

El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán

The organic carbon stock in Leptosols with discontinuous distribution in the Peninsula of Yucatan

Carmen Delgado-Carranza¹, Francisco Bautista-Zúñiga^{1*}, Luz Ma. Calvo-Irabien², Yameli Guadalupe Aguilar-Duarte¹, Jazmín Guadalupe Martínez-Tellez²

¹Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701 Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, CP. 58190 Morelia, Michoacán, México

²Centro de Investigación Científica de Yucatán. Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: leptosol@ciga.unam.mx

Artículo científico recibido: 21 de octubre de 2014, aceptado: 04 de abril de 2016

RESUMEN. Para determinar el contenido del carbono orgánico en el suelo (COS) se requiere cuantificar la fracción gruesa (piedras y gravas), la densidad aparente (DA) y profundidad. El inventario de suelos del INEGI no reporta estos datos, por lo que los mapas de COS generan dudas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo a distancias cortas, así como los contenidos del carbono orgánico por unidad de área en suelos Leptosols del norte de la península de Yucatán. Se tomaron 102 muestras, para determinar el carbono orgánico por la técnica de dicromato de potasio; separando los fragmentos gruesos (grava gruesa, grava mediana y grava fina) de la tierra fina; el color se registró en seco y húmedo. La DA se midió con la cantidad de tierra fina en un volumen de 10 x 10 cm de superficie con profundidad variable hasta encontrar la roca; el análisis geoestadístico se realizó mediante kriging ordinario. Los suelos Leptosols presentaron valores de COS por debajo de 100 t ha⁻¹, con valores medios de 32.85, 37.57, 43.72 y 61.93 t ha⁻¹, para suelos pardos oscuros, pardos muy oscuros, negros y grises muy oscuros, respectivamente. Los fragmentos gruesos varían de 6.7 a 96.4 %, con promedio de 71.15 %. Se encontró que los valores de carbono orgánico del suelo son menores a los reportados en unidad de superficie.

Palabras clave: Materia orgánica, fracción gruesa, densidad aparente, desarrollo edáfico, geoestadística

ABSTRACT. The soil organic carbon (SOC) content requires quantifying the coarse fraction (stones and gravels), bulk density and depth. The soils inventory realized for INEGI didn't reports the first two parameters, then, the generated SOC maps have considerable doubt SOC. The objective was to evaluate the spatial variability of soil organic carbon over short distances, as well as to report the contents of organic carbon per unit area in Leptosols from northern of Yucatan Peninsula. 102 samples were taken; organic carbon was analyzed by technique of potassium dichromate; and coarse fragments (coarse gravel, medium and fine gravel) were separated from the fine earth. The Color was recorded dry and wet, bulk density was measured using the amount of fine earth in a volume of 10 x 10 cm surface by a depth to find the rock. Leptosols presented SOC values below 100 t ha⁻¹ reported for this area, with mean values of 32.85, 37.57, 43.72, and 61.93 t ha⁻¹, for dark brown soils, very dark brown, blacks and very dark grays respectively. Coarse fragments ranging from 6.7 % to 96.4 % with an average of 71.15 %. It was found that the values of soil organic carbon obtained in this study are lower than those reported in unit area.

Key words: Organic matter, coarse fraction, bulk density, soil development, geostatistics

INTRODUCCIÓN

El suelo es un importante reservorio de carbono, que contiene cerca de tres veces más del que hay en la vegetación y la atmósfera, además de retenerlo por largos períodos de tiempo. Por esta razón, se trabaja de manera intensiva a nivel nacional y mundial en la estimación del carbono fijado en suelos cultivados y no cultivados (FAO 2002, Chiti *et al.* 2012). En las zonas de karst es común que se sobreestime el contenido de carbono orgánico del suelo, debido a sus dificultades en el muestreo, por la gran cantidad de fragmentos gruesos (gravas y piedras) que obstaculizan la medición de la densidad aparente (Chen *et al.* 2014); y por la discontinuidad del suelo (Bautista *et al.* 2005a). En los mapas digitales se estima el carbono orgánico tomando en cuenta profundidades de entre 20 y 30 cm, la cual no la tienen los suelos Nudilithic o Lithic Leptosols (Bautista *et al.* 2003).

