

Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México*

Changes in soil organic carbon under scenarios of land use change in Mexico

Lucila González Molina¹, Miguel Acosta Mireles¹, Fernando Carrillo Anzures², Aurelio Báez Pérez^{3,8} y Juan Manuel González Camacho⁴

¹INIFAP-Campo Experimental Valle de México, km 13,5 Carretera Los Reyes-Textcoco, Textcoco, Estado de México. C. P. 56250. Tel: 015959212657 (gonzalez.lucila@inifap.gob.mx; acosta.miguel@inifap.gob.mx). ²Campo Experimental Toluca-INIFAP, km 4.5 Carretera Toluca-Zitácuaro, Vial Adolfo López Mateos, Col. Barbosa, Zinacantepec Estado de México. C. P. 51350 (carrillo.fernando@inifap.gob.mx). ³INIFAP-Campo Experimental Bajío, km 6,5. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato. C. P. 38010 (baez.aurelio@inifap.gob.mx). ⁴Colegio de Postgraduados, Computación Aplicada, Campus Montecillo, km 36.5, Carretera México-Textcoco, Textcoco, México. C. P. 56230 (jmge@colpos.mx). ⁸Autor para correspondencia: baez.aurelio@inifap.gob.mx.

Resumen

La información de los cambios del carbono orgánico del suelo (COS) debido al cambio de uso de suelo de vegetación secundaria a sistemas de labranza, matorrales o pastizales en México es escasa. El presente estudio se condujo en 2011 en sitios ubicados en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Veracruz, con el propósito de estimar los cambios del COS bajo diferentes escenarios de cambio de uso de suelo de los sistemas con vegetación secundaria a sistemas de labranza, matorrales o pastizales, usando el modelo de simulación de carbono RothC. Las simulaciones se realizaron para un periodo de 40 años tomando en cuenta: las mediciones puntuales de COS en los sitios de estudio, la entrada estimada de C al suelo de los residuos vegetales y abonos, y la evaluación del desempeño del modelo RothC en sitios y sistemas de México. De acuerdo con los resultados de simulación de escenarios de cambio de uso de suelo, el uso de sistemas de labranza de conservación bajo condiciones de riego o temporal, es la mejor alternativa para conservar los almacenes de COS y evitar pérdida de este elemento como emisiones de CO₂.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo (COS), dinámica del COS, sistemas agrícolas, sistemas forestales.

Abstract

Information regarding changes in soil organic carbon (SOC) due to change in land use of secondary vegetation tillage systems, scrub or grassland in Mexico is meager. This study was attended in 2011, at sites located in the States of Mexico, Hidalgo, Tlaxcala and Veracruz, in order to estimate changes in SOC under different scenarios of change in land use systems with secondary vegetation tillage systems, scrub or grassland, using the Rothamsted Carbon Model (RothC). The simulations were performed for a period of 40 years, taking into account: specific measurements of SOC in the study sites, the estimated C input into the soils of the plant residues and fertilizers, and the evaluation of RothC performance in sites and systems of Mexico. According to the results of simulation of scenarios of land use change, the use of conservation tillage systems under irrigated or rainfed conditions is the best alternative to conserve SOC stores and avoid loss of this element as CO₂ emissions.

Keywords: agricultural systems, forestry systems, soil organic carbon (SOC), SOC dynamics.

* Recibido: enero de 2014
Aceptado: junio de 014

Introducción

A nivel mundial, la cantidad de carbono (C) almacenado en el suelo (1 467 a 1 548 Pg de C, 1 Pg = 1×10^{15} g) es el doble de la cantidad almacenada en la atmósfera (760 Pg) y el triple de la cantidad de C de la biomasa vegetal aérea (550 Pg) (Eswaran, *et al.*, 1993). Los cambios del COS muestran la influencia del manejo en los sistemas y la capacidad de éstos para tolerar o resistir el aumento de las concentraciones del CO₂ atmosférico (Janzen, 2003). El COS se monitorea en experimentos de larga duración, ya que en periodos menores de 10 años los cambios de C son relativamente pequeños comparados con el tamaño de este almacén (Smith, 2003; Liang *et al.*, 2003).

En México, los experimentos de los cambios del COS, de acuerdo con González-Molina *et al.* (2011) son de corta duración (<20 años); en estos casos, el uso de modelos de simulación del COS es útil para estimar los cambios de este almacén a largo plazo. El modelo RothC-26.3 propuesto por Coleman y Jenkinson (2005) es uno de los más usados en la simulación de la dinámica del C en el suelo en diferentes ecosistemas del mundo (Coleman *et al.*, 1997). En México el modelo RothC se evaluó en diferentes sitios y sistemas de México, en los sistemas agrícolas y forestales este modelo tuvo una eficiencia (EF) de 0.9 a 0.93 y en pastizales de 0.66 (González-Molina *et al.*, 2011).

En lo referente al cambio de uso del suelo (CUS), según Lal (2004) en los últimos 200 años se ha reportado que éste y las actividades agrícolas han conducido a pérdidas del C edáfico y se estima que son del orden de 78 ± 12 Pg de C atmosférico. Cuando el CUS se lleva de sistemas forestales o pastizales a sistemas agrícolas generalmente hay pérdidas de COS; según (Guo y Gifford, 2002) estos pueden ser en promedio del orden de 42% y 59%, respectivamente. En contraste, cuando el CUS es de sistemas agrícolas a bosques y pastizales, hay una ganancia en donde la tasa de acumulación de COS es del orden de 0.338 y 0.332 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, (Post y Kwon, 2000).

