

Desempeño del modelo rothc-26.3 a nivel de parcela en México

Performance of the rothc-26.3 model at the plot level in Mexico

**Lucila González Molina^{1‡}, Jorge D. Etchevers Barra², Fernando Paz Pellat³,
Fernando Carrillo Anzures¹, Miguel Acosta Mireles¹ y Aurelio Báez Pérez¹**

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Los Reyes-Texcoco, Km 13.5 56250 Coatlinchán, Estado de México, México.

[‡]Autora responsable (gonzalez.lucila@ inifap.gob.mx)

² Edafología, ³ Hidrociencias, Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), C.E. Bajío. Km. 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de Allende s/n, Col. Roque. 38110 Celaya, Guanajuato, México.

RESUMEN

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), deben reportarse los almacenes y cambios del carbono orgánico del suelo (COS) en el tiempo. El modelo RothC-26.3 (RothC) es uno de los más usados en el mundo para estudiar la dinámica del C en diferentes sistemas. Se evaluó el desempeño del RothC en la simulación de los cambios del COS, a nivel de parcela, en experimentos de corta duración. Se evaluaron nueve sitios y los sistemas: agrícola con residuos vegetales (A+R), agrícola sin residuos (A-R), forestales (F), praderas (PR) y agostaderos (AGOS). Las parcelas experimentales se ubicaron en los estados de México, Tlaxcala, Michoacán, Guanajuato, Oaxaca, Jalisco y Nuevo León. El RothC se ejecutó (i) con el COS_{initial}, medido en cada punto de muestreo (*CIPUN) en parcelas de la Sierra Norte de Oaxaca y, (ii) con el COS_{initial} promedio medido por parcela (*CIPAR) en el resto de los sitios. Se midieron y estimaron los parámetros de entrada al modelo, como residuos vegetales y abonos orgánicos. El grado de asociación entre el COS medido y el simulado fue de 0.76 y hasta 1.0 en todos los sitios. La eficiencia del modelo (EF) varió entre 0.53 y 0.93, excepto en el Batán, donde se evaluaron sistemas de labranza (EF= -0.60). La r, en ambas formas de simulación, varió entre 0.63 y 0.97, excepto en AGOS; EF en los agrícolas fue de 0.48 a 0.84 y de 0.81 en F *CIPAR. La EF fue insatisfactoria obtenida para los AGOS (*CIPAR) y forestales y praderas (*CPUN). Considerando los resultados de los sitios y sistemas y, la forma de simulación *CIPAR, el modelo RothC se puede usar con buena aceptación para simular

los cambios de COS a nivel de parcela en los sistemas agrícolas y forestales, mediana en praderas y baja en agostaderos.

Palabras clave: *residuos vegetales; uso de suelo; sistemas de cultivo.*

SUMMARY

To comply with the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), it is necessary to report changes in soil organic carbon (SOC) stocks. The RothC-26.3 (RothC) model is one of the most used models worldwide to study C dynamics in different systems. This study evaluated the performance of RothC in simulating SOC stocks changes at the plot level in short-term experiments. Nine sites were assessed as well as five systems: agriculture with plant residues (A+R), agriculture without residues (A-R), forest (F), grassland (GL) and grazing commons (GRC). The experimental plots were located in the states of México, Tlaxcala, Michoacán, Guanajuato, Oaxaca, Jalisco and Nuevo León. RothC was run (i) with SOC_{initial} measured at each sampling point (*CIPUN) only in the plot in the Sierra Norte of Oaxaca and (ii) with average SOC_{initial} measured in each plot (*CIPAR) in the rest of the plots. The entry parameters of the model, as well as the plant residues and organic fertilizers, were measured and estimated. The degree of association r between measured and simulated SOC was in the range of 0.7 to 1.0 in all of the sites. Model efficiency (EF) was between 0.53 and 0.93, except at the Batán site where tillage systems were assessed. In the evaluation by system, in both forms

Como citar este artículo:

González Molina, L., J. D. Etchevers Barra, F. Paz Pellat, F. Carrillo Anzures, M. Acosta Mireles y A. Báez Pérez. 2016. Desempeño del modelo rothc-26.3 a nivel de parcela en México. *Terra Latinoamericana* 34: 357-366.

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

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 357-366.

of simulation, r was between 0.63 and 0.95, except in GRC. EF was 0.48 to 0.84 in A+R and A-R and 0.81 in F*CIPAR. The grazing commons are complex because of heterogeneity of vegetation, soil, climate variability and grazing. Considering the results in the study sites, RothC can be used acceptably in the simulation of SOC changes without modifying its internal parameters.

Index words: plant residues; land use; cropping systems.

INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) además de ser uno de los principales reservorios terrestres de carbono con 760 Pg (1 Pg = 1×10^{15} g) a un metro de profundidad (Eswaran *et al.*, 1993) tiene un efecto sobre la calidad del suelo y productividad de los sistemas agrícolas, también puede secuestrar CO₂ atmosférico (Farage *et al.*, 2007). Para predecir la dinámica de los cambios de COS (secuestro o pérdida) por diferentes esquemas de cambio de uso del suelo o prácticas de manejo en los sistemas agrícolas se han usado modelos (Lal, 2009). Aunque la modelación es una herramienta útil en la ciencia del suelo, el desempeño los modelos debe ser evaluado estadísticamente y debe documentarse (O'leary *et al.* 2016).

