and H. Höper. 2004. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: Consequences for model applications. *Soil Biol. Biochem.* 36: 877-888.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123: 1-22.
- Lettens, S., B. De Vos, P. Quataert, B. Van Wesemael, B. Muys, and J. Van Orshoven. 2007. Variable carbon recovery of Walkley-Black analysis and implications for national soil organic carbon accounting. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 1244-1253.
- Ordoñez, J. A. B., T. Hernández, A. Galicia, I. E. Jiménez, A. Núñez, J. D. León, C. Tapia, J. F. Torres, M. Hernández, M. J. Ordoñez, F. A. González, J. A. Carrera, L. E. Piña, R. Gómez, H. Cervantes y G. E. Álvarez. 2012. Actualización del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2010, para el Sector Uso de Suelo, Cambio en el Uso de Suelo y Silvicultura. Reporte preparado para INECC-PNUD. México, D. F.
- Padilla, J., J. D. Etchevers, R. C. Gomora, C. I. Hidalgo, M. Carrasco y V. Saynes. 2012. Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley-Black y NIR para determinar carbono en suelos. pp. 187-194. In: F. Paz y R. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- PMC (Programa Mexicano del Carbono). 2015. Serie VI de Uso del Suelo y Vegetación, Año Base 2014. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz, F., C. Balbontín, J. Etchevers, M. Martínez y C. Ortiz. 2008. Análisis multifractal del carbono en los suelos 1. Función universal de escalamiento. *Terra Latinoamericana* 26: 183-191.

- Paz, F., C. Balbontín, J. Etchevers, M. Martínez y C. Ortiz. 2009. Análisis multifractal del carbono en los suelos 2. Divergencia de momentos estadísticos. *Terra Latinoamericana* 27: 257-264.
- Paz, F., C. Balbontín, J. Etchevers, M. Martínez y C. Ortiz. 2010. Análisis multifractal del carbono en los suelos 3. Estimaciones escalantes. *Terra Latinoamericana* 28: 89-95.
- Paz, F., C. Cruz, J. Argumedo y J. Etchevers. 2012. Mapas nacionales del carbono orgánico en los suelos a escala nacional para las series II, III y IV de uso del suelo de INEGI. pp. 296-306. *In*: F. Paz y R. Cuevas (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología*. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Post, W. M., R. C. Izaurralde, L. K. Mann, and N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climate Change* 51: 73-99.
- Ruesch, A. and H. K. Gibbs. 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.
- Sanderman, J. and J. A. Baldock. 2010. Accounting for soil carbon sequestration in national inventories: A soil scientist's perspective. *Environ. Res. Lett.* 5: 1-6. doi:10.1088/1748-9326/5/3/034003.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1994. *Inventario Nacional Forestal Periódico*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F.
- Saynes, V., J. Etchevers, F. Paz, B. De Jong, C. O. Cruz, M. Carrasco, C. Hidalgo y J. Padilla. 2012. Carbono en los suelos forestales de México: Revalorando nuestros almacenes. pp. 440-447. *In*: F. Paz y R. Cuevas (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología*. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Scharlemann, J. P. W., E. V. J. Tanner, R. Hiederer, and V. Kapos. 2014. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Manage.* 5: 81-91.
- Schrumpf, M, E. D. Schulze, K. Kaiser, and J. Schumacker. 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences* 8: 1193-1212.
- Schulte, R. P. O., F. Bampa, M. Bardy, C. Coyle, R. E. Creamer, R. Fealy, C. Gardi, B. B. Ghaley, P. Jordan, H. Laudon, C. O'Donoghue, D. Ó'hUallacháin, L. O'Sullivan, M. Rutgers, J. Six, G. L. Toth, and D. Vrebos. 2015. Making the most of our land: Managing soil functions from local to continental scale. *Front. Environ. Sci.* doi:10.3389/fenvs.2015.00081.
- Segura, M. A., P. Sánchez, C. A. Ortiz y M. C. Gutiérrez. 2004. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23: 21-28.
- SEMARNAT-CP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio Postgraduados). 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, a escala 1:250,000. Memoria Nacional. México, D. F.
- Smith, P. 2012. Soils and climate change. *Current Opinion in Environ. Sustainab.* 4: 1-6
- Smith, P. and D. S. Powlson. 2003. Sustainability of soil management practices – a global perspective. pp. 241-254. *In*: L. K. Abbott and D.V. Murphy (eds.). *Soil Biological Fertility – A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Tiscareño, M., N. Cruz, I. Aguilera, H. Sánchez y C. O. Cruz. 2013. Preparación y análisis físicos de las muestras obtenidas en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2012. pp. 192-195. *In*: F. Paz, M. Bazan y V. Saynes (eds.). *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo*. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-0-5.
- Todd-Brown, K. E. O., J. T. Randerson, W. M. Post, F. M. Hoffman, C. Tamocai, E. A. G. Schuur, and S. D. Allison. 2013. Causes of variation in soil organic simulations from CMIP 5 earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences* 10: 1717-1736.
- Tomlinson, R. W. and R. M. Milne. 2006. Soil carbon stocks and land cover in Northern Ireland from 1939 to 2000. *Appl. Geography* 26: 18-39.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2015. Report on the technical assessment of the proposed forest reference emission level of Mexico submitted in 2014. FCCC/TAR/2015/MEX.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-264.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Yu, D. S., X. Z. Shi, H. J. Wang, W. X. Sun, E. D. Warner, and Q. H. Liu. 2007. National scale analysis of soil carbon storage in China based on Chinese soil taxonomy. *Pedosphere* 17: 11-18.