En particular la cobertura de la vegetación original en México, se ha perdido principalmente debido al CUS y en consecuencia también ha cambiado en su estructura y composición, lo cual se refleja en la presencia de la vegetación secundaria (CONAFOR, 2012). La vegetación secundaria ocupa 29% de la superficie nacional forestal y en particular los bosques de coníferas, latifoliadas y

Introduction

All over the world, the amount of carbon (C) stored on the soil (1 462 at 1 548 Pg of C, 1 Pg = 1×10^{15} g) is twice the amount stored in the atmosphere (760 Pg) and triple the amount of C of the aerial plant biomass (550 Pg) (Eswaran *et al.*, 1993). SOC changes show the influence of management systems and their ability to tolerate or resist the increasing concentrations of atmospheric CO₂ (Janzen, 2003). The SOC is monitored in long-term experiments, since in periods less than 10 years C changes are relatively small compared to the size of this store (Smith, 2003; Liang *et al.*, 2003).

In Mexico, experiments of SOC changes, according to González-Molina *et al.* (2011) are of short duration (<20 years); in these cases, the use of simulation models of SOC is useful for estimating changes in this long-term storage. The RothC-26.3 model proposed by Coleman and Jenkinson (2005) is one of the most used in the simulation of the dynamics of C in the soil for different ecosystems of the world (Coleman *et al.*, 1997). In Mexico the RothC model was assessed at different sites and systems of Mexico, in agricultural and forestry systems, this model had an efficiency (EF) from 0.9 to 0.93 to 0.66 in grasslands (González-Molina *et al.*, 2011).

Regarding the change of land use (CLU), according to Lal (2004) in the last 200 years it has been reported that this and agricultural activities have led to losses of C and are estimated to be of 78 ± 12 Pg of atmospheric C. When the CLU takes forest or grassland systems to agricultural systems usually no loss of SOC; as (Guo and Gifford, 2002) these can be on average of 42% and 59% respectively. In contrast, when the CLU is about farming, forests and grasslands systems, where there is a gain in the rate of accumulation of SOC is about 0.338 and 0.332 Mg ha⁻¹ year⁻¹, respectively, Post and Kwon, 2000).

Particularly, the coverage of the original vegetation in Mexico has been lost mainly due to CLU and consequently has also changed its structure and composition, which is reflected in the presence of secondary vegetation (CONAFOR, 2012). Secondary vegetation occupies 29% of the national forest area and particularly conifer, broadleaf and cloud forest has 48% (CONAFOR, 2012), forest area including our study sites.

Considering the above background, this study was conducted at sites in the States of Mexico, Hidalgo, Tlaxcala and Veracruz, in order to estimate changes in SOC under different scenarios of

bosque mesófilo de montaña presenta 48% (CONAFOR, 2012), superficie forestal que incluye los sitios de nuestro estudio.

Considerando los antecedentes anteriores, el presente estudio se condujo en sitios ubicados en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Veracruz, con el objetivo de estimar los cambios del COS bajo diferentes escenarios de cambio de uso de suelo de sistemas con vegetación secundaria a sistemas con labranza, matorrales y pastizales, usando el modelo de simulación de la dinámica del carbono RothC. Las simulaciones se llevaron a cabo para un periodo de 40 años con la información siguiente: mediciones puntuales de COS en los sitios de estudio, estimación de entrada de C orgánico al suelo de los residuos vegetales y abonos y considerando la evaluación del desempeño del modelo RothC en México del estudio de González-Molina *et al.* (2011).

Materiales y métodos

Características de los sitios y sistemas de estudio

En el Cuadro 1, se presentan la localización, información climática y edáfica de los cinco sitios de estudio en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Veracruz.

En cada sitio de estudio se presentan diferentes sistemas con vegetación: bosque de encino, con vegetación secundaria arbustiva (BQVSA), ubicado en el Estado de México e Hidalgo; bosque de encino, con vegetación secundaria arbórea (BQVSA), en Tlaxcala; bosque de pino, vegetación secundaria arbórea (BPVSA), en el estado de Tlaxcala; bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva (BPVSA), en Perote Veracruz; Selva Baja Caducifolia (SBC), en Santa Fe, Veracruz.

Los sistemas de CUS considerados en el modelo RothC fueron: de agricultura tradicional y de conservación practicados en cada región; tales como, la labranza tradicional (LT) y la labranza de conservación (LC), bajo condiciones de temporal (-T) y de riego (-R) y fueron: LC-R; LC-T; LT-T; y LT-R. También se consideraron como sistemas de CUS el matorral y pastizal en los sitios de Perote y Santa Fe en el Estado de Veracruz (Cuadro 1).

change in land use systems with secondary vegetation systems tillage, grassland and scrub, using RothC. The simulations were made for a period of 40 years with the following information: specific measurements of SOC in the study sites, estimated C input to the soil of organic plant residues and manures and considering the performance evaluation model RothC study in Mexico González-Molina *et al.* (2011).

Materials and methods

Characteristics of the study sites and systems

The Table 1 shows the location, climate and soil information of the five study sites in the States of Mexico, Hidalgo, Tlaxcala and Veracruz are presented.

Cuadro 1. Características generales de los sitios de estudio para la simulación del cambio de uso de suelo, en cinco sitios de México.

Table 1. General characteristics of the study sites for the simulation of land use change, in five sites in Mexico.

Características/ Sitios	Perote, Ver.	Perote, Ver.	Tlaxcala México- Hgo.	S. Fe, Ver.	
Latitud norte(1)*	19° 40'	19° 26'	19° 47'	19° 43'	19° 11'
Longitud oeste(1)	97° 10'	97° 11'	98° 36'	99° 19'	96° 31'
Altitud (m) (1)	2 335	1 571	2 500	2107	230
Núm. Est. climatológica(2)	30 128	30 175	29 023	10 516	3 002
Precipitación anual (mm)(2)	499	1 695	675	652	10 36
Temperatura media anual (°C)(2)	13	10	13	13	24
Evaporación media anual (mm)(2)	135	91	134	139	121
Arcilla (%)	12	12	24	18	45
Tipo de suelo (3)	Andosol ócrico	Andosol ócrico	Feozem Aplico	Litosol	Vertisol pélico

*Fuentes: 1) obtenidos en el presente estudio; 2) Comisión Nacional del Agua (CNA), 2012; y 3) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1998).

