

Aplicación de un modelo para predecir las reservas de carbono orgánico en un suelo monocultivado con caña de azúcar en condiciones tropicales de cuba

Application of a model to predict the reserves of organic carbon in a monocultivated soil with sugar cane in tropical conditions of Cuba

González Hidalgo M.¹✉, López Seijas T.², Arcia Porrúa J.¹, Ramírez Hernández T.³, Dávila L. M. R.³, Ortiz R. H.³, Aguirre López E.⁴

¹Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). Carretera CUJAE, km 1½, Boyeros, La Habana CP 19290. ²Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGric). Carretera de Fontanar, km. 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. ³Facultad de ciencias Biológicas y Agropecuarias Universidad Veracruzana. Campus Córdoba-Orizaba. ⁴Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Veracruzana. Zona Xalapa. México.

✉ Autor para correspondencia: maribel@inica.azcuba.cu

Recibido: 09/08/2016

Aceptado: 13/11/2016

RESUMEN

Para la simulación del carbono orgánico del suelo se utilizó el modelo RothC26.3 (Coleman y Jenkinson, 1999), que trabaja a una escala de tiempo mensual y permite determinar el recambio mensual del C mediante procesos cinéticos de primer orden, donde las tasas de descomposición de sus cuatro reservorios activos, son moduladas por la temperatura, la humedad y la cubierta de residuos. La investigación se realizó tomando como base la información de carbono orgánico del suelo y rendimientos agrícolas de experimentos desarrollados en áreas agrícolas de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) ubicada en Jovellanos, provincia Matanzas en el periodo comprendido entre 1981 y 2010. Los datos de carbono orgánico de la capa cultivable del suelo (0-20 cm), clasificado como Ferralsol plantado con caña de azúcar, correspondientes al ciclo caña planta, sirvieron de base para parametrizar el modelo, cuyo comportamiento fue modificado por las variables climáticas, procedentes de la estación meteorológica asociada al lugar. La comparación entre los datos de carbono orgánico del suelo simulados y los observados en el período 1981-2010, resultó en que los primeros expresaron 95,58% de la varianza de los datos experimentales. Se encontró que la cantidad necesaria de carbono orgánico para mantener el nivel que tenía el suelo en 1981 fue de 6,28 t ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados soportan el uso del modelo RothC26.3 como una herramienta para predecir el comportamiento del COS en condiciones tropicales.

Palabras claves: Suelo Ferralsol, modelo RothC26.3, materia orgánica del suelo.

ABSTRACT

The model RothC26.3 (Coleman and Jenkinson, 1999) was used to simulate the soil organic carbon, which works on a monthly time scale and allows determining the monthly replacement of the C by kinetic processes of first order, where the decomposition rates of its four active reservoirs, are modulated by temperature, humidity and plant cover. The research was carried out based on soil organic carbon information and agricultural yields from experiments carried out in crops areas of the Provincial Research Station of Sugarcane (EPICA) located in Jovellanos, Matanzas province, between 1981 and 2010. The organic carbon data from arable soil layer classified as Ferralsol (0-20 cm) planted with sugarcane, corresponding to the cane plant cycle, served as a basis for parameterizing the model, whose behavior was modified by climatic conditions, coming from the meteorological station associated to the place. The aim of this work was to validate at tropical conditions of Cuba, the soil organic carbon dynamic model RothC26.3. The comparison between the simulated soil organic carbon data and those observed during the period 1981-2010, resulted 95.58% of observed data variance. It was found that the amount of organic carbon required to maintain soil organic carbon level in 1981 was $6.28 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. The results support the use of the RothC26.3 model as a tool to predict the behavior of COS in tropical conditions.

Keywords: Ferralsol soil, RothC26.3 model, soil organic matter.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO) es uno de los indicadores más importantes de la calidad del suelo. De su contenido depende en gran medida su fertilidad, la capacidad de retención de nutriente y agua, la capacidad de infiltración y el mantenimiento de la estructura, al contribuir a la estabilidad de los agregados. La MO representa la mayor reserva de carbono en la biosfera y puede actuar como fuente o sumidero de dióxido de carbono y otros gases de invernadero.

Una de las formas de estudiar de manera integrada el comportamiento de la MOS en los agroecosistemas, es con el uso de modelos de dinámica de carbono. Dentro de los más de 200 que existen reportados en la literatura especializada, se destaca el RothC26.3 por su versatilidad y facilidad de uso, al haber sido validado en condiciones de uso del suelo y diferentes climas (Smith y col., 1997).

El COS estabilizado es de importancia especial con respecto al secuestro a largo plazo del C en el suelo,

porque cuantifica la mayoría del COS (Zimmermann y col., 2007). Los comportamientos pueden ser identificados y medidos en las fracciones de suelo con su correspondiente tiempo de descomposición, sin embargo, no existen métodos conocidos que separen los diferentes reservorios por su velocidad de descomposición.

Los cambios de CO en los suelos cañeros de Cuba son monitoreados en la Red de experimentos de Larga Duración del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), establecida desde 1972. Su evaluación anual permite predecir el comportamiento del C bajo diferentes condiciones edafoclimáticas y determinar cómo han influido las labores de manejo actuales sobre su contenido en el suelo, modulados por el comportamiento del clima. No obstante, la predicción de los cambios en el contenido de CO como consecuencia del manejo, cambios de uso de la tierra y cambio climático, es una importante tarea para el futuro, debiendo encaminar los estudios con miras a modelar el almacenamiento de C del suelo monitoreando las variables de entrada necesarias para su corrida. La modelación es una importante y prometedora herramienta para la estimación de las

reservas de C en el suelo sobre la base de procesos de acumulación y descomposición de la MO del suelo (Sparling *et al.* 2003).

En Cuba este modelo no se ha validado ni a escala regional ni nacional. Con este trabajo se pretende adecuar y probar la utilidad del mismo para la predicción de las reservas de carbono a escala regional y en un futuro a escala nacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Contexto de trabajo

El estudio se realizó en un suelo Ferralsol plantado con caña de azúcar de la Estación Experimental *Antonio Mesa* de Jovellanos, provincia Matanzas, ubicada entre los 22°45'0" N y 81°30'0" O. En este suelo se monitoreó el contenido de COS en la capa cultivable durante el período 1981-2010.

El área se caracteriza por presentar precipitaciones anuales en el rango de 1 400 a 1 600 mm y una humedad relativa de 80±3,8%; con una temperatura media anual de 24,1±2,3°C, una evaporación media anual de 1 381,8±27,8 mm y una evapotranspiración mensual de referencia de 86,36 mm, con un período poco lluvioso de noviembre a abril, donde la evaporación excede las precipitaciones y otro lluvioso con un comportamiento a la inversa, que se extiende de mayo a octubre.

