

Evaluación del modelo RothC-26.3 a nivel de parcela en México

GONZÁLEZ-MOLINA, Lucila, CARRILLO-ANZURES, Fernando, ACOSTA-MIRELES, Miguel y BÁEZ-PÉREZ, Aurelio

L. González, F. Carrillo, M. Acosta y A. Báez

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

INIFAP, C.E. Bajío. Km. 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de Allende s/n, Col. Roque. 38110 Celaya, Guanajuato, México
gonzalez.lucila@inifap.gob.mx

F. Pérez, E. Figueroa, R. García, L. Godínez (eds.) Ciencias de la Biología, Agronomía y Economía. Handbook T-I.- ©ECORFAN, Textcoco de Mora, México, 2017.

Abstract

This study evaluated the RothC model in simulating SOC stocks changes at the plot level in sites and systems of Mexico. The experimental plots were located in the states of México, Tlaxcala, Michoacán, Guanajuato, Oaxaca, Jalisco and Nuevo León. RothC was run with SOC_{initial} measured at each sampling point and with average SOC_{initial} measured in each plot. The entry information of the model, as well as the plant residues and organic fertilizers were measured and estimated. The degree of correlation between measured and simulated SOC was of 0.24 to 0.95 and 0.76 to 1.0, by system and site, respectively. Model efficiency was of de 0.16 to 0.84 and -0.6 to 0.93, by system and site, respectively.

8 Introducción

Aunque la modelación es una herramienta útil en la ciencia del suelo, los modelos deben ser evaluados estadísticamente y ser documentados (O'leary et al. 2016). El RothC es un modelo 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 & Jenkinson et al., 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). La mayoría de los estudios en los que se usan modelos para reportar el cambio de COS se han realizado en experimentos de larga duración (Smith et al., 1997). En el presente estudio desarrollado en México se usaron 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, en 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 parcelas en dos formas: (i) con el COS_{inicial} medido en cada punto de muestreo (*CIPUN) en sitios de Oaxaca y (ii) con el COS_{inicial} promedio medido por parcela (*CIPAR).

8.1 Materiales y Métodos

8.1.1 Características de los sitios y sistemas de estudio

- 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 matorral espinoso tamaulipeco que representó un sitio conservado. Algunas especies que dominan este sitio son arbustos espinosos (*Acacia farnestana* (L.) Willd y *Acacia greggii* Gray) y arboles (*Prosopis laegeviata* (Humb y Bonpl. Ex Willd)) (Reid et al., 1990). El periodo de estudio fue de 1993-1999 (Pando et al., 2004).
- 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).

- En la Sierra Norte de Oaxaca entre 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 consideró 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 acahuals 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 acahuals son: *Clethra hartwegii* Britt. (*Clethra*), *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell. (*Rapanea*), *Alnus glabrata* Fernald. (*Alnus*), *Liquidambar macrophylla* Oerst. (*Liquidambar*) (Acosta 2003). Los sitios de las tres regiones de Oaxaca se evaluaron de 2000-2004 (†Acosta, 2003; González-Molina et al., 2008).

- 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 (†Covalada, 2008). (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) (†Covalada, 2008).

- 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) multistrato (MUL) con higuera, calabaza y maíz; donde el arreglo de las hileras fue el siguiente: (a) maíz, (b) calabaza, (c) maíz e (d) higuera y así sucesivamente, la distancia entre plantas de higuera fue de 1.5 m, de maíz 0.75 y de calabaza 1.5; (iii) monocultivo de higuera 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-Molina et al., 2012).

- Localidades de la Cuenca Cuitzeo con suelos vertisoles: Indaparapeo, Álvaro Obregón, Queréndaro I y Queréndaro II Michoacán (†Báez-Pérez et al., 2011). (8) Localidad de Villa Diego y la estación Experimental del Bajío en Celaya, en Guanajuato, con labranza de conservación (†Báez-Pérez 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-Pérez et al., 2011).

- 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 establecido (Buendía, 2011). En las tablas 8 y 8.1 se anotan las características principales de los sitios y sistemas de estudio.