Modelo RothC

En la simulación de los cambios de COS, se usó el modelo de múltiples compartimentos RothC (Coleman y Jenkinson, 2005). Este modelo divide el almacén de COS en cuatro compartimentos activos y uno pasivo por su tiempo de duración en el suelo, los activos son: 1) material vegetal de fácil descomposición (MVF, con una duración en el suelo de 0.165 años), 2) material vegetal resistente (MVR, 2.71 años), 3) biomasa microbiana (BIO, 1.69 años), 4) materia orgánica humificada (HUM, 49.5 años), y el pasivo es: 5) materia orgánica inerte (MOI, 1980 años). Los compartimentos activos experimentan descomposición por cinética de primer orden, según la siguiente expresión: $Y = Y_0 (1 - e^{-abck^t})$, donde: Y_0 es el C inicial del compartimento activo; k es la tasa constante de descomposición anual; t es 1/12 para obtener la tasa de descomposición al final de cada mes; y a , b y c son los factores que modifican a k y son temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad (mm) y cobertura del suelo (número de meses), respectivamente. El valor de k para cada compartimento presenta los siguientes valores: MVD (10), MVR (0,3), BIO (0,66), y HUM (0.2). El compartimento pasivo, MOI (Mg ha^{-1}) se obtuvo con la ecuación de Falloon *et al.* (1998) expresada por $\text{MOI} = 0.049 * \text{COT}^{1.139}$, donde COT es el carbono orgánico (Mg ha^{-1}).

Datos de entrada

Los datos de entrada del modelo RothC son: 1) climáticos: temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), precipitación (mm) y evaporación (mm) promedio mensual, TPM, PPM y EPM, respectivamente; 2) edáficos: contenido de arcilla y profundidad de muestreo del suelo; 3) entrada mensual de C al suelo de residuos vegetales (RVs) y abonos orgánicos (AO); 4) la cobertura vegetal mensual del suelo, si el suelo está desnudo o con cobertura vegetal; 5) la relación MVD/MVR; y 6) el valor de la MOI obtenido de la ecuación de Falloon *et al.* (1998). Un archivo edafo-climático se construye con la información de 1) y 2) y los archivos de manejo de suelo, se construyen con los meses con cobertura vegetal del suelo y la información mensual de RVs y AO.

La información de entrada al modelo asumida y medida de los sitios y sistemas de estudio fue la siguiente: 1) climática, se obtuvo de las normales climatológicas de la CNA (2012); 2) edáfica: COS, contenido de arcilla y profundidad de muestreo del suelo, fue obtenida en el presente estudio; 3) la entrada mensual de C al suelo de residuos vegetales (RVs) y abonos orgánicos (AO) y las fuentes de información en los

In every study site there are different systems with vegetation: oak forest with shrubby secondary vegetation (BQVSA) located in the States of Mexico and Hidalgo; Oak forest with secondary vegetation tree (BQVSA) in Tlaxcala; Pine forest, secondary forest tree (BPVSA), in the State of Tlaxcala; Pine forest, shrubby secondary vegetation (BPVSA) in Perote Veracruz; Deciduous forest (SBC), Santa Fe, Veracruz.

CLU systems considered in RothC were: traditionally practiced agriculture and conservation in each region; such as conventional tillage (LT), conservation tillage (LC) under rainfed (-T) and irrigation (-R) conditions and were: LC-R; LC-T; LT-T; and LT-R. We also considered as CLU systems the scrub and grassland sites in Perote and Santa Fe in the State of Veracruz (Table 1).

RothC

In the simulation of SOC changes, the multi-compartment model RothC (Coleman and Jenkinson, 2005) was used. This model divides the SOC store in four active and one passive compartments for its running time on the ground, the assets are 1) easily decomposable plant material (MVF, lasting on the soil of 0.165 years), 2) resistant plant material (MVR, 2.71 years), 3) microbial biomass (BIO, 1.69 years), 4) humified organic matter (HUM, 49.5 years), and the passive is: 5) inert organic matter (MOI 1980 years). Active compartments undergo decomposition kinetic of first order, according to the following equation: $Y = Y_0 (1 - e^{-abck^t})$, where Y_0 is the initial C of the active compartment; k is the constant annual rate of decomposition; t is 1/12 for the decomposition rate at the end of each month; and, b and c are the factors that modify k , those are temperature ($^{\circ}\text{C}$), humidity (mm) and land cover (number of months), respectively. The value of k for each compartment has the following values: MVD (10), MVR (0.3), BIO (0.66) and HUM (0.2). Passive compartment MOI (Mg ha^{-1}) was obtained with the equation of Falloon *et al.* (1998) expressed as $\text{MOI} = 0.049 * \text{COT}^{1.139}$, where COT is organic carbon (Mg ha^{-1}).

Input data

Input data for RothC are: 1) climate: air temperature ($^{\circ}\text{C}$), precipitation (mm) and evaporation (mm), monthly average, TPM, PPM and EPM, respectively; 2) soil: clay content and soil sampling depth; 3) monthly C input into the soil of plant residues (RVs) and organic fertilizers (AO); 4)

sistemas de vegetación secundaria y de CUS se muestran en el Cuadro 2, en el caso de los RVs, la concentración de C en el tejido vegetal fue de 45%, de acuerdo con las mediciones de Figueroa *et al.* (2005); 4) la cobertura vegetal mensual del suelo, en los sistemas con LC, matorrales y pastizales, fue de 12 meses, en la LT fue de 7 meses entre los meses de junio a diciembre; 5) la relación MVD/MVR, de acuerdo con Coleman y Jenkinson (2005), fue de 0.25 en los bosques, de 1.44 en LC, LT y pastizales y de 0.67 en los matorrales; y 6) el valor de la MOI obtenido de la ecuación de Falloon *et al.* (1998).

monthly ground cover, if the ground is bare or mulched; 5) the MVD/MVR relationship; and 6) MOI value obtained from equation by Falloon *et al.* (1998). A soil-climate file is built with information from 1) and 2) and soil management files, built with the months with ground cover and monthly information on RVs and AO.