2.2 Muestreo de suelos

Al inicio de cada ciclo de cosechas¹, durante el período 1981-2010 (ambos inclusive), con el suelo preparado para la plantación, se tomaron muestras en cada parcela a la profundidad de 0-20 cm (seis en el camellón y dos en el narigón), que conformaron una muestra compuesta para

¹ Ciclo de cosechas. Es el tiempo que media entre la plantación y la última cosecha. La caña de azúcar es un cultivo semi-perenne que se cultiva para varios años (ciclo de cosechas), el primer corte se corresponde con el ciclo de planta y los sucesivos, ciclos de retoños.

la determinación de COS utilizando la metodología de Walkley y Black (1934), de acuerdo con las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica del INICA (1980).

2.3 Procedencia de la información utilizada para la validación del modelo RothC26.3

Se tomaron las determinaciones de COS, de acuerdo con la descripción en acápite anterior de:

- a) Los muestreos hechos antes de plantar los experimentos en la totalidad de las parcelas y de aplicar cualquier tratamiento químico u orgánico.
- b) Los tratamientos testigo de cada experimento. En la tabla 1 se relacionan los experimentos utilizados en la investigación, así como la fecha de muestreo, el contenido inicial de COS y rendimiento agrícola del cultivo correspondiente a caña planta. El área de estos varió entre 0,30 y 1,2 ha.

Para determinar la densidad aparente del suelo al inicio y al final del estudio, se tomaron muestras a la profundidad de 0-20 cm y se replicaron cinco veces, con cilindro metálico de aproximadamente 100 cm³, de acuerdo con las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica (1980).

2.4 Modelo utilizado para la realización del trabajo

El modelo RothC es aplicado para predecir las reservas de CO del suelo a corto y largo plazos a escalas regionales y nacionales (Falloon y col., 1998; Falloon y Smith, 2002; Smith, 2005, 2007; van Wesemael y col., 2010).

El modelo RothC26.3 para su inicialización, cuantifica, a través de su corrida en modo inverso, los cuatro reservorios activos con que cuenta, separándolos de acuerdo con su tasa de descomposición (Jenkinson y Ranyer, 1977) y el compartimiento inerte o estabilizado, a falta de las mediciones de edad de radiocarbono, utiliza la ecuación brindada por Falloon y col. (1998).

2.4.1 Datos de entrada del modelo RothC26.3

En el modelo RothC26.3 el COS está distribuido en 4 compartimientos activos y una pequeña cantidad de materia orgánica inerte (IOM). Los cuatro compartimientos activos son: material orgánico descomponible (DPM), material orgánico resistente (RPM), carbono orgánico microbiano (BIO) y materia orgánica humificada (HUM). Cada uno de ellos se descompone por un proceso de primer orden con tasas propias de descomposición. En él la entrada de C a partir del residuo de cosecha se distribuye entre DPM y RPM, dependiendo de su calidad. Para este trabajo se utilizó 0,59 (37/63) (Grace y col., 2006).

Datos climáticos. Se tomaron los datos meteorológicos medios mensuales (temperatura del aire-°C, precipitaciones-mm y evaporación-mm), de la Estación Meteorológica perteneciente al Instituto de Meteorología aledaña a los experimentos.

Datos de suelo. Las reservas de COS desde 1981 hasta 2010, determinadas por el método de Walkley y Black (1934), expresadas en t ha⁻¹; contenido de arcilla y profundidad de muestreo (0-20 cm).

Datos de planta: Se tomó el rendimiento del cultivo como base para el cálculo de los aportes de C aéreo y radical por los residuos de cosecha al COS, expresado en porcentaje de C sobre base seca.

2.1 Parametrización del modelo RothC26.3

El modelo RothC es aplicado para predecir las reservas de CO del suelo a corto y largo plazos a escalas regionales y nacionales (Falloon y col., 1998; Falloon y Smith, 2002; Smith, 2005, 2007; van Wesemael y col., 2010).

La parametrización es la etapa que antecede a la aplicación de un modelo y consiste en decidir y definir los valores necesarios para adecuarlo a condiciones diferentes de las que le dieron origen (Wallach y col., 2006), de modo que el primer paso es ajustarlo a las condiciones del lugar.

El modelo RothC26.3 demanda de un conjunto de parámetros para estimar el recambio del COS, dentro de ellos están los que se describen a continuación:

Las reservas de COS (t ha⁻¹) fueron calculadas de acuerdo con la ecuación (1), a partir de los datos disponibles de COS (%) de la capa cultivable del suelo (0-20 cm).

$$C_{suelo} \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = \text{COS} \times \text{DS} \times \text{P} \text{ (1)}$$

Con el objetivo de conocer cuánto C aporta al COS la masa de residuos que queda en el campo después de la cosecha, incluyendo el sistema radical, se tomó una cifra de 10% de la masa fresca de la cosecha, de acuerdo con datos publicados por Sulroca (2004).

2.1.1 Estimación de la contribución mensual de C al COS a partir de los residuos aéreos de cosecha de la caña de azúcar

Se asumió que la masa seca de los residuos aéreos (hojas secas, verdes y meristemas) en el ciclo caña planta representa 31% (Cabrera y Zuaznabar, 2010); que el contenido de C de la masa

seca es 50%, de acuerdo con Pate y Herridge (1981) y que el C orgánico de los residuos que se humifica, al término de un

año, representa 25% de la masa seca aérea, de acuerdo con cálculos hechos a partir de lo reportado por Cortegaza (2002) para la mezcla de residuos de caña de azúcar. Se consideró que el aporte de C del sistema radical (raíces y rizomas) al COS representa 22% del tributado por la masa seca aérea (Sulroca, 2004). Luego, el aporte de C de 10% de la biomasa aérea, con 50% de C de la masa seca, se obtuvo de multiplicar el peso total de la cosecha por el factor 0,00388.

2.1.1 Cálculo de las reservas de carbono orgánico en la capa cultivable del suelo²

El porcentaje de COS se expresó en $t\ ha^{-1}$ a partir de la ecuación (1)

$COS = COS (\%) \times DS (g\ cm^{-3}) \times P (cm)$ (1)
Dónde: COS es el contenido de carbono orgánico del suelo (%); DS es la densidad aparente del suelo ($g\ cm^{-3}$); P es la profundidad de muestreo (cm).

Para el cálculo del aporte de C de los residuos de cosecha al COS, se utilizó la ecuación (3) (Ponce-Hernández y col., 2004):

$$COT (t\ ha^{-1}) = C_{foliar} + C_{radical} + C_{suelo} \quad (3)$$

Dónde: COT es el COS más los aportes de C de los residuos de cosecha; C_{foliar} es el C aportado por los residuos de cosecha; $C_{radical}$ es el C aportado por el sistema radical (todos expresados en $t\ ha^{-1}$).

El C_{foliar} se calculó con la ecuación (4)

$$C_{foliar} (t\ ha^{-1}) = Rendimiento\ agrícola (t\ caña\ ha^{-1}) \times 0,00388 \quad (4)$$

Dónde: El factor 0,00388 se obtuvo del cálculo del aporte de C al COS a partir de los residuos aéreos de la cosecha.