En el caso de la península de Yucatán, se han reportado altos porcentajes de carbono orgánico del suelo en la fracción de la tierra fina (Bautista *et al.* 2003, Shang y Tiessen 2003, Bautista *et al.* 2004, Bautista *et al.* 2005a,b, Díaz-Garrido *et al.* 2005), por lo que sus suelos son un gran almacén de carbono orgánico (Segura-Castruita *et al.* 2005), ya que la baja precipitación pluvial de la zona norte favorece su acumulación en el suelo. Para estos suelos se tienen pocos estudios que reporten valores de la densidad aparente (Bautista *et al.* 2005b, Díaz-Garrido *et al.* 2005, Gamboa *et al.* 2008). De la misma manera, la evaluación de la cantidad de fragmentos gruesos no se ha reportado (Bautista *et al.* 2004). Sin los valores de la densidad aparente y porcentajes de la fracción gruesa, no se puede realizar la transformación de los porcentajes de carbono orgánico de los suelos (Shang y Tiessen 2003, Bautista *et al.* 2004, Bautista *et al.* 2005ab, Díaz-Garrido *et al.* 2005).

La plataforma de calizas que dio origen a la parte norte de la península de Yucatán es de emersión reciente (Padilla 2007), su desarrollo edáfico es de incipiente a moderado (Follmer 1998), que se sustenta en los horizontes del perfil (Bautista *et al.* 2011). Es decir, los suelos Nidilithic Leptosol y Lithic Leptosol, son diferentes a otros suelos de mayor desarrollo. La idea de que los suelos del norte de la península de Yucatán son un gran reservorio de carbono orgánico es contradictoria a las condiciones de karst y de escaso a moderado desarrollo edáfico, así como a la presencia de clima semiárido y selva baja caducifolia. Por lo anterior, el objetivo fue evaluar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo a distancias cortas, así como reportar los contenidos del carbono orgánico por unidad de área en Leptosols del norte de la península de Yucatán.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza en la comisaría de Nohuayún del municipio de Tetiz, Yucatán, México, con extensión territorial de 1 649 ha. Se localiza al noroeste del estado de Yucatán entre los 20° 58' y 34" LN y los 89° 58' 13" LO. El clima es semiárido con lluvias en verano (BS₁(h')w), con vegetación de selva baja caducifolia. Los suelos dominantes son Lithic Leptosols en asociación con Nudilithic Leptosols (Bautista *et al.* 2011). Se seleccionó esta zona porque presenta condiciones ambientales que dificultan la producción y el almacenaje de carbono orgánico en el suelo (COS), como la presencia de karst, desarrollo edáfico escaso, clima semiárido y selva baja caducifolia. Además de que los Leptosols son representativos de extensas superficies del noroeste del estado de Yucatán (Figura 1).

En una parcela de 55 x 50 m, se diseñó un muestreo sistemático, para lo cual en una primera etapa la parcela se subdividió en subparcelas de 25 m² (5 x 5 m). En las intersecciones de la rejilla, cada 5 m se tomaron 102 muestras de suelo. Por la dificultad de utilizar la técnica del cilindro para la medición de la densidad aparente (DA), debido a la gran cantidad de fragmentos gruesos (grava y piedras), la alta variabilidad en la profundidad del suelo a distancias cortas y la escasa agregación, se decidió obtener 102 muestras de suelo en una superficie de 100 cm² (10 x 10 cm) con profundidad hasta encontrar la roca.