The input data to the assumed model and measurement systems in the study sites was as follows: 1) climate, obtained from the mean climatological of the CNA (2012);

Cuadro 2. Aporte de residuos orgánicos aéreos y subterráneos de los sistemas de vegetación secundaria y de cambio de uso de suelo, en cinco sitios de México.

Table 2. Contribution of organic waste and underground systems of secondary vegetation and land use change, in five sites in Mexico.

Sistemas	Residuos orgánicos ^e	Perote, Ver.	Tlaxcala	México-Hgo.	S. Fe, Ver.
BQVSA ^a			RVs RothC		
BQVsa	BA/BS			RVs RothC	
BPVSA	BA/BS	RVs RothC			
BPVsa	BA/BS	RVs RothC			
SBC	BA/BS				RVs RothC
LT-R ^b	BA	Rto/IC ^{(1)d}	5.5/0.4	3.2/0.4	6.0/0.4
		Rastrojo ⁽²⁾	0.18 BA	0.18 BA	0.18 BA
	BS	Raíces ⁽³⁾	0.15 BA	0.15 BA	0.15 BA
LC-R	BA	Rto/IC	5.5/0.4	3.2/0.4	6.0/0.4
		Rastrojo ⁽²⁾	1.0 BA	1 BA	0.18 BA
	BS	Raíces ⁽³⁾	0.15 BA	0.15 BA	0.15 BA
LT-T	BA	Rto/IC	3.5/0.4	1.9/0.4	3.2/0.4
		Rastrojo ⁽²⁾	1.0 BA	0.18 BA	0.18 BA
	BS	Raíces ⁽³⁾	0.15 BA	0.15 BA	0.15 BA
LC-T	BA	Rto/IC	3.5/0.4	1.9/0.4	3.2/0.4
		Rastrojo ⁽²⁾	1.0 BA	1 BA	0.18 BA
	BS	Raíces ⁽³⁾	0.15 BA	0.15 BA	0.15 BA
Pastizal	BA/BS/AO ⁽⁴⁾		PPN(1-%UPPN) ^e		PPN(1-%UPPN)
Matorral	BA/BS ⁽⁵⁾		(6)	(6)	

^aBQVsa= bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva; BPVSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbórea; BPVsa= bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva; SBC= selva baja caducifolia. ^bLT-R= labranza tradicional, riego; LC-R= labranza de conservación, riego; LT-T= labranza tradicional, temporal; LC-T= labranza de conservación, temporal. ^cBA= biomasa aérea; BS= biomasa subterránea; AO= abonos orgánicos; PPN= productividad primaria neta; Rto= rendimiento; IC= índice de cosecha; Rvs= residuos vegetales. ^dFuentes: 1) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2012); 2) Pérez *et al.* (2000); 3) Kuzyakov y Domanski (2000); 4) Díaz-Solís *et al.* (2006); 5) Díaz-Solís *et al.* (2003); y 6) Núñez *et al.* (2001). ^e%UPPN= porcentaje de utilización de la productividad primaria neta por el ganado.

La medición del COS en los sitios de estudio se llevó a cabo en 2010 en el estrato de profundidad de 0-30 con el procedimiento siguiente: las muestras de suelo se secaron al aire, se registró su peso, con auxilio de pinzas, se retiraron raíces, restos vegetales y animales visibles, se tamizaron a 2 mm, se tomaron submuestras y a éstas se les determinó la concentración de COS por combustión seca, en un analizador automático de C, Shimadzu TOC 5000. Se determinó la densidad aparente (Da) esto es, la relación entre el peso del suelo seco y el volumen del suelo. Para determinar el peso de suelo seco se tomó en cuenta el suelo mineral más el humificado, y no se consideró el peso de los RVs orgánicos y piedras; el volumen del suelo se obtuvo como la diferencia entre el volumen total y el de los RVs y piedras.

Procedimiento de simulación

El procedimiento de simulación, se desarrolló en las etapas: inicialización y elaboración de escenarios de C. La inicialización, consistió en estimar el contenido inicial de C de los compartimentos activos en un estado de equilibrio, es decir donde las entradas y salidas de carbono del suelo son similares. Se asumió que los suelos de la vegetación secundaria se encontraban en equilibrio, ya que, según Nieto *et al.* (2010) los suelos alcanzan esta condición una vez que han permanecido con el mismo uso por más de 30 años, para esto, el modelo RothC se ejecutó 10 000 años atrás con la información edafo-climática y de manejo del suelo de la vegetación secundaria. La información de manejo de suelo de los RVs anuales se generó con el uso del RothC y se muestra en el Cuadro 3.

2) soil: SOC, clay content and soil sampling depth, obtained in the present study; 3) monthly C input to the soil of plant residues (RVs) and organic fertilizers (AO) and sources of information in the system of secondary vegetation and CLU are shown in Table 2, as in the case of RVs, C concentration in plant tissue was 45%, measured according to Figueroa *et al.* (2005); 4) Monthly ground cover, with LC systems, scrub and grassland, 12 months in the LT and 7 months between June and December; 5) the MVD/MVR ratio, according to Coleman and Jenkinson (2005), 0.25 in the woods, 1.44 in LC, LT and 0.67 in grassland and scrub; and 6) the MOI value obtained from equation by Falloon *et al.* (1998).