Para calcular el C_{foliar} , el rendimiento agrícola se expresó en $t\ ha^{-1}\ mes^{-1}$, con el objetivo de eliminar el efecto de la edad de cosecha y formularlo en una escala de tiempo mensual, multiplicado por 12 para obtener la cantidad de residuos que se produjo en un año.

El $C_{radical}$ se calculó mediante la ecuación (5), asumiendo que el sistema radical representa 22% del C_{foliar} (Sulroca, 2004) y que el cultivo lo recambia en cada cosecha (Galdós y col., 2010).

$$C_{radical} (t\ ha^{-1}) = 0,00388 * 0,22 = 0,0008536$$

$$C_{radical} (t\ ha^{-1}) = Rendimiento\ agrícola (t\ caña\ ha^{-1}) \times 0,0008536 \quad (5)$$

Dónde: 0,00388 es el aporte de los residuos de cosecha al C foliar.

2.1.2 Estimación de los reservorios iniciales

Como no hubo cambios en el uso del suelo, se asumió de acuerdo con Jenkinson y col. (1999), que el contenido de COS medido en el sistema al inicio del estudio, alcanzó la condición de equilibrio, pues según observaciones de Nieto y col. (2010), los suelos que han permanecido con el mismo uso por más de 30 años, alcanzan esta condición en el comportamiento de la variable.

Para la inicialización del modelo RothC26.3 se requiere cuantificar los reservorios activos DPM, RPM, BIO y HUM (materia orgánica descomponible, materia orgánica resistente, carbono de la biomasa microbiana y materia orgánica humificada, respectivamente), los que se obtuvieron a través de las corridas iterativas del modelo en modo inverso hasta alcanzar la cifra de COS que marca el equilibrio en

² El cálculo de las reservas de COS no tuvo en cuenta las inclusiones por ser su contenido en el suelo inferior a 5% (Ponce de León, 2003).

1981 en $\pm 0,5 \text{ t C ha}^{-1}$. Los valores de COS de los cuatro reservorios activos de la última corrida (cuando se alcanzó el equilibrio) fueron los que se tomaron para inicializar el modelo (Jenkinson y Ranyer, media mensual de las variables climáticas de un período de cinco años anteriores a 1981 (1976-1980).

Para obtener un estimado del valor de cada uno de ellos, se determinó el contenido de IOM a partir del conocimiento del COT inicial, aplicando la ecuación (6) (Falloon y col., 1998).

$$\text{IOM (t C ha}^{-1}\text{)} = 0,049 * \text{COT}^{1,139} \quad (6)$$

Dónde: IOM es el contenido de carbono inerte; COT es el carbono orgánico total que incluye el contenido de C del suelo y el C aportado por los residuos de cosecha; los factores 0,49 y 1,139 son cifras brindadas por el propio modelo.

2.1.3 Cálculo de los coeficientes modificadores de la constante de descomposición (k)

El modelo tiene la ventaja de modificar las tasas de descomposición (k) de cada compartimento a partir de los valores medios mensuales de temperatura, precipitaciones y cubierta de residuos.

El factor (a) obtenido de la temperatura media del aire, lo calcula el modelo mediante la ecuación (7) (Jenkinson y Ranyer, 1977).

$$a = 47,9 / (1 + e^{(106 / (T + 18,3))}) \quad (7)$$

Dónde: (a) es el factor de temperatura que modifica k ; T es la temperatura media mensual del aire en $^{\circ}\text{C}$.

Las cifras 47,9; 18,3 y 106 son valores obtenidos por ajustes del propio modelo (Coleman y Jenkinson, 1999).

2.2 Manejo del componente hídrico

RothC usa un modelo de balance de agua que calcula el déficit de humedad del suelo (DH). El DH máximo (DH_máx) para la capa cultivable en un suelo particular es

1977). Este proceso se realizó con datos provenientes de un experimento ajeno a los utilizados en la validación del modelo y con la

calculado utilizando una función relacionada con el contenido de arcilla del suelo (ecuación 8).

$$\text{DH}_{\text{máx. (Suelo plantado)}} = -(20,0 + 1,3 * \% \text{ arcilla} - 0,01 * \% \text{ arcilla}^2) * \text{profundidad} / 23 \quad (8)$$

Dónde: profundidad es la profundidad de muestreo utilizada en el estudio en cm. Las cifras que aparecen en ecuación provienen del ajuste del propio modelo RothC26.3.

Esta ecuación fue desarrollada por el modelo originalmente, con muestras tomadas a 23 cm, de manera que el factor profundidad/23 ajusta el DH_máx a una profundidad diferente de 23 cm, en este caso 20 cm. Como el DH a capacidad de campo se fijó a cero, el DH_máx corresponde al punto de marchitez (Jenkinson y Ranyer, 1977).

El DH acumulado (DHac) es calculado a partir del primer mes cuando ($0,75 * \text{evaporación}$) excede las precipitaciones hasta que llega al DH_máx, que una vez alcanzado, permanece en ese valor hasta que las precipitaciones exceden $0,75 * \text{evaporación}$. El factor 0,75 es convencional para transformar la evaporación del evaporímetro en evapotranspiración de un cultivo en crecimiento (Coleman y Jenkinson, 1999).

El factor (b) que modifica (k), el modelo lo calcula a partir del DH_máx, equivalente al DH entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente de la siguiente forma:

$$\text{Si } \text{DHac} < 0,444 * \text{DH}, \text{ entonces } b = 1$$

Dónde: DHac es el déficit acumulado de humedad de la capa cultivable; 0,444 es la cifra que marca el comienzo de la disminución de la respiración microbiana.

De otro modo:

$$b = 0,2 + (1,0 - 0,2) * (\text{DH}_{\text{máx}} - \text{DHac}) / (\text{DH}_{\text{máx}} - 0,444 * \text{DH}_{\text{máx}})$$

b varía entre 0,2 y 1,0. Es 1 cuando no hay limitaciones a la descomposición (Jenkinson y Ranyer, 1977).

El cálculo del $DH_{\text{máx}}$ es en un suelo bajo activo crecimiento vegetativo. En un suelo desnudo, en la medida en que éste se seca, va actuando como una barrera al escape de agua líquida y en forma de vapor de la superficie, el modelo toma esto en consideración, no permitiendo que el suelo se seque más allá del punto de marchitez, de acuerdo con la ecuación (9), a través de la cual se reduce la evaporación.

$$DH_{\text{máx}} (\text{suelo desnudo}) = DH_{\text{máx}} (\text{mm}) / 0,556 \quad (9)$$

Dónde: 0,566 es un factor obtenido por ajustes del modelo original.