El RothC es un modelo ampliamente utilizado para modelar los cambios de COS, cuenta con un registro de más de 1300 usuarios en 80 países (Francaviglia *et al.*, 2012), es simple en su estructura y requiere pocos parámetros y datos de entrada (Coleman y Jenkinson, 1996). El desempeño de este modelo ha sido probado en experimentos de larga duración en diferentes ecosistemas (Smith *et al.*, 1997; Ludwig *et al.*, 2007); se ha usado en sistemas agrícolas, bosques y pastizales (Cerri *et al.*, 2007; Hillier *et al.*, 2009). Es uno de los pocos modelos que actualmente se usan a escala regional y nacional en estudios de la dinámica de C global y para reportar inventarios nacionales de almacenes de C ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNCC) (Richards, 2001; Falloon *et al.*, 2002; Milne *et al.*, 2007; Wesemael *et al.*, 2010).

La mayoría de los estudios en los que se usan modelos como: RothC, DNDC, CENTUR y DAISY para reportar el cambio de COS se han realizado en experimentos de larga duración (Smith *et al.*, 1997; Grant *et al.*, 2015). En el presente estudio, desarrollado en México, se emplean bases de datos de COS

compiladas en experimentos de corta duración. El trabajo que reportó mayor duración (25 años) fue el de Villa Diego, Guanajuato.

Se evaluó el desempeño del RothC en la simulación de los cambios del COS a nivel de parcela. Se evaluaron cuatro sistemas: agrícola, forestal, praderas y agostaderos, se seleccionaron nueve sitios ubicados en: Estado de México, Tlaxcala, Michoacán, Guanajuato, Oaxaca, Jalisco y Nuevo León. El modelo RothC se ejecutó en dos formas: (i) se usó el COS_{inicial} medido en cada punto de muestreo (*CIPUN) en algunos sitios de Oaxaca y (ii) el COS_{inicial} promedio medido por parcela (*CIPAR).

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los Sitios y Sistemas de Estudio

(1) El Batán, Estado de México, estación experimental del Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT) cuya información de COS corresponde a sistemas de manejo agrícola de 16 parcelas. Se consideró: (i) tipo de labranza, cero (LZ) o tradicional (LC); (ii) manejo de residuos, con (+R) o sin residuos (-R); (iii) monocultivo maíz (m) o trigo (t); y (iv) rotación trigo-maíz y maíz-trigo, lo que hizo un total de 16 tratamientos. Se evaluó el periodo 1996-2006 (Fuentes *et al.*, 2009).

(2) Linares, Nuevo León, cuya información del COS proviene de 10 parcelas con sistemas agrícolas con cultivos de maíz y sorgo; 3 parcelas con praderas con zacate buffel (*Pennisetum ciliare* L.) y 17 parcelas de agostadero que son sistemas de conversión de vegetación primaria o secundaria a sistemas de introducción de ganado y, matorrales espinosos tamaulipecos que representó un sitio conservado. Algunas especies que dominan este sitio son arbustos espinosos (*Acacia farnesiana* L.) Willd y *Acacia greggii* Gray) y árboles (*Prosopis laegeviata* Humb y Bonpl. Ex Willd) (Reid *et al.*, 1990). El periodo de estudio fue de 1993 a 1999 (Pando *et al.*, 2004).

(3) Sierra Norte de Oaxaca en tres regiones: Mazateca (2 sitios), Cuicateca (2 sitios) y Mixe (1 sitio). La información de COS se obtuvo de sistemas agrícolas, café (CA) (*Coffea arabica* L.) en las regiones Mazateca y Mixe. En la región Cuicateca se consideraron sitios con maíz (*Zea mays* L.) con labranza tradicional (LT) o de conservación (LC) y con maíz intercalado con hileras de durazno (*Prunus persica* L.)

o café, que forman barreras (BMV) o terrazas de muro vivo (MIAF). En el MIAF al pie de la hilera de los árboles frutales se colocaron ramas y los restos de las podas de los árboles, los cuales actúan como filtro de los escurrimientos. En el resto de la parcela (donde no hay árboles) se maneja con LT o LC. También se obtuvo información del COS de sistemas forestales. En la región Mazateca se consideraron sitios de vegetación secundaria como el bosque de liquidámbar (BL) (*Liquidambar* sp) y el bosque de aile (BA) (*Alnus* sp.). En la región Mixe se seleccionaron acahuales de 6 años de edad (ACA6). Adicionalmente se consideraron las praderas en las regiones Cuicateca y Mazateca (Cortés *et al.*, 2005). Algunas especies importantes en estos acahuales son: *Clethra hartwegii* Britt (Clethra), *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell (Rapanea), *Alnus glabrata* Fernald (Alnus), *Liquidambar macrophylla* Oerst (Liquidambar) (Acosta 2003¹). Los sitios de las tres regiones de Oaxaca se evaluaron de 2000-2004 (Acosta, 2003¹; González *et al.*, 2008).

(4) Atécuaro, Michoacán, donde se consideró un Andosol y un Acrisol. En el primer caso se integraron: 10 sitios forestales (B1-B10) constituidos principalmente por dos especies de pino y siete de encino, un sitio de pastoreo (P1) y otro agrícola (C1). En el segundo se incluyeron varios sistemas: (i) un tradicional sin descanso (Tt) con un cultivo anual usando un bajo nivel de fertilizantes químicos; (ii) un tradicional mejorado (TM) con cultivos asociados y aporte de RV y otro con uso moderado de agroquímicos; (iii) uno sitio con manejo orgánico (To), con cultivos asociados y abonos orgánicos y, (iv) un sistema de año y vez (Tav) que consiste en un barbecho anual con pastoreo de bovinos, seguido de un año de cultivo (Covaleda, 2008²).

(5) Santiago Tlalpan, Tlaxcala, donde la información del COS provino de: (i) sistemas agrícolas tradicionales (Tt) con un cultivo anual y con dosis bajas de fertilizantes químicos; (ii) sistemas tradicionales mejorados (TM), con cultivos asociados, aporte de RV y mayor aporte de agroquímicos; (iii) un sistema orgánico (To), con empleo de cultivos asociados y abonos orgánicos; (iv) tepetate roturado con manejo tradicional (Rt) y, (v) tepetate roturado con manejo orgánico (Ro) (Covaleda, 2008²).