Tabla 8 Características generales de los sitios y sistemas de estudio

Sitios	Sistemas	Latitud	Longitud	Altitud (m)	TMA (°C)	PMA (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 s, Mich.*	Agrícola	19°59'N	101°00'W	1840	19	637
Localidades s, Gto.*	Agrícola	20°31' y 20°23'N	100°48' y 101°11'W	1749	19	631

*Localidades con suelos vertisoles. TMA=Temperatura media anual; PMA=Precipitación media anual

Tabla 8.1 Características edáficas de las parcelas en los sitios y sistemas de estudio

Sitios	Suelo‡	Profundidad muestreo (cm)	Arcilla (%)
Batán, Méx.	Phaeozem	20	38
Linares N. L.	Vertisol y Regosol	30	43
Cuicateca, Oax.	Ferrasol	30	30
Mazateca, Oax.	Ferrasol	30	35
Mixe, Oax.	Ferrasol	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, Mich. y Gto.	Vertisol	30	46 y 61

‡ (FAO-ISRIC-SICS 1998)

8.1.2 Modelo RothC

El modelo RothC-26.3, tiene su origen en las primeras versiones del RothC desarrolladas por Jenkinson & 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 & Jenkinson, 1996). Los parámetros de entrada incluyen temperatura del aire (°C) (TPM), precipitación (mm) (PPM) y evaporación (mm) promedio mensuales (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, se considera 1.44 para los cultivos y pastos con manejo y es de 0.67 para los pastos no explotados y matorrales (incluyendo sabana) (Coleman & Jenkinson 1996)

8.1.3 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. 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).

8.1.4 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.

2.5 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 edafo-climática, 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. Ejemplo de la parametrización de RV para hacer las simulaciones en los sistemas de las localidades del Centro de Salud y Santa Catarina de la región mazateca de la Sierra norte de Oaxaca (Tabla 8.2).

Tabla 8.2 Entrada de carbono al suelo de residuos vegetales abono orgánico y cobertura del suelo en los sistemas de Oaxaca de las localidades Centro de Salud y Santa Catarina

‡Localidad	Sistema ^u	‡PRV /año	Abono	Cobertura
		C t/ha	C t/ha	Suelo
				Meses
Centro de Salud	LT	7.1		9
	LC	6.1	0.32	12
	MIAF*m	6.4	0.21	12
	MIAF*p	3.4		9
Santa Catarina	LT	7.2		9
	LC	8.2	0.32	12
	MIAF*m	5.5		12
	MIAF*p	5	0.21	9
	BL	6		12
	Ail	5		12
	CA	6		12
	PR	3.06	1.02	12
PR	2.8	0.8	12	

^uLT=Labranza tradicional; LC=Labranza de conservación; MIAF=Milpa intercalada con árboles (*m=muro, *p=parcela); BV=Barrera viva; BL=Bosque de liquidambar (40 años); Bosque de aile=BA (10 años); PR=Pradera; ACA=Acahual (6 años); CA=Café; ‡PRV=Entrada promedio de residuos vegetales/año

8.1.6 Criterios de evaluación 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 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.

8.2 Resultados

8.2.1 Evaluación 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 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 el rango 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 subestimó 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 (Tabla 8.2).

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 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 sobrestimado en un 17 %, (González-Molina 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 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 Li 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 sobrestimaron 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).

Tabla 8.3 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
Atécuaro, 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 Mich. y Gto.	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

8.2.2 Evaluación del RothC en sistemas

En las simulaciones puntuales (*CIPUN) (Tabla 8.3) y por parcela (*CIPAR) (Tabla 8.4) 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 un r en el rango de 0.63 a 0.97, con excepción del sistema de AGO ($r=0.24$). La RCME presentó valores en el rango 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%.

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-Molina 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, entre otros), así como también en sistemas agroforestales (Kaonga & Coleman, 2008) para agostaderos no se ha reportado su aplicación.

Tabla 8.4 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

Tabla 8.5 Estadísticos que describen el 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

8.3 Conclusiones

Con base a 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.

8.4 Referencias

Acosta, M. J. (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 Postgraduados, Montecillos, México.

Báez-Pérez, A.E., Huerta-Martínez, E., Velázquez-García, J. & Bautista-Cruz, M.A. (2011). Acumulación y flujo de carbono en vertisoles cultivados en labranza de conservación En F. Paz, & 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 (pp 204-2011)* México. D.F. Instituto Nacional de Ecología.