El factor cobertura de residuos, que modifica (k) se fijó por el modelo de acuerdo con el uso del suelo, teniendo en cuenta que en un suelo plantado, la descomposición es menor que en uno desnudo (Jenkinson y Ranyer, 1977), de la siguiente forma:

$$\text{Suelo plantado, } c=0,6 \text{ y suelo desnudo, } c=1,0;$$

Dónde: c es cobertura

Estructura del modelo

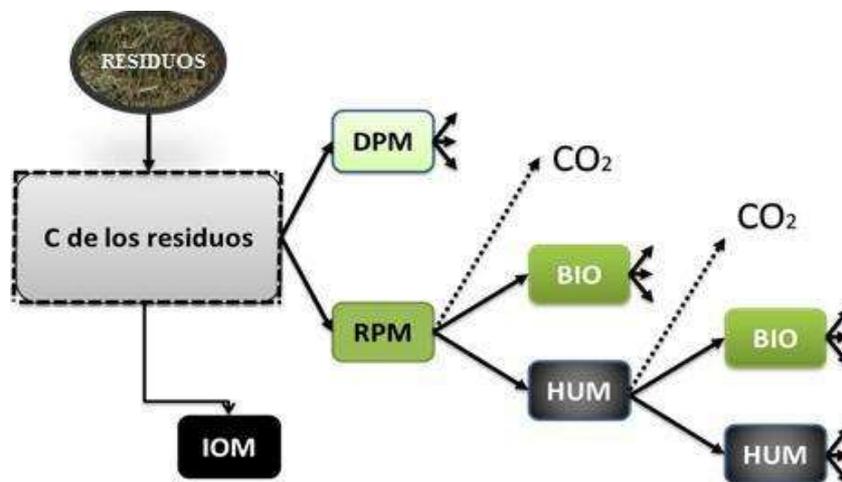


Figura 1. Estructura del modelo RothC26.3 con la distribución de los componentes básicos del COS (Jenkinson y Ranyer, 1977).

Todo el material vegetal pasa a través de estos dos compartimientos, pero solamente una vez. Tanto DPM como RPM, se descomponen para formar CO_2 (pérdida del sistema), BIO y HUM. La proporción que se transforma en CO_2 y en BIO + HUM es después distribuida en 46% BIO y 54% HUM, ambos se descomponen para formar más CO_2 , BIO y HUM. Se asume que la enmienda orgánica utilizada se descompone más que el material normal utilizado, en este caso. La proporción es: DPM 49%, RPM 49% y HUM 2%.

La descomposición tiene lugar de acuerdo con el modelo exponencial Ye^{-abckt} donde: a es el factor que modifica la constante de descomposición para la temperatura, b es el factor para la humedad; c es el coeficiente de retención de residuos; k es la constante de descomposición; y t es 1/12, para expresar k a escala de tiempo mensual.

Las tendencias en el comportamiento de los resultados fueron evaluadas con el auxilio de los programas estadísticos Statistica Versión 8.1 y Microsoft Excel 2010, utilizando análisis de

varianza, regresión y correlación y para el caso de la evaluación de la conducta del modelo se utilizaron los estadígrafos error cuadrático medio (RMSE); Eficiencia del modelo (EF) y sesgo relativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3 Parametrización del modelo RothC26.3

La cuantificación de los reservorios conceptuales en las condiciones de un suelo Ferralsol de la provincia Matanzas permitió establecer la cantidad de COS necesaria para mantener en el tiempo las reservas de COS que el suelo presentaba en 1981 (PPN), equivalente a $6,28 \text{ t ha}^{-1}$.

La PPN y las entradas de C al suelo a partir de los residuos de cosecha son las variables principales que gobiernan el balance del carbono desde la escala de campo hasta la global (Falloon, 2001), siendo su estimación precisa, esencial para la modelación predictiva del COS.

Una de las variables que permitió determinar con precisión la PPN fue la

determinación del factor de calidad más adecuado de acuerdo con las características de los residuos de cosecha de caña de azúcar y la cuantificación del reservorio inerte (IOM) mediante la ecuación propuesta por Falloon y col. (1998).

Falloon y col. (1998), a través de un análisis estadístico de los valores de IOM de 28 sitios con la utilización de edades de radiocarbono para establecer el reservorio, contemplando suelo, manejo y clima, obtuvieron como resultado una simple relación de regresión para cuantificarlo partiendo del COT, lo que contribuyó a la utilización del RothC26.3 en un modo predictivo.

Parámetros como la profundidad de muestreo y la relación $\text{CO}_2/(\text{BIO}+\text{HUM})$, esta última dependiente del contenido de arcilla del suelo, fueron ajustados por el propio modelo.

El mes de comienzo de la corrida del modelo, queda a elección del modelador en dependencia de los patrones climáticos imperantes.

Los parámetros modificados en el contexto de Cuba y los utilizados para su validación en las condiciones de Rothamsted, Inglaterra se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación entre las variables originales utilizadas por modelo RothC26.3 y las modificadas en las condiciones sitio específicas de Cuba durante su parametrización.

Parámetro	Descripción	Variable		Unidad
		Original (Jenkinson y Ranyer (1977))	Variable modificada	
Comienzo de la corrida del modelo	Mes en que el suelo está en capacidad de campo o próximo a ella.	Enero	julio	mes
Profundidad de muestreo	Profundidad de la toma de muestras de suelo.	23,00	20,00	cm
Contenido de arcilla	Fracción arcillosa del suelo.	23,00	75,00	%
Factor calidad de los	Proporción en que se	1,44	0,59	-

residuos: relación DPM/RPM	descomponen los residuos al entrar en contacto con el suelo de acuerdo con su composición.			
Temperatura	Temperatura media del aire	9,25	24,1	°C
CO ₂ /(BIO + HUM)	Proporción de descomposición en función del contenido de arcilla del suelo.	3,51	3,10	-

La corrida del modelo original comienza en el mes de enero por haberse concebido en un país donde el régimen lluvioso tiene un comportamiento inverso en comparación con el de Cuba que está en la región tropical, donde éste se enmarca entre mayo y octubre. Por esta razón, se comenzó la corrida en el mes de julio para garantizar condiciones óptimas para la descomposición, donde las precipitaciones excedieron la evaporación.

El modelo RothC26.3 para su inicialización, cuantifica, a través de su

corrida en modo inverso, los cuatro reservorios activos con que cuenta, separándolos de acuerdo con su tasa de descomposición (Jenkinson y Ranyer, 1977) y el compartimiento inerte o estabilizado, a falta de las mediciones de edad de radiocarbono, utiliza la ecuación brindada por Falloon y col. (1998).

Los cuatro reservorios activos cuantificados mediante su corrida a equilibrio, así como el porcentaje que representan del COT, se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Fracciones de COS obtenidas mediante la corrida del modelo RothC26.3 a equilibrio.

Reservorio	Cantidad que representa en cada reservorio (t C ha ⁻¹)	Porcentaje que representa del COT
DPM	0,29	0,51
RPM	8,47	15,80
BIO	0,96	1,79
HUM	35,38	66,60
IOM	8,41	15,30
COT	53,57	físico 100,00

Modelos como el Century (Parton y col., 1988) y el APSIM (McCown y col., 1996), muy ampliamente usados por su versatilidad y nivel de detalles, utilizan reservorios conceptuales, como una vía de cuantificación alternativa a los métodos de determinación convencionales como los densimétricos y gravimétricos (Zimmermann y col., 2007; Kadono y col., 2012).