(6) Zaachila, Oaxaca, donde se consideraron los siguientes sistemas: (i) tradicional con maíz intercalado con calabaza (TMC), cuya distancia entre plantas fue de 0.75 m y 1.5 m, respectivamente; (ii) multiestrato

(MUL) con higuerilla, calabaza y maíz; donde el arreglo de las hileras fue el siguiente: (a) maíz, (b) calabaza, (c) maíz e (d) higuerilla y así sucesivamente, la distancia entre plantas de higuerilla fue de 1.5 m, de maíz 0.75 y de calabaza 1.5; (iii) monocultivo de higuerilla con 24 meses de establecido (HIG). Para evaluar los cambios del COS, los tratamientos se compararon con una parcela con más de 30 años de uso tradicional (González *et al.*, 2012).

(7) Localidades de la Cuenca Cuitzeo con suelos vertisoles: Indaparapeo, Álvaro Obregón, Queréndaro I y Queréndaro II Michoacán (Báez *et al.*, 2011).

(8) Localidad de Villa Diego y la estación Experimental del Bajío en Celaya, en Guanajuato, con labranza de conservación (Báez *et al.*, 2011).

En las localidades de Michoacán y Guanajuato, los cultivos fueron maíz, sorgo, trigo y leguminosas (haba) y se establecieron bajo labranza de conservación y en rotaciones gramínea - gramínea y gramínea-leguminosas. En estas localidades el periodo de evaluación fue de cuatro años, excepto en Villa Diego donde el periodo fue de 25 años (Báez *et al.*, 2011).

(9) La Huerta, Jalisco con plantaciones de especies forestales tropicales con manejo y sin manejo de hierbas y arbustos: rosa morada (*Tabebuia rosea* (Bertol) DC), Teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* Roxb) y parota (*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb). Se evaluaron plantaciones de quince años de establecidas (Buendía, 2011³).

Las características principales de los sitios y sistemas de estudio se encuentran en el Cuadro 1 y 2.

Modelo RothC

El modelo RothC-26.3, tiene su origen en las primeras versiones del RothC desarrolladas por Jenkinson y Rayner (1977). Éste, divide al COS en cuatro compartimentos activos y uno pasivo según su velocidad de descomposición: (1) material vegetal de fácil descomposición (MVD); (2) material vegetal resistente (MVR); (3) biomasa microbiana (BIO); (4) materia orgánica humificada (HUM) y (5) materia orgánica inerte (MOI). El COS de los compartimentos MVD y MVR se descompone para formar otros, BIO, HUM además de CO₂ una parte del cual se acumula en la MOI. El contenido de arcilla determina la proporción de COS que pasa a CO₂ o a BIO+HUM (Coleman y Jenkinson, 1996). El COS de los compartimentos

¹ Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para estimar los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgrados. Programa Forestal, Montecillo. México.

² Covaleda O., S. 2008. Influencia de diferentes impactos antrópicos en la dinámica del carbono y la fertilidad de los suelos volcánicos mexicanos implicaciones sobre el secuestro de carbono. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica superior de ingenierías agrarias. Departamento de Ciencias Forestales. Palencia, España. 352 p.

³ Buendía C., R. 2011. Estimación de almacenes de carbono en el suelo de cuatro especies tropicales en una plantación forestal en la Huerta, Jalisco. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 67 p.

Cuadro 1. Características generales de los sitios y sistemas de estudio.

Sitios	Sistemas	Latitud	Longitud	Altitud	TMA	PMA
				m	°C	mm
Batán, Méx.	Agrícola	19° 31' N	98° 50' O	2259	15	634
Linares N. L.	Matorral espinoso tamaulipeco, agostadero, praderas, y agrícola	24° 47' N	99° 32' O	350	19	763
Cuicateca, Oax.	Agrícola, forestal, praderas	17° 51' N	96° 51' O	1700 y 2200	14	1038
Mazateca, Oax.	Agrícola, forestal, praderas	18° 09' N	96° 54' O	1380 y 1910	14	1440
Mixe, Oax.	Agrícola y forestal	17° 01' N	96° 53' O	1500 y 2000	16	2583
Atécuaro, Mich.	Agrícola y forestal	19° 30' N	101° 09' O	2048	16	824
Tlaxcala	Agrícola	19° 28' N	98° 19' O	2540	14	769
Zaachila, Oax.	Agrícola y forestal	16° 54' N	96° 46' O	1940	20	744
La Huerta, Jal.	Forestal	19° 31' N	134° 32' O	298	23	1285
Localidades, Mich. [†]	Agrícola	19° 59' N	101° 00' W	1840	19	637
Localidades, Gto. [†]	Agrícola	20° 31' y 20° 23' N	100° 48' y 101° 11' O	1749	19	631

[†] Localidades con suelos vertisoles. TMA = temperatura media anual; PMA = precipitación media anual.

activos se descomponen siguiendo una cinética de primer orden, y cada uno presenta una tasa constante (*k*) de descomposición: MVD (10); MVR (0.3); BIO (0.66) y HUM (0.02). La *k* es modificada por los factores: humedad del suelo, temperatura y cobertura vegetal. La MOI ($Mg\ ha^{-1}$) se obtiene de la ecuación de Falloon *et al.* (1998): $MOI\ (Mg\ ha^{-1}) = 0.049 \times COT^{1.139}$ (Ecuación 1). Los parámetros de entrada incluyen temperatura del aire (°C) (TPM), precipitación (mm) (PPM) y evaporación (mm) promedio mensual (EPM), contenido de arcilla, profundidad del muestreo del suelo,

entrada mensual de C de residuos vegetales (RV) y abonos orgánicos (AO). Además, información mensual de la cobertura del suelo, si el suelo está desnudo o con cobertura vegetal y la relación MVD/MVR. La relación MVD/MVR la que recomienda el modelo RothC por defecto, su valor es de 0.25 para la vegetación forestal (por ejemplo, si 20% de los restos vegetales son MVD y el 80% de MVR), se considera 1.44 para los cultivos y pastos con manejo (donde 59% son MVD y 41% MVR) y es de 0.67 para los pastos no explotados y matorrales (incluyendo sabana) (Coleman y Jenkinson, 1996).