Las muestras de suelos y los fragmentos grue-

sos de rocas de diferente tamaño, se colocaron en bolsas de plástico, para luego en el laboratorio tamizar para obtener la fracción fina del suelo (< 2 mm de diámetro) con tamiz de malla 10; mientras que la fracción gruesa del suelo se separó en grava fina con un tamiz malla 10 (GF de 2 a 6.3 mm) y de manera manual la grava mediana (GM de 6.3 a 20 mm), la grava gruesa (GG de 20 a 63 mm) y las piedras (Siebe *et al.* 1996). La medición de la DA del suelo ($Mg\ m^{-3}$) se realizó en la cantidad de tierra fina con un volumen de 10 x 10 cm de superficie con profundidad variable hasta encontrar la roca (Gandoy 1992). La medición y cuantificación de los agregados del suelo se registró por forma, tamaño y estabilidad. La identificación del color de la muestra, en seco y en húmedo, por comparación con las tablas Munsell (Munsell 1994). El pH se obtuvo por el método potenciométrico con relación suelo : agua 1 : 2.5. Mientras que la conductividad eléctrica (CE) se midió con un conductímetro marca HANNA, en una relación 1 : 2.5; y la cuantificación del COS se realizó con la técnica de dicromato de potasio (Nelson y Sommers 1982).

Para el cálculo del COS se utilizó la ecuación:

$$cos = \sum_1^n \cos_{horizonte} [[cos] * DA * E * (1 - v) * 10]$$

Donde: COS = contenido de carbono orgánico en un perfil de suelo ($t\ C\ ha^{-1}$), COS horizonte = contenido de carbono orgánico por horizonte del suelo ($t\ C\ ha^{-1}$), [cos] = concentración de C en una masa de suelo fino obtenida en laboratorio (%), DA = Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$), E = espesor del horizonte (m) y V = % ocupado por fragmentos de roca en el horizonte/100.

Para convertir los valores porcentuales del carbono orgánico a unidad de superficie se utilizó la ecuación:

$$CO_{(tha^{-1})} = \frac{[TF_{tha^{-1}}]x[co(\%)]}{100}$$

Donde: $CO_{(tha^{-1})}$ = Carbono orgánico expresado en $t\ ha^{-1}$, $TF_{(tha^{-1})}$ = Tierra fina expresada $t\ ha^{-1}$ y $CO(\%)$ = Carbono orgánico expresado en porcentaje de la tierra fina.

Los resultados se analizaron con estadística descriptiva, histogramas de frecuencia y correlación lineal. Las muestras se agruparon utilizando el color en húmedo para hacer un análisis de varianza con el software Statgraphics Plus 5.1. Para mostrar la heterogeneidad espacial del COS se realizó un análisis geoestadístico mediante el ajuste del modelo teórico del variograma y el modelo experimental, la interpolación se realizó con la metodología de kriging ordinario por puntos con el software GS+ (Robertson 2008).

RESULTADOS

La desviación estándar indica gran heterogeneidad en las propiedades del suelo (Tabla 1). El intervalo de COS en porcentaje fue de 3.8 a 31.7 %. Los suelos separados por color presentaron porcentajes de COS dentro del intervalo de valores reportados (Tabla 2). Los suelos negros y los grises muy oscuros son los que tienen mayores porcentajes de fracción gruesa, menores porcentajes de tierra fina, mayores porcentajes de COS y valores menores de DA en comparación con los suelos pardo oscuro y pardo muy oscuro (Figura 1). Al comparar las toneladas por hectárea en suelos de diferente color, las diferencias se reducen. Aun, cuando los suelos grises muy oscuros y los negros presenta los valores más altos, son diferentes a los suelos pardo oscuros. Esta situación se debe a que los suelos negros y grises tienen menores cantidades de tierra fina que los suelos pardos.