Measurement of SOC in the study sites was conducted in 2010 in the depth range 0-30 with the following: soil samples were air dried, weight was recorded with the aid of tweezers, withdrew roots, plant debris and visible animals were sieved at 2 mm, sub-samples were taken and these were analysed for SOC concentration by dry combustion, in an automatic analyser of C, Shimadzu TOC 5000. The bulk density was determined (Da) that is the ratio of the weight of the dry soil and soil volume. In order to determine the weight of dry soil was taken into account more the humified mineral soil, and was not considered the weight of the organic stones and RVs; soil volume was obtained as the difference between total volume and RVs and stones.

Simulation procedure

The simulation procedure was developed in stages: initialization and scenarios of C. Initialization, was to estimate the initial C content of active compartments in

Cuadro 3. Condiciones iniciales de simulación con el modelo RothC en los sistemas de vegetación secundaria de los cinco sitios de estudio.

Table 3. Initial conditions simulation with RothC systems in secondary vegetation of the five study sites. .

Sitios/Sistemas ^a	Perote, Ver. BP VSA	Perote, Ver. BP VSA	Tlaxcala BQ VSA	Méx.-Hgo BQ VSA	S. Fe, Ver. SBC
Variables ^b : Prof. Muestreo	32	32	31	16	30
COS (Mg ha ⁻¹) (1)	115	97	71	68	170
Da g cm ⁻³ (1)	0.64	0.72	0.83	1.27	1.23
MOI (Mg ha ⁻¹)	11	97	6	69	17
MVD/MVR	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
RVs (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	2.8	4.09	2.8	2.9	17
CB (meses)	12	12	12	12	12

^asistemas con vegetación: BQ Vsa= bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva; BP VSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbórea; BP VSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva; SBC= selva baja caducifolia. ^bvariables: MOI= materia orgánica inerte; MVD/MRD= relación: material vegetal de fácil descomposición y material vegetal de difícil descomposición; RVs= residuos vegetales; CB= cobertura vegetal del suelo

Los escenarios se simularon durante un periodo de 40 años (1914-2053) y fueron las combinaciones de vegetación secundaria y sistemas de labranza, matorral o pastizal, que se practican en cada lugar (Cuadro 4). Estos escenarios se componen de la información de los contenidos de C de los compartimentos activos y pasivo de la vegetación secundaria obtenida en la etapa de inicialización del modelo RothC y la del manejo del suelo de los sistemas de CUS. La información de manejo del suelo de los sistemas de CUS fue la entrada de RVs al suelo y se presenta en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Matriz de cambio de uso de suelo de los sistemas con vegetación secundaria a los de labranza, pastizales y matorrales, en los sitios de estudio.

Table 4. Matrix change in land use systems with secondary vegetation to arable, grassland and scrub in the study sites.

Sitios/ Sistemas	Perote/ BPVSA ^a	Perote/ BPVSA	Tlaxcala/ BQVSA	Méx-Hgo/ BQVSA	Santa Fe/SBC
LT-R ^b	X	X	X	X	
LC-R	X	X	X	X	
LT-T	X	X	X	X	X
LC-T	X	X	X	X	X
Pastizal	X	X			X
Matorral			X	X	

Sistemas con vegetación: BQVSA= bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva; BQVSA= bosque de encino, vegetación secundaria arbórea; BPVSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva; BPVSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbórea; SBC= selva baja caducifolia. ^bsistemas de cambio de uso de suelo: LT-R= labranza tradicional, riego; LC-R= labranza de conservación, riego; LT-T= labranza tradicional, temporal; LC-T= labranza de conservación, temporal. X= indica el cambio de uso de suelo simulado con el modelo RothC.

Evaluación del desempeño del Modelo RothC

La simulación de escenarios de CUS en el presente estudio se efectuó considerando el desempeño del modelo RothC favorable para los sistemas agrícolas y forestales obtenido en el estudio de González-Molina *et al.* (2011) en experimentos de corta duración (< de 20 años).

Resultados y discusión

En la Figura 1, se presentan los resultados de la simulación de escenarios de CUS de vegetación secundaria a sistemas de labranza (LC-R, LC-T, LT-R y LT-T), matorral o pastizal de acuerdo con el sitio de estudio. La línea base o de equilibrio

a steady state, i.e. where the inputs and outputs of carbon are similar in the soil. It was assumed that the soils of the secondary vegetation were in equilibrium, since, according to Nieto *et al.* (2010) soils reach this condition once they have been with the same use for over 30 years for this, the model RothC ran 10 000 years ago with the pedo-climatic and soil management of secondary vegetation information. The information of soil management of annual RVs was generated with the use of RothC and shown in Table 3.

The scenarios were simulated for a period of 40 years (1914-2053) using the combinations of secondary vegetation and tillage systems, scrub or grassland, practiced in each location (Table 4). These scenarios consisted of the information content of C of the active and passive compartments of the secondary vegetation obtained in the initialization of RothC and soil management CLU systems. Land management information of CLU systems was the entry of RVs on the soil and is presented in Table 5.

Cuadro 5. Entrada de carbono al suelo de residuos vegetales y abonos orgánicos de los sistemas de cambio de uso de suelo usados en la simulación de escenarios con el modelo RothC.

Table 5. Carbon input into the soil of plant residues and manure of the soil use change systems used in the simulation scenarios with RothC.

Sitios/ Sistemas	Perote	Tlaxcala	Méx-Hgo	S. Fe, Ver.
	Residuos vegetales/abonos orgánicos (C Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)			
LT-R ^b	2.4	1.5	2.6	
LC-R	7.4	4.5	8.2	
LT-T	1.7	1.1	1.5	1.7
LC-T	4.9	2.8	4.6	4.9
Pastizal	2/0.7			3.5/1.2
Matorral		1.9	1.9	

^bsistemas de cambio de uso de suelo= LT-R= labranza tradicional, riego; LC-R= labranza de conservación, riego; LT-T= labranza tradicional, temporal; LC-T= labranza de conservación, temporal.