Cuadro 2. Características edáficas de las parcelas en los sitios y sistemas de estudio.

Sitios	Suelo [†]	Profundidad muestreo	Arcilla	
			cm	%
Batán, Méx.	Phaeozem	20		38
Linares N. L.	Vertisol y Regosol	30		43
Cuicateca, Oax.	Ferralsol	30		30
Mazateca, Oax.	Ferralsol	30		35
Mixe, Oax.	Ferralsol	30		37
Atécuaro, Mich.	Andosol	10		27
Atécuaro, Mich.	Acrisol	10		67
Tlaxcala	Tepetate	20		33
Zaachila, Oaxaca	Regosol eútrico	40		13
La Huerta, Jalisco	Feozem háplico	30		32
Localidades, Michoacán y Guanajuato	Vertisol	30		46 y 61

[†] (FAO-ISRIC-SICS, 1998).

Simulación de los Cambios de COS con el Modelo RothC

La simulación con el modelo RothC se desarrolló en dos etapas: inicialización y simulación. En la etapa inicialización se supuso, de acuerdo a la propuesta de Jenkinson *et al.* (1999) que en los sistemas el contenido de COS medido alcanzó la condición de equilibrio. El modelo RothC se ejecutó de manera inversa para obtener la cantidad de C que entraba anualmente al suelo para mantener el contenido específico de COS_{inicial} medido en el experimento. La condición de equilibrio se logró al ejecutar el RothC para un periodo de 10 000 años continuos, durante este proceso el RothC determinó la distribución de C en los compartimentos activos. En la etapa de simulación, el modelo se ejecutó con los contenidos C de cada compartimento, la información de clima, suelo, relación MVD/MVR y la información mensual del escenario de manejo que incluye: la entrada de C al suelo proveniente de RV y abono orgánico, así como la cobertura del suelo. En los meses con cobertura la distribución de los RV fue uniforme en el suelo. Esto se consideró porque Coleman y Jenkinson (1996) indican que los cálculos de COS son afectados por la forma en que las entradas se distribuyen en el suelo. Al inicio de las simulaciones de cada experimento se hicieron pruebas considerando el C de RV y de abono orgánico en la entrada del modelo debido a que ambos son parámetros importantes en la calibración del modelo (Guo *et al.*, 2007).

Condiciones de Simulación

En las parcelas se simuló el cambio de COS con el modelo RothC en dos formas: (i) con el COS_{inicial} medido en cada punto de muestreo (*CIPUN) y (ii) con el COS_{inicial} promedio medido por parcela (*CIPAR). El primer caso se usó la información de las parcelas de la Sierra Norte de Oaxaca y en el segundo la información obtenida para el resto de las parcelas.

Datos de Entrada

Los datos climáticos obtenidos en los sitios fueron: TPM, PPM y EPM correspondientes al periodo 1951-2012 y se obtuvieron de la base de datos Extractor Rápido de Información Climatológica (IMTA, 2000), de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2014) y de las estaciones climáticas de campos experimentales.

Los datos del suelo se obtuvieron directamente de los sistemas. La MOI se obtuvo mediante la Ecuación 1, la relación MVD/MVR fue la recomendada por el modelo RothC por defecto. En la etapa de predicción, el modelo se ejecutó considerando los contenidos C de cada compartimento, la información edafoclimática, la relación MVD/MVR y la información mensual del escenario de manejo que incluye: la entrada de C ($Mg\ ha^{-1}$) de RV y de abono orgánico, así como la cobertura del suelo. La distribución de los RV fue uniforme en los meses donde el suelo presentó cobertura. De acuerdo con Coleman y Jenkinson (1996) la forma en que las entradas son distribuidas tienen un bajo efecto sobre los cálculos de COS. Ejemplo de la parametrización de RV y de la información necesaria para hacer las simulaciones para las especies tropicales de la Huerta, Jalisco se presentan en los Cuadros 3 y 4, respectivamente. Otro ejemplo de esta información para los sistemas bajo labranza de conservación en localidades de Michoacán y Guanajuato se indica en los Cuadros 5 y 6.

Criterios de Evaluación del Desempeño del RothC

Para su análisis, los pares de datos de COS observado y predicho de las parcelas se agruparon por sistemas en ambas formas de simulación *CIPUN y *CIPAR. Para el análisis de los sitios se usaron las simulaciones *CIPAR. Los sistemas se agruparon en: (1) agrícolas adicionados con residuos (A+R), (2) agrícolas sin adición de residuos (A-R), (2) forestales (F), (3) praderas (PR), y (3) agostaderos (AG).

En la evaluación del desempeño del modelo RothC, se utilizaron los siguientes criterios: la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCME) (%), el error relativo (ER) y la eficiencia del modelo (EF) expresada por (Smith *et al.*, 1997) además el coeficiente de correlación (r) y el parámetro b de la ecuación de regresión lineal simple con la ordenada al origen. El valor de RCME va de 0 a ∞ , ER de $-\infty$ a ∞ , r de 0 a 1 y EF de $-\infty$ a 1. En una prueba ideal RCME y ER son iguales a 0 y r, b y la EF son iguales a 1.