Una de las formas de comprobar la veracidad de un modelo, es midiendo los reservorios con los métodos tradicionales de fraccionamiento

comparación con los compartimientos conceptuales, como fue del modelo RothC26.3 con datos de experimentos de campo

realizado por Zimmermann y col. (2007) y Kadono y col., (2012). Sin embargo, no hay métodos confirmados que utilicen las constantes de descomposición para separar experimentalmente las fracciones de COS (von Lützwow y col., 2007).

La capacidad del modelo RothC26.3 para simular el comportamiento del COS bajo manejo convencional fue comprobada al comparar los valores medios simulados y los observados, provenientes

de 360 determinaciones de COS, en la capa cultivable del suelo, correspondientes al ciclo caña planta, en el período 1981-2010 (Figura 2).

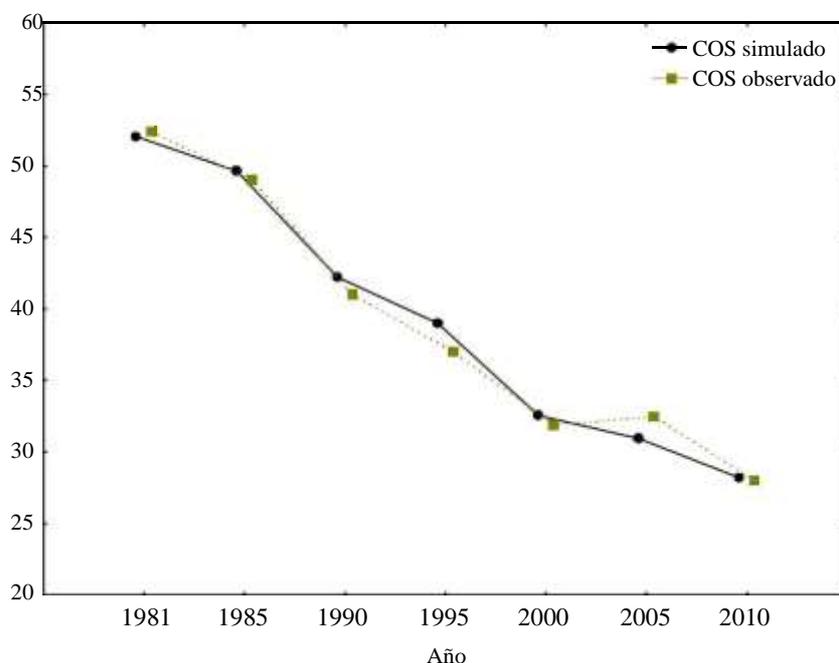


Figura 2. Comportamiento del COS observado y simulado, en un período de 30 años (1981-2010). Los valores de y son la media de cada ciclo de reposición del cultivo.

El modelo RothC26.3 fue capaz de simular con precisión la dinámica del COS de la capa cultivable de un suelo plantado con caña de azúcar durante 30 años, verificado en el comportamiento de los estadígrafos utilizados para evaluar la bondad de ajuste.

2.5 Resultados del análisis estadístico utilizado en la evaluación del comportamiento del modelo

Las medias de COS observadas y las simuladas en el período 1981-2010, constataron correspondencia entre ellas, al tener un valor de incertidumbre (RMSE) de 1,46%, pues mientras más pequeño es este valor, mayor correspondencia existe entre los valores simulados y los observados. Esta cifra es algo inferior los valores reportados por Smith y col. (1997); Falloon

y Smith (2002) y Guo y col. (2012), quienes con la utilización del modelo RothC26.3 validado con datos experimentales, encontraron que el RMSE estuvo en el rango de 2 a 30%. El RMSE es la raíz cuadrada de la varianza de los residuales y según Ritter y Muñoz-Carpena (2013), es una buena medida de cuán preciso el modelo predice la realidad como criterio más importante para ajustar, cuando el principal propósito es la predicción.

Unido a lo anterior, una eficiencia (EF) de 0,99, cercana a la unidad como valor ideal, reforzó la condición de buen ajuste. Según Legates y McCabe (1999) este coeficiente es más sensible que el R^2 a las diferencias entre los valores simulados y observados y a la presencia de valores extremos, por lo que resulta un estadígrafo más preciso para definir el ajuste de la simulación. Independientemente de que R^2

mostró un valor alto, según Legates y Davis (1997), tiene sus limitaciones para ser usado con estos fines por ser insensible a las diferencias aditivas y proporcionales, entre las predicciones y las observaciones e hipersensible a valores extremos (*outliers*), lo que puede conducir a errores en las predicciones.

De acuerdo con McCuen y col. (2006) el sesgo relativo, definido como la relación entre el promedio de las desviaciones entre valores observados y calculados y el promedio de los observados, se utiliza para evaluar el sesgo de los dos estadígrafos anteriores, en los cuales las diferencias entre los datos observados y los simulados están elevados al cuadrado y cualquier valor atípico (*outlier*) puede desvirtuar la predicción. Cuando éste alcanza un valor superior a 5% puede considerarse relevante porque las predicciones del modelo estarán sobreestimadas o subestimadas. En este caso, el modelo mostró no estar sesgado, al alcanzar el valor de 1,71%.

Autores como Smith y col. (1997); Lobe y col. (2005); Ludwig y col. (2005) y Barančíková y col. (2010) plantearon que con la utilización de este modelo, en muy pocos casos se han reportado desviaciones con relación a los datos experimentales.

El modelo mostró flexibilidad, al adaptarse a las condiciones del lugar a través de la modificación de las tasas de descomposición de los diferentes reservorios por la temperatura, la humedad y la presencia o no de plantas en la superficie del suelo, lo que permitió adecuarlo al contexto del lugar y obtener resultados aceptables.

Además de lo anteriormente expresado, el modelo con sus mecanismos de estandarización interna, adecuó la profundidad de muestreo a la empleada en el estudio y con la utilización de un factor

de calidad de residuos de 0,59 (DPM/RPM de 37/63), con una composición superior de componentes estructurales que descomponibles, de acuerdo con Alexander (1985) y el contenido de arcilla del suelo, fue capaz de calcular el recambio de C en los reservorios BIO y HUM.

Al simular el contenido de COS a equilibrio bajo los efectos del manejo convencional, éste calculó una cifra de C a partir de los residuos de 6,28 t ha⁻¹ año⁻¹ (0,25% de C), como cantidad necesaria para garantizar el nivel que el suelo poseía en 1981, equivalente a 13,28 t ha⁻¹ año⁻¹ de masa seca teniendo en consideración que, de acuerdo con Pate y Herridge (1981), el C representa 50% de la masa seca.

Este valor se encuentra dentro del rango propuesto como ideal para mantener el COS estable en Brasil, por de Oliveira y col. (2012), de 6,53 a 7,13 t ha⁻¹ año⁻¹ de C para suelos de textura arcillo limoso y arenoso arcillosa, respectivamente y es la PPN del ecosistema caña de azúcar, bajo las condiciones específicas de clima y suelo estudiados.