Se encontraron correlaciones entre las propiedades del suelo, como el COS con la fracción gruesa y el porcentaje de piedras; así como relación entre el COS y la DA. Valores lógicos, ya que a menor cantidad de tierra fina se tiene mayor contenido de carbono orgánico; mientras que a mayor pedregosidad y rocosidad es menor la cantidad de tierra fina. La sobre-estimación del COS en la península de Yucatán se debe a la dificultad de la cuantificación precisa de la fracción gruesa en volumen; a la gran variabilidad de la profundidad en espacios muy reducidos; y al uso de técnicas de

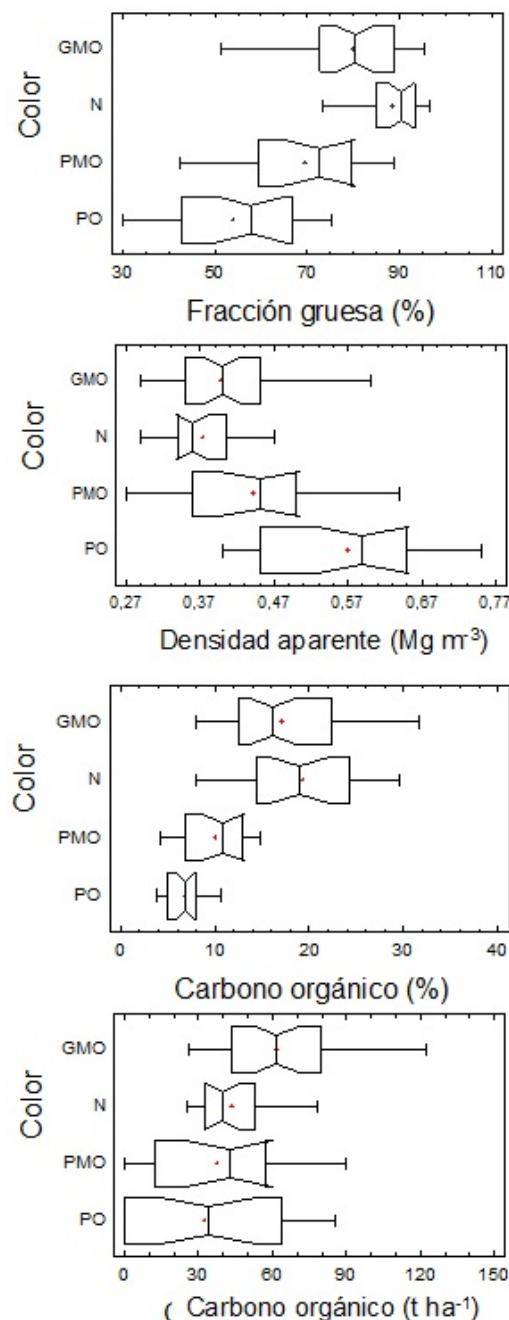


Figura 1. Propiedades de los suelos agrupando las muestras por color en húmedo.
GMO= gris muy oscuro; N= negro; PMO= pardo muy oscuro; PO= pardo oscuro.

medición de la densidad aparente. Por lo que se recomienda la cuantificación de la tierra fina por superficie hasta la máxima profundidad, para así

lograr una mejor estimación del COS en Leptosols de las zonas de karst.

Con el análisis geoestadístico se obtuvo un

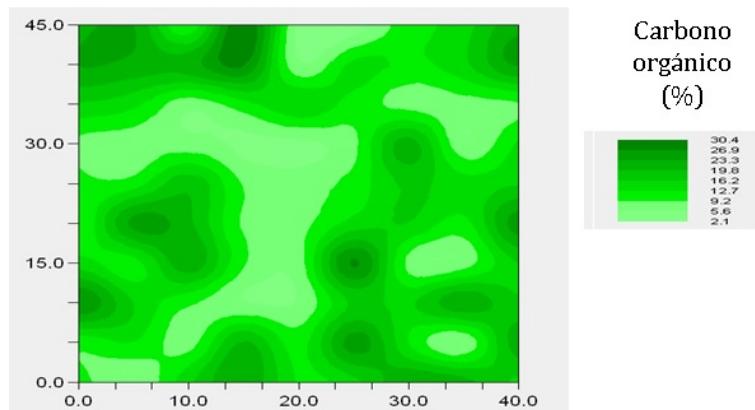


Figura 2. Mapa del carbono orgánico en una parcela del norte de Yucatán.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las propiedades del suelo de Nohuayún, Yucatán, México.