RESULTADOS

Desempeño del RothC en los Sitios de Estudio

Los valores de r estuvieron en el rango de 0.7 a 1.0 e indicaron alta asociación de COS medido y simulado

Cuadro 3. Entrada de carbono al suelo de residuos vegetales medidos de especies forestales tropicales de la Huerta, Jalisco.

Componente/Sistema	Con manejo			Sin manejo	
	Melina	Teca	Rosa morada	Parota	Rosa morada
----- Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ -----					
Hojarasca	5.8	3.1	2.9	6.4	3.5
Hierbas y arbustos	0.0	0.0	0.0	2.1	1.9
Raíces total	2.0	2.1	2.0	2.1	2.4
40% raíces	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9
Residuos vegetales	6.6	3.9	3.7	9.3	6.3

en los sitios de clima templado (Batan, Sierra Norte de Oaxaca, Santiago T. y Atécuaro) y clima cálido (Linares, Zaachila, La Huerta y las Localidades de Michoacán y Guanajuato). La RCME tuvo valores en un intervalo de 10 al 37%, los de mayor magnitud correspondieron a los sitios en la Sierra Norte de Oaxaca y en Linares Nuevo León. El ER indicó un sesgo negativo entre valores medidos y simulados en las parcelas de Santiago Tlalpan y el Batán; en tanto que el sesgo fue positivo (5-28%) en las parcelas de las localidades de Michoacán, Guanajuato y la Sierra Norte de Oaxaca. Con base al parámetro “b”, se considera que el modelo subestimo los valores medidos entre 8 y 31%, en todos los sitios, excepto en Santiago Tlalpan. Si se considera el criterio de Ludwig *et al.* (2010), la eficiencia del

modelo RothC en la simulación de los cambios de COS fue insatisfactoria ($EF \leq 0$) en las parcelas del Batán; pero satisfactoria ($0 < EF < 0.7$) en la Sierra Norte de Oaxaca y La Huerta, Jalisco; y buena ($EF \geq 0.7$) en Linares Nuevo León, Atécuaro, Michoacán, Zachila, Oaxaca, Santiago Tlalpan, Tlaxcala, y en las localidades en Guanajuato y Michoacán con suelo vertisol (Cuadro 7).

Los valores de RCME están dentro de los valores reportados por Cerri *et al.* (2007) ($RMSE=6$ a 73%) en condiciones tropicales del Amazonas en Brasil (22 a 27 °C) donde se evaluaron 11 cronosecuencias de cambio de uso de bosque a pastizal. Shirato *et al.* (2005) reportaron valores de RCME entre 20 y 60% en suelos de clima tropical de Tailandia (27 y 28 °C) en parcelas

Cuadro 4. Parámetros para la inicialización y elaboración de escenarios para ejecutar el RothC, en plantaciones forestales tropicales de la Huerta, Jalisco.

Parámetro/Sistema	Con manejo			Sin manejo	
	Melina	Teca	Rosa morada	Parota	Rosa morada
Inicialización₀					
Arcilla (%)	32	24	31	40	31
CVS [†] (meses)	8	8	8	8	8
RV _{RothC} (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
MOI (Mg ha ⁻¹)	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41
MVD/MVR	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
Escenarios					
RVmedido (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	6.6	3.9	3.7	9.3	6.3
MVD/MVR	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
CVS (meses)	12	12	12	12	12
MOI	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41
MVD/MVR	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

[†] CVS = cobertura vegetal del suelo, RV_{RothC} = entrada promedio de C de residuos vegetales (Mg ha⁻¹) inicial calculado por RothC; RV = entrada promedio C de residuos vegetales medidos; MOI = materia orgánica inerte; MVD/MVR = relación entre el material vegetal de fácil descomposición y el material vegetal de difícil descomposición.

Cuadro 5. Información necesaria para calcular la entrada de carbono al suelo de residuos de cultivo en sistemas bajo labranza de conservación en localidades de Michoacán y Guanajuato.

Localidad/Variable		IC [†]	Y	BT	BA	Rizodeposición	RV
			- - - - Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹ - - - -			BT*0.18	Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹
Indaparapeo y Álvaro Obregón	Maíz	0.5	5.4	10.1	4.7	1.8	6.5
	Cártamo	0.2	3.1	3.1	2.5	0.6	3.1
	Trigo	0.4	1.2	7.6	4.5	1.4	5.9
	Frijol	0.8	0.5	1.5	0.4	0.3	0.7
	Haba	0.3	0.7	1.4	0.9	0.2	1.1
	Garbanzo	0.7	2.6	1.0	0.3	0.2	0.5
Queréndaro I	Sorgo	0.4	5.0	7.0	4.4	1.3	5.7
	Maíz	0.8	3.1	6.4	1.4	1.1	2.5
	Trigo	0.7	5.4	4.4	1.4	0.8	2.2
Queréndaro II	Maíz	0.6	3.1	9.4	4.0	1.7	5.7
	Trigo	0.4	3.3	7.8	4.7	1.4	6.1
Celaya	Maíz	0.4	2.2	9.2	5.9	1.7	7.6
	Trigo	0.3	2.9	6.7	4.5	1.2	5.7
Villa Diego	Maíz	0.5	1.5	6.1	3.2	1.1	4.3
	Trigo	0.5	5.4	2.9	1.4	0.5	1.9

[†] IC = índice de cosecha; Y = rendimiento; BT = biomasa total; BA = biomasa aérea medida; RV = residuos vegetales.

cultivadas con maíz y cassava. Para condiciones templadas en Australia (19 °C), Senapi *et al.* (2014) obtuvieron valores de RCME entre 6 y 15% en suelos con algodón bajo diferentes sistemas de labranza. Los valores altos obtenidos en la Sierra Norte de Oaxaca (37%) y Linares Nuevo León (32%) pueden estar asociados a errores de precisión de los datos analíticos, que considera errores de medición en laboratorio y de muestreo. Adicionalmente se debe considerar la variabilidad intrínseca del COS (Guo *et al.*, 2007). En el caso de Oaxaca, el C asociado a la fracción

mineral fue sobreestimado en un 17%, (González *et al.*, 2008) debido a la presencia de residuos orgánicos (raíces) que fueron removidos después de una segunda limpieza. En Linares, donde se evaluaron parcelas con agostaderos, los errores en los resultados se asociaron a la complejidad de este sistema donde son frecuentes los disturbios por sobre-pastoreo, erosión, invasión de plantas arbustivas, plantas tóxicas, roedores y fuego; además de la heterogeneidad de la vegetación, y amplia variabilidad de clima y suelo (Melgoza, 2006).