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 de Licenciatura en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Coleman, K. & Jenkinson D.S. (1996). RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. pp. 237–246. In D.S. Powlson, P. Smith & J.U. Smith (Eds.), *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets NATO ASI Series I*, Volume 38, Springer-Verlag, Berlin.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CNA). 2011. *Estación: Normales Climatológicas 1971-2000*. Recuperado el 4 ene. 2011 de <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/oax/NORMAL20209.TXT>

- Cortés, J.I., Turrent, A., Díaz P., Hernández, E., Mendoza, R., Aceves, E. (2005). *Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas*. Colegio de Postgraduados. México.
- Covaleda-Ocon 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. Palencia, España.
- Cerri, C.E.P., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Falloon, P., Powelson, D.S., Batjes, N., Milne, E., & Carlos C.C. (2007). Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 122, 46-57.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klír, J., Korschens, M., Poulton P.R., & Richter, D.D. (1997). Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 81, 29-44.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., & Reich. P. (1993). Organic carbon soils of the world. *Soil Science Society American Journal*, 57, 192-194.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1998). *World reference base for soil resources*. World soil resources report, 84. Rome: FAO.
- Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., & 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 Biology and Biochemistry*, 30, 1207-1211.
- Falloon, P. & Smith, P. (2002). Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management* 18, 101-111.
- Francaviglia, R., Coleman, K., Whitmore, A.P., Doro, L., Urracci, G., Rubino, M., & Ledda, L. (2012). Changes in soil organic carbon and climate change – Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agricultural Systems*, 112, 48-64.
- Fuentes, M., Govaerts, B., De León, F., Hidalgo, C., Sayre, K.D., Etchevers J., & Dendooven, L. (2009). Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*, 30, 228-237.
- González-Molina L., Etchevers-Barra, J.D. y Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42, 741-751.
- Gonzalez-Molina, L., Etchevers-Barra, J., Gonzalez-Camacho, J.M., Paz-Pellat, F. (2010). Soil organic changes at the plot level in hillside Systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 508-515.
- González-Molina, L. Moreno-Pérez, E. del C., Krishnamurty, L.R., Baéz-Pérez A., y Acosta, M.M. (2012). Simulación de los cambios de carbono orgánico del suelo en sistema de cultivo con higuierilla por el modelo RothC. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 47, 1647-1654.

- Guo, L., Falloon, P., Coleman, K., Zhou, B., Li, Y., Lin, E., & Zhang, F. (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 o the results of long-term experiments on typical upland soils in northern China. *Soil Use Management*, 23, 63–70.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2000. *Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC-2*. Disco compacto. México.
- Kaonga, M.L. & Coleman, K. (2008). Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in eastern Zambia using the RothC-26.3 model. *Forest Ecology and Management*, 256, 1160–1166.
- Ludwig, B., Schulz, E., Merbach, I., Rethemeyer, J., Flessa, H. (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. *European Journal Soil Science*, 58, 155–1163.
- Ludwig, B., Kelin, H., Langan, N., & Xuejun, L. (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.
- Liu, D.L., Chan, K.Y., & Conyers, M.K. (2009). Simulation of soil organic carbon under different tillage and stubble management practices using the Rothamsted carbon model. *Soil Tillage Research*, 1, 65-73.
- Melgoza, C. A. 2006. *Situación actual de los agostaderos*. INIFAP-SAGARPA. USDA Forest Service Proceedings RMRS P-40. P. 85-86.
- Kelin, B.H., Langan, N. & Xuejun, L. (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.
- O’Leary, G., Li, L.D., Ma, Y., Li, F.Y., McCaskill, M., Conyers, M., Dalal, R., Reeves, S., Page, K., Dang, Y.P. & Robertson, F. (2016). Modelling soil carbon 1. Performance of APSIM crop and pasture modules against long-term experimental data. *Geoderma*, 264, 227-237.
- Pando M., Jurado, E., Manzano, M., y Estrada, E. (2004). The Influence of Land Use on Desertification Processes. *Journal of Range Management*, 57, 320-324.
- Reid, N., Marroquin, J. & Beyer-Munzel, O. (1990). Utilization of shrubs and tres for browse fuelwood and timber in the Tamaulipan thornscrub, northeastern México. *Forest Ecology Management*, 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.
- Shirato, Y., Paisanchoen, K., Sangtong, P., Nakviro, C., Yokozawa, M., & Matsumoto, N. (2005). Testing the Rothamsted Carbon Model against data from long-term experiments on upland soils in Thailand. *European Journal of Soil Science*, 56, 179–188.

Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franjo, U., Frolking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Muller, T., Parton, W.J., Thornle, J.H.M., & Whitmore, A.P. (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., Etchevers, J.D. y Vargas, M. (2004). Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra*, 22, 359-367