RothC performance evaluation

The CLU simulation scenarios in this study was performed considering the model performance, favourable for agricultural and forestry systems obtained in the study of González-Molina *et al.* (2011) in experiments of short duration (<20 years).

en el periodo de 40 años fue la de la vegetación secundaria debido a que los suelos alcanzan este estado cuando el uso del suelo se ha mantenido por un periodo superior a 30 años (Nieto *et al.*, 2010). En el estado de equilibrio las entradas del C al suelo son similares a las salidas (Fearnside y Barbosa, 1998), así los valores COS ubicados debajo de la línea base, mostraron pérdidas de C como emisiones de CO₂ atmosférico y los ubicados arriba de la línea base indicaron almacenamiento de C.

Results and discussion

The Figure 1 shows the results of the simulation of CLU scenarios, secondary vegetation tillage systems (LC-A, LC-T, LT-R and LT-T), scrub or grassland according to the site. The baseline or equilibrium in the period of 40 years was the high vegetation, because the soil reaches this state when land use has remained for more than 30 years

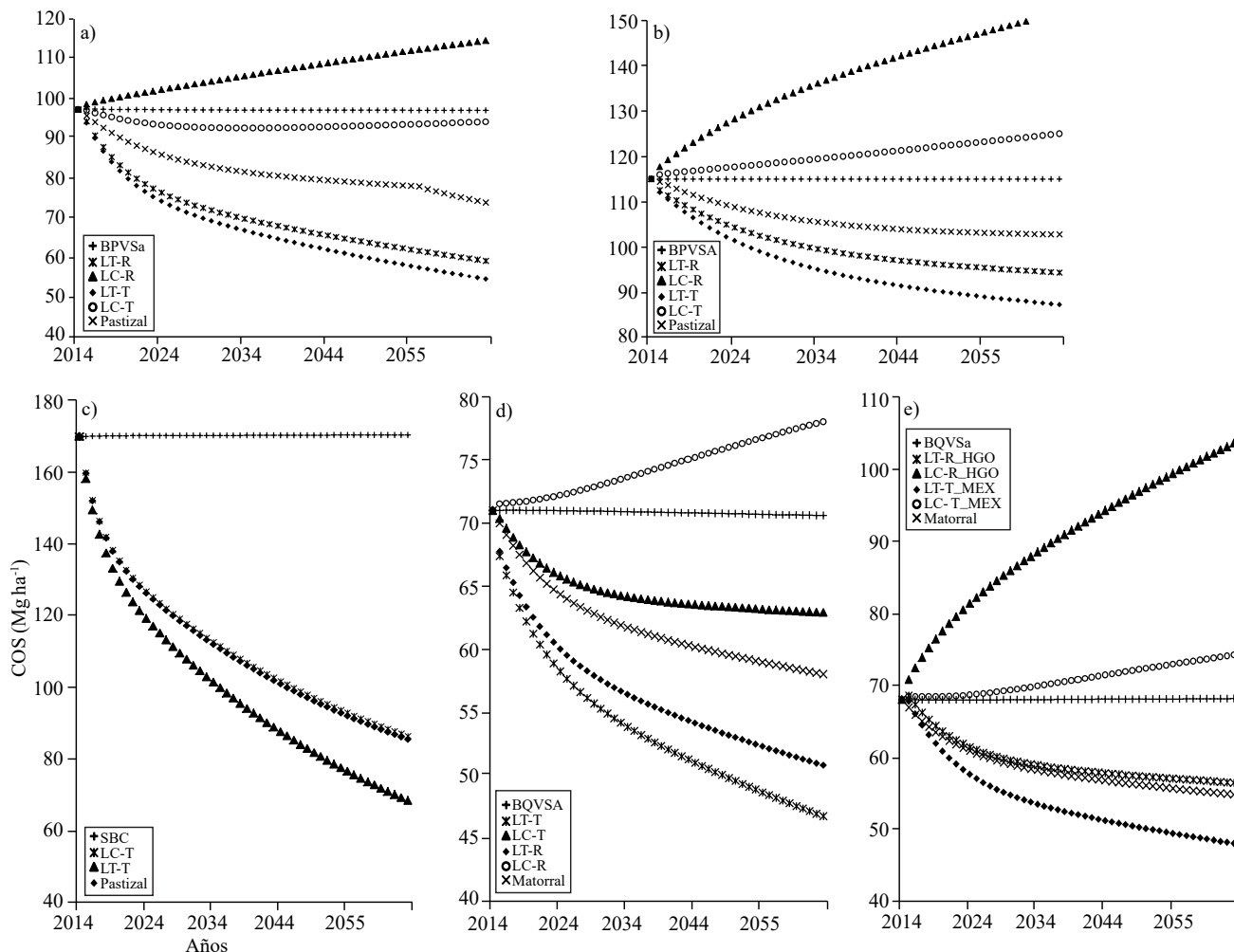


Figura 1. Cambios de COS después del cambio de uso de suelo de sistemas nativos a sistemas de labranza, matorral o pastizal en: a) Perote, Veracruz; b) Perote, Veracruz; c) Santa Fe, Veracruz; d) Tlaxcala; y e) Hidalgo y México. Leyenda: sistemas con vegetación secundaria: BQVSA= bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva; BQVSA= bosque de encino, vegetación secundaria arbórea; BPVSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva; BPVSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbórea; SBC= selva baja caducifolia. Sistemas de cambio de uso de suelo: LT-R= labranza tradicional, riego; LC-R= labranza de conservación, riego; LT-T= labranza tradicional, temporal; LC-T= labranza de conservación, temporal.

Figure 1. Changes of SOC after land use change from native systems tillage systems, scrub or grassland: a) Perote, Veracruz; b) Perote, Veracruz; c) Santa Fe, Veracruz; d) Tlaxcala; and e) Hidalgo and Mexico. Legend: systems with secondary vegetation BQVSA= oak forest, shrubby secondary vegetation; BQVSA= oak forest, secondary forest tree; BPVSA= pine forest, secondary forest tree; BPVSA= pine forest, shrubby secondary vegetation; SBC= deciduous forest. Systems of land use change: LT-R= conventional tillage, irrigation; LC-R= conservation tillage, irrigation; LT-T= traditional temporal tillage; LC-T = conservation tillage, temporary.