El COS es el resultado del balance entre las adiciones de residuos (entradas) y la descomposición (salidas), estando las primeras muy relacionadas con la PPN, que en condiciones de equilibrio, es igual a los aportes de C a partir de los residuos al COS (Jenkinson y col., 1999). Por tanto, el incremento de la temperatura en 1,4 y 2,0°C pronosticado para el año 2050, habrá que contrarrestarlo con una mayor cantidad de biomasa, lo que implicaría, la búsqueda de variedades que satisfagan esta condición, además de garantizar la humedad necesaria en el suelo para su crecimiento satisfactorio, así como, un manejo que responda al equilibrio dinámico entre los aportes mediante el proceso de la fotosíntesis y las pérdidas por descomposición y que se puede lograr con una adecuada disciplina tecnológica.

2.6 Relación entre los valores de COS observados y los simulados

La regresión lineal entre datos de COS medidos y simulados, resultó en un

$R^2=0,9558$, lo que evidenció una fuerte correlación entre ellos (Figura 3), siendo alta la expresión de la varianza de los datos observados por los simulados.

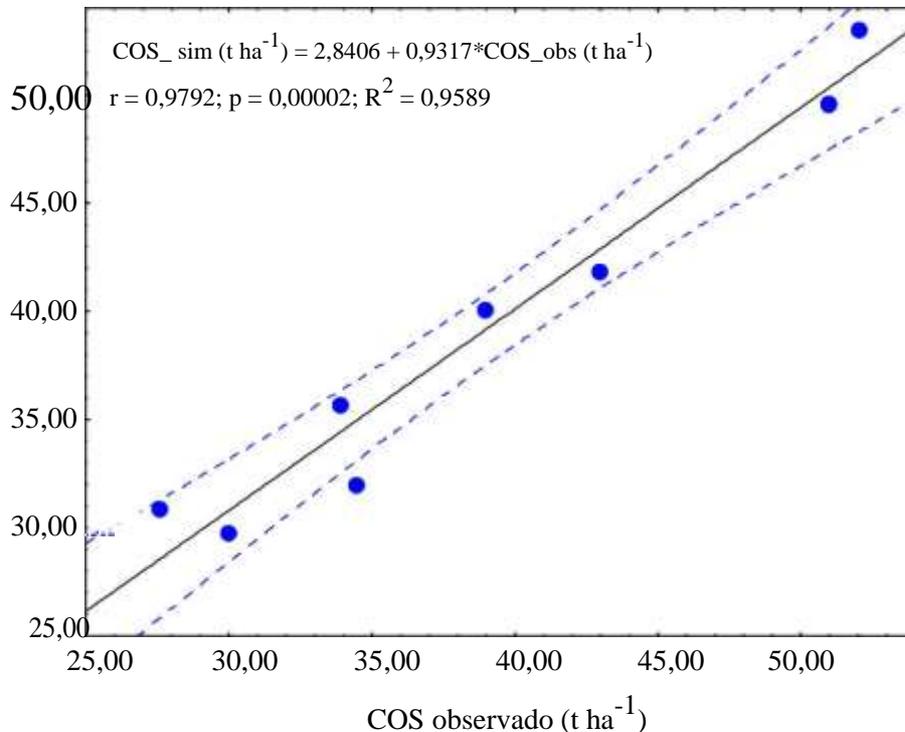


Figura 3. Relación entre los valores de COS observados y simulados en el período 1981-2010. Las bandas laterales son el intervalo de confianza.

De acuerdo con Fahrmeir y col. (2004), un valor de R por encima de 0,80 indica una correlación *fuerte*; entre 0,5 y 0,8 es *modesta* y menores que 0,5 es *débil*, lo que mostró la habilidad del modelo para simular la dinámica del COS, ya constatada por muchos otros autores como Barančíková y col. (2010) y Farina y col. (2013), por citar algunos de los más recientes.

2.7 Resultados del análisis estadístico utilizado en la evaluación del comportamiento del modelo

Las medias de COS observadas y las simuladas en el período 1981-2010, constataron correspondencia entre ellas, al tener un valor de incertidumbre (RMSE) de

1,46%, pues mientras más pequeño es este valor, mayor correspondencia existe entre los valores simulados y los observados. Esta cifra es algo inferior los valores reportados por Smith y col. (1997); Falloon y Smith (2002) y Guo y col. (2012), quienes con la utilización del modelo

RothC26.3 validado con datos experimentales, encontraron que el RMSE estuvo en el rango de 2 a 30%. El RMSE es la raíz cuadrada de la varianza de los residuales y según Ritter y Muñoz-Carpena (2013), es una buena medida de cuán preciso el modelo predice la realidad como criterio más importante para ajustar, cuando el principal propósito es la predicción.

Unido a lo anterior, una eficiencia (EF) de 0,99, cercana a la unidad como valor ideal, reforzó la condición de buen

ajuste. Según Legates y McCabe (1999) este coeficiente es más sensible que el R^2 a las diferencias entre los valores simulados y observados y a la presencia de valores extremos, por lo que resulta un estadígrafo más preciso para definir el ajuste de la simulación. Independientemente de que R^2 mostró un valor alto, según Legates y Davis (1997), tiene sus limitaciones para ser usado con estos fines por ser insensible a las diferencias aditivas y proporcionales, entre las predicciones y las observaciones e hipersensible a valores extremos (outliers), lo que puede conducir a errores en las predicciones.

De acuerdo con McCuen y col. (2006) el sesgo relativo, definido como la relación entre el promedio de las desviaciones entre valores observados y calculados y el promedio de los observados, se utiliza para evaluar el sesgo de los dos estadígrafos anteriores, en los cuales las diferencias entre los datos observados y los simulados están elevados al cuadrado y cualquier valor atípico (outlier) puede

desvirtuar la predicción. Cuando éste alcanza un valor superior a 5% puede considerarse relevante porque las predicciones del modelo estarán sobreestimadas o subestimadas. En este caso, el modelo mostró no estar sesgado, al alcanzar el valor de 1,71%.

2.8 Análisis de las salidas del modelo RothC26.3

2.8.1 Recambio mensual de C en cada compartimiento activo influido por el manejo convencional

Tomando en consideración la corrida del modelo a equilibrio 10 000 años atrás, con una entrada de C de $6,28 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, una relación DPM/RPM=0,59 y una cantidad IOM=8,41 t ha^{-1} , el estado del modelo al final de dicha corrida para la condición de manejo convencional es el que se expone en la Tabla 3.

Tabla 3. Descomposición y recambio mensual del COS bajo manejo convencional (medias de 30 años).

Reservorio	Y t C ha ⁻¹	Cantidad al final del mes	Diferencia	Descomposición con respecto al valor inicial	CO ₂	BIO	HUM	Edad de radio_C
		t ha ⁻¹ C mes ⁻¹		%				
DPM	0,25	0,03	0,22	12,45	0,165	0,076	0,0894	0,01
RPM	7,78	7,31	0,47	6,06	0,356	0,164	0,1924	2,18
BIO	0,91	0,79	0,12	12,85	0,088	0,041	0,0477	8,15
HUM	36,60	36,45	0,15	0,42	0,115	0,053	0,0621	39,34

Para el cálculo de descomposición mensual, se tomó el valor 2,503 correspondiente al mes de julio, coincidente con condiciones de temperatura y humedad propicias para una descomposición máxima. La diferencia representa la cantidad de COS descompuesta en el mes,

que es distribuida entre los reservorios (BIO + HUM) y CO₂.