En general la EF del modelo fue calificada como

Cuadro 6. Resumen de la información necesaria para simular los cambios de COS sistemas bajo labranza de conservación en localidades de Michoacán y Guanajuato.

Localidad/Variable#	COS [†] inicial	MOI	RV_RothC	Arcilla	CVS
	- - - - - Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ - - - - -			%	Meses
Indaparapeo	73	6.4	3.94	52	8
Álvaro Obregón	80	7.2	4.34	50	12
Queréndaro I	87	7.9	4.72	50	12
Queréndaro III	87	7.9	5.15	34	12
Celaya	31	2.4	1.33	64	12
Villa Diego	44	3.6	1.60	58	12

[†] COS = carbon orgánico del suelo; MOI = materia orgánica inerte; RV_RothC = residuos vegetales obtenidos al ejecutar el RothC; CVS = cobertura vegetal del suelo.

Cuadro 7. Estadísticos que describen el desempeño del RothC en experimentos de corta duración en sitios experimentales de México.

Sitios/Estadísticos	n	r	RCME	EF	ER	b
El Batán, Méx.	48	0.76	0.19	-0.60	0.05	0.97
Linares, N. L.	61	0.88	0.32	0.76	-0.03	0.77
S. Tlalpan Tlax.	15	0.98	0.10	0.93	-0.10	1.05
Atecuaro, Mich.	24	0.95	0.11	0.89	0.09	0.92
Sierra Norte, Oax.	27	0.90	0.37	0.53	0.28	0.69
Zachila, Oax.	6	1.00	0.11	0.89	0.05	0.92
La Huerta, Jal.	5	0.77	0.10	0.56	0.10	0.98
Localidades de Michoacán y Guanajuato	16	0.87	0.09	0.84	0.05	0.96

n = número de pares de datos de COS simulados y observados; r = coeficiente de correlación; RCME = raíz del cuadrado medio del error; EF = eficiencia del modelo; b = parámetro de la ecuación de regresión lineal simple.

satisfactoria y buena con excepción del Batán donde se evaluaron diversos sistemas de labranza. Senapi *et al.* (2014) reportaron mejor desempeño del modelo bajo labranza mínima en relación a labranza convencional intensiva en condiciones semiáridas subtropicales de Australia. En contraste Liu *et al.* (2009) quienes evaluaron sistemas donde se mantuvieron residuos sobre el suelo, encontraron un mejor desempeño del modelo en sistemas con labranza cero y en tratamientos donde los RV fueron quemados. En ambos casos las simulaciones sobreestimaron en la modelación del C en los sistemas de labranza, por lo que se deben considerar factores de pérdida de COS (Senapi *et al.*, 2014) y de RV de la superficie, estos últimos se pueden perder antes de entrar al suelo para formar parte del COS (Liu *et al.*, 2009).

Desempeño del RothC en Sistemas

En las simulaciones puntuales (*CIPUN) y por parcela (*CIPAR) que agrupada sistemas agrícolas con (A+R) y sin (A-R) residuos vegetales sistemas

forestales (F), praderas (PR) y agostaderos (AGOS) hubo asociación de COS medido y simulado con una r en el intervalo de 0.63 a 0.97, con excepción del sistema de AGO (r = 0.24). La RCME presentó valores en el intervalo de 18 a 47%, los de mayor magnitud correspondieron a los sistemas F (*CIPUN). El ER indicó un sesgo negativo entre valores medidos y simulados en los sistemas A+R y AGOS de *CIPAR. En general para las *CIPUN se obtuvieron valores mayores debido a que no hubo efecto del valor promedio como fue el caso de las *CIPAR. Al considerar el criterio de Ludwig *et al.* (2010) en la evaluación de la EF, la modelación fue insatisfactoria ($EF \leq 0$) en los sistemas F y PR (*CIPUN) y en los AGO *CIPAR; satisfactoria ($0 < EF < 0.7$) en A+G y A-G *CIPUN; y buena ($EF \geq 0.7$) en los sistemas F, A+G y A-G *CIPAR. De acuerdo con el parámetro “b” de la ecuación de regresión lineal, ambas simulaciones del modelo RothC indicaron una subestimación de las mediciones de COS de 14 a 31% (Cuadros 8 y 9).

Cuadro 9. Estadísticos que describen desempeño del RothC en experimentos de corta duración en sistemas de México con simulaciones promedio de COS.

Sistemas/Estadísticos	n	r	SRME	EF	ER	b
Agrícolas + residuos	71	0.95	0.36	0.69	-0.01	0.87
Agrícolas - residuos	65	0.97	0.43	0.84	0.12	0.74
Forestales	24	0.93	0.31	0.81	0.10	0.82
Agostaderos	34	0.24	0.40	-0.16	-0.08	0.86
Praderas	9	0.81	0.18	0.31	0.12	0.86

n = número de pares de datos de COS simulados y observados; r = coeficiente de correlación; RCME = raíz del cuadrado medio del error; EF = eficiencia del modelo; b = parámetro de la ecuación de regresión lineal simple.