En el Cuadro 5, se muestran las tasas ($\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) de almacenamiento y de pérdida de COS, con valores positivos y negativos, respectivamente. En el caso del CUS de la vegetación secundaria a los sistemas de estudio, el almacenamiento de COS, sólo se presentó cuando el cambio fue a LC-R y LC-T y estuvo en el orden de 0.1 a 0.8 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, en Perote, Tlaxcala e Hidalgo y el estado de México. El CUS a pastizales se observó como la segunda opción para incrementar almacenamiento de COS en el suelo con cambios positivos de 0.2 y 0.38 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Estos resultados están dentro de lo reportado a escala mundial de 0.02 a 0.76 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para el caso de sistemas que adoptan sistemas de manejo mejorado (Lal, 2000). De acuerdo con Lal, (2004), la labranza de conservación y el manejo de pastizales son prácticas de manejo que se recomiendan debido a que almacenan o secuestran COS, debido a que la LC elimina la perturbación del suelo inducida por labranza y las pérdidas de C por erosión, además de que 50% de la biomasa aérea regresa al suelo, en el caso de los pastizales hay mayor producción de raíces e incorporación de COS al subsuelo incrementando su tiempo medio de residencia en el suelo. De acuerdo con Houghton (1995), el CUS de sistemas forestales a cultivo implica la siguiente dinámica de C: la pérdida de C se da por la liberación de este después de la tala del bosque, debido a la descomposición del material vegetal aéreo y subterráneo dejado en el suelo y la superficie del suelo durante la tala, una vez que se ha establecido el cultivo la producción de residuos vegetales acumulados son menores que los del bosque y la mayoría de estos son cosechados y posteriormente consumidos o respirados, además los almacenes de C bajo cultivo tienen una tasa de descomposición de mayor magnitud ya que queda desprotegida bajo cultivo (Balesdent *et al.*, 1998). Aslam *et al.*, (1999), encontró que la adopción de no labranza podría proteger al suelo de la degradación biológica y mantener la calidad del suelo comparada con la labranza convencional después del CUS de pasto a cultivo.

Con respecto a las pérdidas de C estuvieron en el orden de -0.3 a -0.6 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ excepto en el caso de la SBC donde se presentaron pérdidas de C mayores en el orden de -9 a -2.3. Esto puede explicarse porque la entrada de RVs en este tipo de vegetación es alto (17 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) comparado con las entradas de C de los sistemas de CUS (1.7-4.5 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) ver Cuadros 3 y 6. Guo y Gifford (2002) reportan con base a un análisis de información mundial que son posibles pérdidas hasta de 42% de COS, cuando el CUS es de vegetación forestal a cultivos y Don *et al.* (2011) coinciden con estos resultados ya que indican existe una pérdida rápida de C de la biomasa acompañado de pérdida de COS que incrementan las pérdidas de C del suelo.

(Nieto *et al.*, 2010). In the equilibrium state, C inputs into the soil are similar to the outputs (Fearnside and Barbosa, 1998) so the SOC values located below the baseline, showed losses of C as CO_2 emissions and atmospheric located above baseline indicated storage of C.

In Table 5, the rates ($\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$) of storage and loss of SOC are shown, with positive and negative values, respectively. In the case of CLU secondary vegetation to the study systems, SOC storage was only presented when the change went to LC and LC-R-T and was of 0.1 to 0.8 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$, in Perote, Tlaxcala, Hidalgo and State of Mexico. The CLU to pasture was observed as the second option to increase SOC storage in the soil with positive changes of 0.20 and 0.38 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$. These results are provided as reported worldwide from 0.02 to 0.76 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ for the case of systems that adopt improved management systems (Lal, 2000). According to Lal (2004), conservation tillage and pasture management are practices that are recommended because SOC storage, because the LC removes soil disturbance tillage-induced losses C erosion, also, 50% of the biomass returns to the soil, in the case of grassland there is a greater root production and incorporation of SOC subsurface is increasing the mean residence time in the soil. According to Houghton (1995), CLU of forest systems to cultivation implies the following dynamics of C: loss of C is given by releasing this after logging, due to decomposition of aerial plant material and underground left on the soil and the soil surface during cutting, once the crop is established, plant production residues are accumulated under the forest and most of these are harvested and then consumed or inhaled, also storing C under cultivation have a rate of decomposition of magnitude as unprotected under cultivation (Balesdent *et al.*, 1998). Aslam *et al.* (1999) found that the adoption of no-tillage could protect the soil of biological degradation and maintain the soil quality compared to conventional tillage after CLU from pasture to crop.

With respect to C losses, these were of -0.3 to -0.6 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ except for SBC which had larger losses, -9 to -2.3. This can be explained considering that, the input of RVs in this type of vegetation is quite high (17 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$) compared with C inputs in CLU systems (1.7-4.5 $\text{Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$) see Tables 3 and 6.

Guo and Gifford (2002) reported based on an analysis of global information that there are possible losses up to 42% of SOC, when the CLU is from forest vegetation to crop cultivation and Don *et al.* (2011) agreed with these results,

Cuadro 6. Cambios de COS, después de 40 años de CUS a partir de la línea base de la vegetación secundaria.
Table 6. Changes SOC, after 40 years of CLU from the base of the secondary vegetation line.