La cuantificación de los reservorios mediante la corrida a equilibrio del modelo y su recambio, se exponen a continuación, teniendo en cuenta que (BIO+HUM) formado se descompone en 46% BIO y 54% HUM (Coleman y Jenkinson, 1999)

(Tabla 4).

³ Es el producto de multiplicar los factores que modifican las tasas de descomposición (*k*) para temperatura (a), humedad (b) y cubierta de residuo (c).

Tabla 4. Recambio del C en los reservorios (BIO+HUM) y pérdida en forma de CO₂.

Reservorio	Cantidad al final del mes		BIO	HUM	CO ₂
	Diferencia				
	t ha ⁻¹ C mes ⁻¹				
DPM	0,03	0,22	0,02	0,03	0,17
RPM	7,31	0,47	0,05	0,06	0,36
BIO	0,79	0,12	0,01	0,02	0,09
HUM	36,45	0,15	0,02	0,02	0,12
Total		0,96			0,74

Luego, los reservorios quedan cuantificados del modo en que aparece reflejado en la Tabla 5, teniendo en cuenta que el C de los residuos pasa por cada

compartimiento sólo una vez y se recambia en BIO y HUM a razón de 46 y 54%, con una pérdida del sistema en forma de CO₂, de acuerdo con el contenido de arcilla del suelo.

Tabla 5. Recambio del contenido de C en cada uno de los compartimientos.

	DPM	RPM	BIO	HUM
	t ha ⁻¹ COS mes ⁻¹			
	0,03	7,31	0,79	36,45
			0,02	0,03
			0,05	0,06
			0,01	0,02
			0,02	0,02
Total	0,03	7,31	0,89	36,58

Así, en estos dos compartimientos ocurrió un recambio al final del mes julio de 0,10 t C ha⁻¹ (0,79 a 0,89 t C ha⁻¹) en BIO y de 0,13 t C ha⁻¹ (36,45 a 36,58 t COS ha⁻¹) en HUM, mientras que la pérdida del sistema ascendió a 0,74 t C ha⁻¹ en forma de CO₂, con respecto a la cantidad de residuos que se descompuso en ese mes, equivalente a 80% de pérdidas, pues de acuerdo con Jenkinson (1990) éstas pueden variar entre 75 y 85%. Es decir, que al final del mes sólo se regeneró en BIO y HUM 0,26 t C ha⁻¹, que representa 20% del C que se descompuso en ese mes, también dentro del rango reportado por este autor.

Los valores de recambio del COS en los reservorios BIO y HUM encontrados mediante su simulación con el modelo RothC26.3, se enmarcan en el rango reportado por Pessenda y col. (2001), quienes con el empleo del método abundancia natural de C¹³ en una cronosecuencia bosque-caña de azúcar por

12 y 50 años, determinaron una

humificación a partir de los residuos del cultivo de 11 y 36%, respectivamente, mostrando una contribución significativa de los residuos al COS con el paso del tiempo. No obstante, de acuerdo con Liu y col. (2008), una gran proporción de los residuos retenidos en la superficie del suelo es perdida antes de ser secuestrada en el COS, como fue evidenciado en este trabajo, donde la mayor parte del COS se disipó en forma de CO₂.

Por tanto, la retención de una pequeña fracción de C proveniente de los residuos y estabilizada en el COS, es esencial para reemplazar el C perdido por mineralización, lo que podrá garantizarse con un manejo conservacionista del suelo y mayores aportes de residuos, además de condiciones favorables para la humificación.

CONCLUSIONES

La validación del modelo RothC26.3 en condiciones de un clima tropical como el de Cuba, fue posible, probando ser una

herramienta útil para la predicción del comportamiento del carbono orgánico del suelo a escala regional.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios básicos que contribuyan a profundizar en las predicciones del modelo Rothc26.3, como son las determinaciones de los diferentes reservorios de carbono, la contribución de los residuos de cosecha al carbono orgánico del suelo, a modo de refinar el modelo y extender su aplicación a otras condiciones de suelo bajo el mismo procedimiento metodológico utilizado.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Kevin Coleman, Rothamsted Research Station, Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK, por su asesoría para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Alexander A.G. 1985. The energy cane alternative. Sugar Series 6. Elsevier, Amsterdam, 509 pp. ISBN 0-444-41897-0. <https://doi.org/10.17221/23/2009-SWR>
- Barančíková Gabriela.; Halás J.; Gutteková M.; Makovníková J.; Nováková M.; Skalský R. y Tarasovičová Z. 2010. Application of RothC Model to Predict Soil Organic Carbon Stock on Agricultural Soils of Slovakia. Soil & Water Res. V. 5, No. 1 p 1–9.
- Cabrera J.A y Zuaznábar R. 2010. Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. Cultivos Tropicales, vol. 31, No. 1, p. 5-13.
- Charro E.; Moyano A. y Ciria P. 2006. Simular los efectos sobre el suelo agrícola según su manejo y el cambio climático mediante el modelo Roth-C. VII Congreso SEAE Zaragoza 2006. No. 66. 1-7 p.
- Coleman, K. & Jenkinson, D. 1999. RothC-26.3. A Model for the Turnover of Carbon in Soils. Model Description and Windows Users Guide. IACR – Rothamsted, Harpenden.
6. Cortegaza P.L. 2002. Descomposición de residuos de cosecha de caña de azúcar. Evaluación de la pérdida de masa y liberación de nutrientes. [Tesis presentada en opción al título de máster en Ciencias Agrícolas]. Universidad Agraria de la Habana, La Habana. 95 pp.
- de Oliveira A.F.; Sá J.C.M.; Harms M.G.; Miara S.; Briedis C.; Netto C.Q.; dos Santos J.B. y Canalli L.B. 2012. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. Doi: 10.1073/pnas.1002592107 [15-4-2014]. <https://doi.org/10.1073/pnas>
- Dirección de Manejo Agronómico. 1980. Normas metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica. Tomos I y II. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 150 pp.
- Elliott, E.T. & Paustian, T.K. 1996. Modeling the measurable or measuring the modelable: a hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations. In: Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Long-Term Datasets (eds D.S. Powlson, P. Smith & J.U. Smith), 161–179. NATO ASI Series 1: Global Environmental Change, 38. Springer-Verlag, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-6>
- Fahrmeir L.; Kunstler R.; Pigeot I. Tutz G. 2004. Statistik – der Weg Zur Datenanalyse. 5ta. Edi. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Falloon P. 2001. Large scale spatial modelling of soil organic carbon dynamics. Tesis de doctorado, University of Nottingham. <https://doi.org/10.1007/978>