Cuadro 8. Estadísticos que describen desempeño del RothC con simulaciones puntuales de COS en sistemas de Oaxaca.

Sistemas/Estadísticos	n	r	SRME	EF	ER	b
Agrícolas + residuos	122	0.86	0.25	0.67	0.08	0.86
Agrícolas - residuos	126	0.86	0.36	0.48	0.19	0.73
Forestales	76	0.84	0.47	-1.22	0.28	0.69
Praderas	19	0.63	0.24	-0.89	0.18	0.81

n = número de pares de datos de COS simulados y observados; r = coeficiente de correlación; RCME = raíz del cuadrado medio del error; EF = eficiencia del modelo; b = parámetro de la ecuación de regresión lineal simple.

De acuerdo con el análisis del desempeño del modelo, la EF insatisfactoria de los sistemas F y PR *CIPUN puede explicarse por la alta variabilidad del (CV) (25- 68%) reportada por González *et al.* (2010) y Vergara *et al.* (2014) para las mismas parcelas. En el caso de los AGOS, como se ha mencionado antes, en México estos sistemas son complejos debido a que se puede presentar una mayor variabilidad espacial de COS producto de la entrada residuos, abono orgánico y pastoreo, los que varía dependiendo del periodo de lluvias (Melgoza, 2006).

En ambas formas de simulación la EF varió de buena a satisfactoria en los sistemas agrícolas (A+R y A-R), de insatisfactoria a satisfactoria en los forestales y praderas y fue insatisfactoria en AGOS. Esto se explica porque el RothC se desarrolló y parametrizó para modelar cambios de COS en cultivos en experimentos de larga duración (Smith *et al.*, 2000). Sin embargo, aunque en años más recientes se han modelado con RothC cambios de COS en bosques y pastizales (Coleman *et al.*, 1997; Falloon *et al.*, 1998; Falloon y Smith, 2002, entre otros), así como también en sistemas agroforestales (Kaonga y Coleman, 2008) para agostaderos no se ha reportado su aplicación.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de desempeño del modelo RothC en la simulación de los cambios de COS en sitios y sistemas a nivel de parcela, en el caso de los sitios la EF del modelo fue calificada como satisfactoria y buena con excepción del Batán y, en los sistemas sin considerar las simulaciones puntuales de los sitios de la Sierra norte de Oaxaca, la EF varió de buena a satisfactoria a buena en los sistemas agrícolas, forestales y praderas y fue insatisfactoria en AGOS. En ambos casos, las simulaciones indicaron que es necesario uniformizar y evitar errores asociados a las bases de datos (analíticos y de muestreo) y que falla en la modelación de sistemas más heterogéneos con mayor variabilidad del COS como sucede en los agostaderos.

LITERATURA CITADA

Báez, P. A. E., E. Huerta M., J. Velázquez G. y M. A. Bautista C. 2011. Acumulación y flujo de carbono en vertisoles cultivados en labranza de conservación. pp. 2004-201. In: F. Paz y R. M. Cuevas (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Síntesis a 2011 del Programa Mexicano del Carbono. Instituto Nacional de Ecología. México. D. F.

- Cerri, C. E. P., M. Easter, K. Paustian, K. Killian, K. Coleman, M. Bernoux, P. Falloon, D. S. Powson, N. Batjes, E. Milne, and C. C. Carlos. 2007. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122: 46-57.
- CNA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2011. Estación: Normales Climatológicas 1971-2000. <<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/oax/NORMAL20209.TXT>>. (Consulta: enero 4, 2011).
- Coleman, K. and D. S Jenkinson. 1996. RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. pp. 237–246. In: D. S. Powson, P. Smith, and J. U. Smith (eds.). Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets. NATO ASI Series I, Volume 38 Springer-Verlag, Berlin.
- Coleman, K., D. S Jenkinson, G. J. Crocker, P. R. Grace, J. Klír, M. Korschens, P. R. Poulton, and D. D. Richter. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma* 81: 29-44.
- Cortés, J. I., A. Turrent, P. Díaz, E. Hernández, R. Mendoza y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas. Colegio de Postgraduados. México.
- Eswaran, H., E. Van Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:192-194.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998. World reference base for soil resources. World soil resources report, 84. Rome.
- Falloon, P., P. Smith, K. Coleman, and S. Marshall. 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.
- Falloon, P. and P. Smith. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use Manage.* 18: 101-111.
- Farage, P. K., J. Ardo, L. Olsson, E. A. Rienzi, A. S. Ball, and J. N. Pretty. 2007. The potential for soil carbon sequestration in the tropic dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil Tillage Res.* 94: 457-472.
- Francaviglia, R., K. Coleman, A. P. Whitmore, L. Doro, G. Urracci, M. Rubino, and L. Ledda. 2012. Changes in soil organic carbon and climate change – Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agric. Syst.* 112: 48-64
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. De León, C. Hidalgo, K. D. Sayre, J. Etchevers, and L. Dendooven. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* 30: 228-237.
- González, M. L., J. D. Etchevers B. y C. Hidalgo M. 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42: 741-751.
- González, M. L., J. Etchevers B., J. M. González C., and F. Paz P. 2010. Soil organic changes at the plot level in hillside Systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139: 508-515. doi:10.1016/j.agee.2010.09.010
- González, M., L. E. del C. Moreno P., L. R. Krishnamurty, A. Baéz P. y M. M. Acosta. 2012. Simulación de los cambios de carbono orgánico del suelo en sistema de cultivo con higuerilla por el modelo RothC. *Pesquisa Agropec. Brasil.* 47: 1647-1654.