Sitios/sistemas ^{a/b}	Perote/BPVSA ^a	Perote/BPVSA	Tlaxcala/BQVSA	Méx-Hgo/BQVSA	Santa Fe/SBC
-----Tasa de cambio de COS (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)-----					
Vegetación secundaria ^a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LT-R ^b	-0.5	-0.9	-0.5	-0.3	
LC-R	0.8	0.4	0.1	0.8	
LT-T	-0.6	-1.0	-0.6	-0.5	-2.3
LC-T	0.2	-0.1	-0.2	0.1	-1.9
Pastizal	-0.3	-0.5			-1.9
Matorral			-0.3	-0.3	

^asistemas con vegetación secundaria; BQ VSA= bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva; BP VSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbórea; BP VSA= bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva; SBC= selva Baja Caducifolia. ^bsistemas de cambio de uso de suelo; LT-R= labranza tradicional, riego; LC-R= labranza de conservación, riego; LT-T= labranza tradicional, temporal; LC-T= labranza de conservación, temporal.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados de las simulaciones con el modelo RothC, el CUS de vegetación secundaria a sistemas de labranza, matorrales y pastizales, indican que el CUS de la vegetación secundaria a las opciones de sistemas de labranza de conservación bajo condiciones de riego o temporal puede ser la alternativa más favorable para conservar los almacenes de COS y evitar su pérdida como CO₂. En el caso del CUS de la SBC a los sistemas de labranza se deben adoptar prácticas con mayor entrada de residuos vegetales como pastizales.

Literatura citada

- Aslam, T.; Choudhary, M. A. and Saggar, S. 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil Tillage Res.* 51:103-111.
- Balesdent, J.; Besnard, E.; Arrouays, D. and Chenu, C. 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest cultivation sequence. *Plant Soil.* 201:49-57.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2012. Servicio Meteorológico Nacional. Normales climatológicas 1971-2000: Estaciones: 30128, 30175, 29023, 10516 y 30002. <<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/oax/NORMAL20209.TXT>>.
- Coleman, K.; Jenkinson, D. S.; Crocker, G. J.; Grace, P. R.; Klir, J.; Korschens, M.; Poulton, P. R. and Richter, D. D. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma.* 81:29-44.
- Coleman, K. and Jenkinson, D. S. 2005. ROTHC-26.3- a model for the turnover of carbon in soil: model description and windows users guide. Harpenden: Rothamsted Research. 1-43 pp.

because they indicate a rapid loss of C of the biomass accompanied with SOC loss that increase C losses in the soil.

Conclusions

According to the results of the simulations with RothC, the CLU from secondary tillage to vegetation, scrub and grassland systems, indicate that CUS of the secondary vegetation to the options of systems of conservation tillage under irrigation or rainfed conditions may be the most favourable alternative in order to keep the storages of COS and prevent its loss as CO₂. In the case of CLU for the SBC to tillage systems, practices with more input as plant residues pastures should be adopted.

End of the English version



- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2012. Inventario nacional forestal y de suelos. Informe 2004-2009. Coordinación General de Planeación e Información. Gerencia de Inventario Forestal y Geomática.
- Díaz-Solís, H.; Kothmann, M. M.; Grant, W. E. and De Luna-Villarreal, R. 2006. Use of irrigated pastures in semi-arid grazinglands: a dynamic model for stocking rate decisions. *Agricultural Systems.* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X05001022>. 88:316-331.
- Díaz-Solís, H., Kothmann, M. M., Hamilton, W. T. and Grant, W. E. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands. *Agricultural Systems.* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X01001159>. 76: 655-680.

- Don, A.; Schumacher, J. and Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*. 17:1658-1670.
- Eswaran, H.; Van Den Berg, E. and Reich, P. 1993. Organic carbon soils of the world. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 57:192-194.
- Organization of the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO). 1998. World reference base for soil resources. World soil resources report, 84. Rome: FAO.
- Falloon, P.; Smith, P.; Coleman, K. and Marshall, S. 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biol. Biochem.* 30:1207-1211.
- Fearnside, P. M. and Barbosa, R. I. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecol. Management* 108:147-166.
- Figueroa-Navarro, C.; Etchevers-Barra, J. D.; Velázquez-Martínez, A. y Acosta-Mireles, M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*. 23:57-64.
- González-Molina, L.; Etchevers-Barra, J. D.; Paz-Pellat, F.; Díaz-Solís H.; Fuentes-Ponce, M. H.; Covalada-Ocon, S. y Pando- Moreno, M. 2011. Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *J. Agric. Sci.* 149:415-425.
- Guo, L. B. y Gifford, M. R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*. 8:345-360.
- Houghton, R. A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. *In: soils and global change*. Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E. and Stewart, B. A. (Eds.). Lewis, Boca Raton, FL. 45-65 pp.
- Janzen, H. H. 2003. Agricultural soils: their place in the global carbon cycle. *In: soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses*. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Smith, S. (Ed.). Paris, France. 11-20 pp.
- Kuzyakov y Domanski, G. 2000. Carbon input by plants into the soil. *Review. J. Plant Nutrit. Soil Sci.* 163:421-431.
- Lal, R. 2000. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.* 71:145-191.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123:1-22.
- Liang, B. C.; Campbell, C. A.; McConkey, B. G.; Padbury, G. and Collas, P. 2003. Methodological options for soil carbon accounting resulting from adoption of no-till on the Canadian prairies: an example of empirical model. *In: soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses*. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Smith, S. (Ed.). Paris, France. 201-210 pp.
- Nieto, O. M.; Castro, J.; Fernández, E. and Smith, P. 2010. Simulation of soil organic carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use and Management*. 26:118-125.
- Núñez, S.; Martínez-Yrizar, A.; Búrquez, A. and García-Oliva, F. 2001. Carbon mineralization in the southern Sonoran Desert. *Acta Oecologica*. 22:269-276.
- Pérez, O. A.; Etchevers, J. D.; Navarro, G. H. y Nuñez, E. R. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en tepetates. *Agrociencia* 34:115-125.
- Post, W. M. and Kwon, K. C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6:317-327.
- Smith, S. 2003. *Soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses*. agriculture and agri-food Canada. Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris. 329 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2012. URL: <http://www.siap.gob.mx/>.