- Falloon P. 2001. Large scale spatial modelling of soil organic carbon dynamics. Tesis de doctorado, University of Nottingham.
- Falloon P. y 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, p. 101–111.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.t>
- Falloon P.; Smith P.; Coleman K. y Marshall S. 1998. Estimating the size of the inert organic matter pools for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 30, p.1207-1211.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00)
- Farina R.; Coleman K. y Withmore A.P. 2013. Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dry-land region. *Geoderma*, Vol. 200–201, p. 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoder>
- Galdós M.V.; Cerri C.C.; Cerri C.E.P.; Paustian K. y van Antwerpen R. 2010. Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth. *Plant Soil*
<https://doi.org/10.1007/s11104-009-0004-3>
- Grace P.R.; Post W.M. y Hennessy K. 2006. The potential impact of climate change on Australia's soil organic carbon resources. *Carbon Balance Manag.* p. 1-14.
<https://doi.org/10.1186/1750-0680-1-14>
- Guo S.; Wu J.; Coleman K.; Zhu H.; Li Y. y Liu W. 2012. Soil organic carbon dynamics in a dryland cereal cropping system of the Loess Plateau under long-term nitrogen fertilizer applications. *Plant and Soil* 353: 321-332
<https://doi.org/10.1007/s11104-011-1034-1>
- Jenkinson D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B.* 329, p. 361–368.
<https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0177>
- Jenkinson D.S. y Ranyer J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments, *Soil Sci.* 123, p. 298– 305.
<https://doi.org/10.1097/00010694-1977050>
- Jenkinson D.S.; Harris H.C.; Ryan J.; McNeill A.M.; Pilbeam C.J. y Coleman K. 1999. Organic matter turnover in a calcareous clay soil from Syria under a two-course cereal rotation. *Soil Biology and Biochemistry* 31 (5), 687–693.
<https://doi.org/10.1016/S0038-0717>
- Kadono A.; Funakawa S. y Kosaki T. 2012. Comparison of Measurable and Conceptual Soil Organic Carbon pools using the RothC Model in Eurasia Steppe Soils under Different Land Use. *Pedologist*, p. 442-448.
- Legates D. y McCabe G. 1999. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resour. Res.*, 35(1) 233-241.
<https://doi.org/10.1029/1998WR900>
- Legates D.R. y Davis R.E., 1997. The continuing search for an anthropogenic climate change signal: limitations of correlation-based approaches. *Geophys. Res. Lett.* 24, p. 2319–2322.
<https://doi.org/10.1029/97GL02>
- Liu H.; Jiang G.M.; Zhuang H.Y.; y Wang K.J. 2008. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12:1402–1418.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.20>
- Lobe I.; Bol R.; Ludwig B.; DuPreeze C.C. y Amelung W. 2005. Savanna-derived organic matter remaining in arable soils of the South African High yield long-term mixed cropping: evidence from ^{13}C and ^{15}N natural abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, p. 1898–1909.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.200>
- Ludwig B.; Helfrich M. y Flessa H. 2005. Modelling the long-term stabilization of carbon from maize in a silty soil. *Plant and Soil*, 278, 315–325.
<https://doi.org/10.1007/s11104-005->
- McCown R.L., Hammer G.L. y Hargreaves J.N.G., 1996. APSIM: a novel software system for model

- development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50, p. 255–271. <https://doi.org/10.1016/0308->
- McCuen R.H.; Knight Z. y Cutter A.G. 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* 11, p 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699()
- Nieto O.M.; Castro J.; Fernández E. y 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*, v.26, p.118-125. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.0>
- Parton W.J.; Stewart J.W.B. y Cole C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in Grassland Soils – A model. *Bio-geochemistry*, 5, p. 109–132. <https://doi.org/10.1007/BF02180>
- Pate, I.S. y Herridge, D.F. 1981. Partitioning and utilization of Net photosynthate in a nodulated annual legume. *I Exp Bot* 29. P. 401-412. <https://doi.org/10.1093/jxb/29.2>.
- Pessenda L.C.R.; Boulet R.; Aravena R.; Rosolen V.; Gouveia S.E.M.; Riveiro A.S. y Lamote M. 2001. Origins and dynamics of soil organic matter and vegetation changes during the Holocene in a forest-savanna transition zone. *Brazilian Amazon Region. Holocene* <https://doi.org/10.1191/09596830166>
- Ritter A. y Muñoz-Carpena. 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480, p. 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydro>
- Smith P. 2005. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: influence of direct human-induced, indirect and natural effects. *European Journal of Soil Science*, 56, p. 673–680. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0>
- Smith P.; Martino D; Cai Z.; Gwary D.; Janzen H; Kumar P.; McCarl B.; Ogle S.; O'Mara F.; Scholes C.B. y Sirotenko O. 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz B.; Davidson R. Bosch P.R.; Dave R.; Meyer L.A. (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Smith P.; Smith J.U.; Powlson D.S.; McGill W.B.; Arah J.R.M.; Chertov O.G.; Coleman K.; Franko U.; Frolking S.; Jenkinson D.S.; Jensen L.S.; Kelly R.H.; Klein-Gunnewiek H.; Komarov A.S.; Li C.; Molina J.A.E.; Mueller T.; <https://doi.org/10.1016/S0016-7061>
- Parton W.J.; Thornley J.H.M. y Whitmore A.P. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, p. 153-225.
- Sparling G., Parfitt R.L., Hewitt A.E., and Schipper L.A., (2003). Three approaches to define desired soil organic matter contents. *Journal of Environmental Quality*, 32 (3): 760-766. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.760>
- Sulroca F. 2004. Los residuos de la cosecha cañera y su factibilidad en la producción de alimento animal y biofertilizantes. *Revista Cuba Azúcar* Vol. XXXIII Oct – Dic. 2004 p. 25-36.
- van Wesemael Bas; Paustian K.; Meersmans J.; Goidts Esther; Barančíková Gabriela y Easter M. 2010. Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. Aug 17, 2010; 107(33): 14926–14930. Publicado en línea: Ago. 2, 2010. <https://doi.org/10.1073/pnas.100259>
- von Lütow M.; Kögel-Knabner I.; Ekschmitt K.; Flessa H.; Guggenberger G.; Matzner E. y Marschner B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil*

Biology & Biochemistry 39, p.
2183-2428. <https://doi.org/10.1016/j.s>

Walkley A. y Black I.A. 1934. An
examination of the method for determining
soil organic matter and a proposed
modification of the chromic acid titration
method. *Soil Sci.*37, p. 29–37.

<https://doi.org/10.1097/00010694-1934010>

Wallach D.; Makowski D. y Jones J.W. (Ed.)
2006. Working with Dynamic Crop
Models Evaluation, Analysis,
Parameterization and Applications,
Elsevier, p. 447.

Zimmermann M.; Leifeld J.; Schmidt M.W.I.;
Smith P. y Fuhrer J. 2007. Measured soil
organic matter fractions can be related to
pools in the RothC model. *European
Journal of Soil Science* 58, p. 658-667.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.0>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)