	Carbono orgánico (%)	Densidad Aparente (Mg m^{-3})	Fracción gruesa (%)	Grava fina (%)	Grava gruesa (%)	Grava Media (%)	Piedras (%)	Tierra fina (g)	$\text{C (t ha}^{-1}\text{)}$	C (%)
Media	14.02	0.44	73.63	2.83	38.43	12.13	20.22	381.45	48.56	13.98
Varianza	50.38	0.01	301.65	3.77	218.18	61.77	464.27	8 7720.1	864.45	48.76
Desviación										
Típica	7.09	0.116	17.37	1.94	14.77	7.92	21.55	296.17	29.4	6.98
Mínimo	3.8	0.27	30.2	0	11.6	0.5	0	1.03	0.04	3.8
Máximo	31.7	0.75	96.4	10.1	72.9	37.8	74.2	980	130.56	31.7
Rango	27.9	0.48	66.2	10.1	61.3	37.3	74.2	978.97	130.52	27.9
Asimetría	2.23	2.86	-2.88	3.75	1.03	3.41	3.69	1.94	0.37	2.38
Curtosis	-1.16	-0.33	-0.86	1.97	-1.228	1.75	-0.43	-1.84	-0.36	-1.12
N	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102

N= número de muestra.

Tabla 2. Valores de carbono orgánico reportados para el estado de Yucatán.

Referencias	Valor Mínimo (%)	Valor Máximo (%)	Nomenclatura maya	WRB, 2006
Ceccon et al. (2003)	19.7	29.7		
Gamboa et al. (2008)	11.18	22.9		
Shang y Tiessen (2003)	9.1	11.9	Kankab	LV/CM
Shang y Tiessen (2003)	17.9	25.2	Box lu'um	LPlu-hu
Bautista et al. (2005)	7	9	Chac lu'um	LPrz
Bautista et al. (2005)	11	15	Box lu'um	LPlu
Díaz-Garrido et al. (2005)		7.4	Hay lu'um	LPlu-cr
Sweetwood et al. (2009)	1.15	11.3	Kankab	LV
Sweetwood et al. (2009)	5	16.2	Box lu'um	LPlu-hu
Sweetwood et al. (2009)	0.21	0.88	Sak lu'um	LPca
Este estudio (GMO)	7.3	31.7	Tzekel/Chich lu'um	LPnu/LPskh
Este estudio (N)	7.9	29.5	Chich lu'um	LPSkh
Este estudio (PMO)	4.2	14.7	Hay lu'um	LPlu-sk
Este estudio (PO)	3.8	10.6	Chaltun/Hay lu'um	LPnu-sk/LPlu-sk

GMO= gris muy oscuro; N= negro; PMO= pardo muy oscuro; PO= pardo oscuro.

modelo del variograma tipo Gaussiano con una $r^2 = 0.87$; lo que indica que es un modelo adecuado para explicar la autocorrelación espacial o dependencia espacial del COS. Con relación a la varianza estruc-

tural el valor fue de 88.4 %, por lo que la variabilidad espacial tiene una alta influencia en la distribución del COS y que la varianza al azar fue baja (11.6 %), lo que indica un diseño de muestreo adecuado.