- Grant, B. B., W. N. Smith, C. A. Campbell, R. L. Desjardins, R. L. Lemke, R. Kröbel, B. G. McConkey, E. G. Smith, and G. P. Lafond. 2015. Comparison of DayCent and DNDC Models: Case studies using data from long-term experiments on the Canadian prairies. pp. 21-57. In: S. Del Grosso, W. Parton, and L. Ahuja (eds.). Synthesis and modeling of greenhouse gas emissions and carbon storage in agricultural and forest systems to guide mitigation and adaptation. Advances in Agricultural Systems Modeling, Volume 6. Madison, WI, USA. doi:10.2134/advagricsystmodel6.2013.0035.
- Guo, L., P. Falloon, K. Coleman, B. Zhou, Y. Li, E. Lin, and F. Zhang. 2007. Application of the RothC model to synthesis and modeling of greenhouse gas emissions and carbon storage in agricultural and forest systems to guide mitigation and adaptation to the results of long-term experiments on typical upland soils in northern China. *Soil Use Manage.* 23: 63-70.
- Hillier, J., C. Whittaker, G. Dailey, M. Aylott, E. Casella, G. M. Richter, A. Riche, R. Murphy, G. Taylor, and P. Smith. 2009. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: Integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses. *Bioenergy* 1: 267-281. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01021.x>.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Extractor rápido de información climatológica, ERIC-2. Disco compacto. México.
- Jenkinson, D. S., J. Meredith, J. I. Kinyamario, G. P. Warren, M. T. H. Wong, D. D. Harkness, R. Bol and K. Coleman. 1999. Estimating net primary production from measurements made on soil organic matter. *Ecology* 80: 2762-2773.
- Jenkinson, D. S. and H. J. Rayner. 1997. The turnover of soil organic matter in some of Rothamsted classical experiments. *Soil Science*. 125: 298-305. doi: 10.1097/00010694-197705000-00005.
- Kaonga, M. L. and K. Coleman. 2008. Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in eastern Zambia using the RothC-26.3 model. *For. Ecol. Manage.* 256: 1160-1166.
- Ludwig, B., E. Schulz, I. Merbach, J. Rethemeyer, and H. Flessa. 2007. Predictive modelling of the C dynamics for eight variants of the long-term static fertilization experiment in Bad Lauchstädt using the Rothamsted Carbon Model. *Eur. J. Soil Sci.* 58:1155-1163.
- Ludwig, B., H. Kelin, N. Lingan, and L. Xuejun. 2010. Modelling the dynamics of organic carbon in fertilization and tillage experiments in the North China plain using the Rothamsted carbon model-initialization and calculation of C inputs. *Plant Soil* 332: 193-206.
- Lal, R. 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.* 60: 158-169.
- Liu, D. L., K. Y. Chan, and M. K. Conyersi. 2009. Simulation of soil organic carbon under different tillage and stubble management practices using the Rothamsted carbon model. *Soil Tillage Res.* 1: 65-73. doi:10.1016/j.still.2008.12.011
- Milne, E. R., A. L. Adamat, N. H. Batjes, M. T. Bhattacharyya, C. C. Cerri, C. E. P. Cerri, K. Coleman, M. Easter, M. Easter, P. Falloon, C. Feller, P. Gicheru, P. Kamoni, K. Killian, D. K. Pal, K. Paustian, D. S. Powlson, Z. Rawajfih, M. Sessay, S. Williams, and S. Wokabi. 2007. National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122: 3-12.
- Melgoza-Castillo, A. 2006. Current situation of rangelands in Mexico. pp. 85-86. In: X. Basurto and D. Hadley (eds.). Grasslands ecosystems, endangered species, and sustainable ranching in the Mexico-U.S. borderlands: Conference proceedings. RMRS-P-40. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA.
- O'Leary, G., L. D. Li, Y. Ma, F. Y. Li, M. McCaskill, M. Conyers, R. Dalal, S. Reeves, K. Page, Y.P. Dang, and F. Robertson. 2016. Modelling soil carbon 1. Performance of APSIM crop and pasture modules against long-term experimental data. *Geoderma* 264: 227-237.
- Pando M., M., E. Jurado, M. Manzano y E. Estrada. 2004. The influence of land use on desertification processes. *J. Range Manage.* 57: 320-324.
- Reid, N., J. Marroquin, and O. Beyer-Munzel. 1990. Utilization of shrubs and trees for browse fuelwood and timber in the Tamaulipan thornscrub, northeastern México. *For. Ecol. Manage.* 36: 61-79.
- Richards, G. P. 2001. The FullCam carbon accounting model: Development calibration and implementation for the national carbon accounting system. Technical report 28 of the Australian Greenhouse Office, 60 pp
- Senapati, N., N. R. Hulugalle, P. Smith, B. R. Wilson, J. B. Yeluripati, H. Daniel, S. Ghosh, and P. Lockwood. 2014. Modelling soil organic carbon storage with RothC in irrigated Vertisols under cotton cropping systems in the sub-tropics. *Soil Tillage Res.* 143: 18-49.
- Shirato, Y., K. Paisancharoen, P. Sangtong, C. Nakviro, M. Yokozawa, and N. Matsumoto. 2005. Testing the Rothamsted carbon model against data from long-term experiments on upland soils in Thailand. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 179-188.
- Smith, P., J. U Smith, D. S. Powlson, W. B. McGill, J. R. M. Arah, O. G. Chertov, K. Coleman, U. Franjo, S. Frolik, D. S. Jenkinson, L. S. Jensen, R. H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A. S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Muller, W. J. Parton, J. H. M. Thornle, and A. P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven longterm experiments. *Geoderma* 81: 153-225.
- Vergara, S. M. A., J. D. Etchevers y M. Vargas. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana* 22: 359-367.
- Wesemael, B., K. Paustian, J. Meersmans, E. Goidts, G. Barancikova, and M. Easter. 2010. Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks. *PNAS* 107: 14926-14930. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1002592107.