En la figura 2 se muestra el mapa de la distribución espacial del carbono orgánico, en el que se observa discontinuidad en el porcentaje, por lo que se requiere un análisis espacial de muchas muestras para reportar el intervalo sobre las propiedades de los suelos de esta zona de la península de Yucatán. Las mayores cantidades de COS están relacionados con la presencia de la pedregosidad y rocosidad, así como con la escasa cantidad de tierra fina de color negro. Por lo contrario, en los suelos en los que hay menos piedras y sin afloramientos rocosos hay mayor cantidad de tierra fina de color pardo a rojo.

DISCUSIÓN

La Norma Oficial Mexicana 021 (SEMARNAT 2003) reporta porcentajes de COS de 0.5 para las clases muy baja, 0.6 a 1.5 para la clase baja, 1.6 a 3.5 para la clase media, 3.6 a 6.0 para la clase alta, y mayor de 6 % para la clase muy alta. En el presente estudio se encontraron valores entre 3.8 y 31.7 % de COS, los cuales son por mucho superiores al máximo reportado en la NOM-021. Lo que sugiere la generación de una nueva propuesta de clases para zonas de karst, que tome en cuenta los valores reportados por Ceccon *et al.* (2003), Gamboa *et al.* (2008), Shang y Tiessen (2003), Bautista *et al.* (2005a,b), Díaz-Garrido *et al.* (2005), Sweetwood *et al.* (2009), y los del presente estudio, por lo que se propone la clasificación de extremadamente baja menor de 1 %, muy baja de 1 a 5 %, baja de 5 a 10 %, media de 10 a 15 %, alta de 15 a 20 % y muy alta para mayor de 20 %.

El valor medio de COS en unidades de superficie fue de 48.56 t ha^{-1} , por debajo de los valores estimados por Segura-Castruita *et al.* (2005) para el estado de Yucatán que es de 100 a 206 t C ha^{-1} . Mientras que la FAO (2002) reporta 38 t ha^{-1} para suelos tropicales secos y 36 t ha^{-1} para Lithic Leptosols, valores que concuerdan con los suelos pardos muy oscuros y los pardo oscuros del norte del estado de Yucatán, pero se encuentran por debajo del valor medio de los suelos negros y grises muy oscuros (Tabla 2). Los resultados obtenidos

en este trabajo concuerdan con el escaso desarrollo edáfico de los suelos, consecuencia de horizontes A/R y A/C/R y con la escasa productividad de la selva baja caducifolia (Bautista *et al.* 2011).

Para la densidad aparente la NOM-021 establece tres niveles, para suelos arcillosos, frances y arenosos, con valores de 1 a 1.19 Mg m^3 , 1.20 a 1.32 Mg m^3 y mayor de 1.32 Mg m^3 , respectivamente. De acuerdo a lo encontrado en el presente estudio para suelos de karst se propone la siguiente clasificación: bajo $< 0.35 \text{ Mg m}^3$, medio de 0.351 a 0.55 Mg m^3 y alto $> 0.55 \text{ Mg m}^3$. Para la fracción gruesa no existen clases en la NOM-021 (SEMARNAT 2003) por lo que se propone la siguiente: muy bajo, menor de 20 %, bajo de 20 a 40 %, medio de 40 a 60 %, alto de 60 a 80 % y muy alto, mayor de 80 %. En cuanto a la discontinuidad espacial en el porcentaje de COS, el ajuste entre el modelo teórico y el experimental para este estudio es similar al encontrado por Díaz-Garrido *et al.* (2005) para el municipio de Mérida, Yucatán. Las diferencias encontradas en el presente estudio con respecto a los resultados de Bautista *et al.* (2015), se pueden deber a las diferentes condiciones de suelos y climas, ya que a menor cantidad de precipitación se tiene mayor acumulación de COS en los suelos, lo que es cuestionable, debido a que se debe de tomar en cuenta la discontinuidad espacial.

CONCLUSIONES

La cantidad de carbono orgánico edáfico es acorde con los valores reportados en porcentaje, pero más bajos que los reportados en unidad de superficie, por lo que se supone que se encuentra sobre estimando. El análisis espacial de los suelos a cortas distancias revela una alta discontinuidad y variabilidad en el porcentaje de carbono, profundidad y cantidad de fragmentos gruesos. La comparación en el contenido de COS entre suelos debe considerar la discontinuidad espacial y la cantidad de COS en t ha^{-1} .

LITERATURA CITADA

- Bautista F, Frausto O, Ihl T, Aguilar Y (2015) Actualización del mapa de suelos de Yucatán utilizando un enfoque geomorfológico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2: 303-315.
- Bautista-Zúñiga F, Jiménez-Osornio J, Navarro-Alberto J, Manu A, Lozano R (2003) Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra* 21: 1-11.
- Bautista-Zúñiga F, Estrada-Medina H, Jiménez-Osornio J, González-Iturbe J (2004) Relación entre relieve y unidades de suelo en zonas cársticas. *Terra Latinoamericana* 22: 243-254.
- Bautista F, García J, Mizrahi A (2005a) Diagnóstico campesino de la situación agrícola en Hocabá, Yucatán. *Terra Latinoamericana* 23: 571-580
- Bautista F, Díaz-Garrido S, Castillo-González M, Zinck JA (2005b) Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan Karst: Comparison of Mayan, WRB , and numerical classifications. *Eurasian Soil Science* 38: S81-S88.
- Bautista F, Palacio G, Quintana P, Zinck A (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135: 308-321.
- Ceccon E, Huante P, Campo J (2003) Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the survival and recruitment of seedling of dominant tree species in two abandoned tropical dry forests in Yucatan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 182: 387-402.
- Chen XB, Zheng H, Zhang W, He X, Li L, Wu J, et al. (2014) Effects of land cover on soil organic carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil distribution. *Journal of Mountain Science* 11: 774-781.
- Chiti T, Gardin L, Perugini L, Quarantino R, Primo-Vaccari F, Miglietta F, et al. (2012) Soil organic carbon stock assessment for the different cropland land uses in Italy. *Biology and Fertility of Soils* 48: 9-17.
- Díaz-Garrido S, Bautista F, Delgado C, Castillo M (2005) Mapas parcelarios de suelo en Mérida, Yucatán, México. En: Bautista F, Palacio G (eds). *Caracterización y manejo de suelos en la península de Yucatán, México*. UAC, UADY, INE, México. pp: 145-158.
- FAO (2002) Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia. 61p.
- Follmer LR (1998) A scale for judging degree of soil and paleosol development. *Quaternary International* 51-52: 12-13
- Gamboa AM, Hidalgo C, De León F, Etchevers JD, Gallardo JF, Campo J (2008) Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: Early versus late-succession stages. *Restoration Ecology* 18: 252-260.
- Gandoy BW (1992) Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Suelos. Texcoco, Estado de México, México. 20p.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Rome.
- Munsell (1994) Munsell Soil Color Charts: Determination of soil color. *Handbook 18. Soil Survey Manual*. Department Agriculture, USA. 29p
- Nelson DW, Sommers LE (1982) Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. pp: 535-577

SEMARNAT (2003) Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (NOM-021-SEMARNAT-2001): México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003. 85p.

Padilla R (2007) Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 59: 19-42.

Robertson GP (2008) GS+: Geoestatistics for the environmental sciences. Gamma design software, plainwell, Michigan USA. 172p.

Segura-Castruita MA, Sánchez-Guzmán P, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC (2005) Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamericana 23: 21-28.

Shang C, Tiessen H (2003) Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. Bio-geochemistry 62: 177-196.

Siebe C, Janh R, Stahr K (1996) Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Estado de México, México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México. 58p.

Sweetwood RV, Terry RE, Beach T, Dahlin BH, Hixson D (2009) The Maya footprint: Soil resources of Chunchucmil, Yucatán, Mexico. Soil Science Society of American Journal 73: 1209-1220.