

Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en una secuencia de perturbación y sitios de referencia

Soil organic carbon for different depths in a sequence of disturbance and reference sites

Edgar Barrales-Brito¹ , Fernando Paz-Pellat^{2,3} , Alma S. Velázquez-Rodríguez³ ,
Claudia Hidalgo-Moreno⁴  y Jorge Dionisio Etchevers-Barra⁴ 

¹ Estudiante de Doctorado en Edafología, ² GRENASER, ⁴ Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

³ Autor para correspondencia (ferpazpel@gmail.com)

³ Facultad de Ciencias, Campus El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca km 15.5, Piedras Blancas. 50200 Toluca de Lerdo, Estado de México, México.

Editor invitado: Dr. Fernando Paz Pellat

RESUMEN

El carbono orgánico de los suelos (COS) a diferentes profundidades del perfil del suelo puede ser desestabilizado por diversos factores climáticos o antropogénicos, por lo que es necesario caracterizarlo en forma adecuada. La modelación de la distribución vertical del COS ha sido analizada generalmente con el uso de enfoques empíricos de ajustes de modelos matemáticos. Este esquema de modelado es usado para caracterizar el COS a profundidad del perfil del suelo en diferentes usos del suelo, pero con un enfoque incremental de introducir condicionantes en el ajuste, por regresión no lineal. Las condiciones de frontera introducidas (para profundidad cero y en el infinito) permite parametrizar los modelos con sentido fisicoquímico y biológico. Los mejores modelos seleccionados en el proceso progresivo de ajuste fueron revisados para analizar la congruencia de sus parámetros, argumentándose que sus bases no son claras para caracterizar las dinámicas del COS. Como alternativa se introdujo una cinética de reacción de orden n variable en los ajustes experimentales, obteniéndose buenos resultados ($R^2 > 0.99$) y patrones claros en las relaciones entre el orden n y la tasa de reacción k_n del modelo alternativo, orientado al objetivo de sintetizar conocimiento a través del análisis de patrones y su modelado matemático.

Palabras clave: cinética de orden n , condiciones de frontera de la modelación, distribución vertical del carbono, modelación progresiva, secuencia de perturbación.

SUMMARY

Soil organic carbon (SOC) at depth can be destabilized by various climatic or anthropogenic factors, so it is necessary to characterize it properly. The modeling of the vertical distribution of the SOC has generally been approximated using empirical approaches to mathematical model adjustments. This scheme is used to characterize the SOC at depth in different land uses and it is analyzed, but with an incremental approach of introducing constraints in the experimental adjustment, by nonlinear regression. The boundary conditions introduced (for zero and infinity depth) allow parameterizing models with physicochemical and biological sense. The best models selected in the progressive adjustment process were reviewed to analyze the congruence of their parameters, arguing that their bases are not clear to characterize the dynamics of the SOC. As an alternative, a reaction kinetics of variable order n was introduced in the experimental settings, obtaining good results ($R^2 > 0.99$) and clear patterns in the relationships between order n and the k_n reaction rate of the alternative model.

Cita recomendada:

Barrales-Brito, E., Paz-Pellat, F., Velázquez-Rodríguez, A. S., Hidalgo-Moreno, C. y Etchevers-Barra, J. D. (2022). Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en una secuencia de perturbación y sitios de referencia. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-17. e1319. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1319>

Recibido: 14 de diciembre de 2021. Aceptado 30 de marzo de 2022.
Artículo. Volumen 40, marzo de 2022.

Index words: *order n kinetics, boundary conditions, vertical carbon distribution, progressive modeling, disturbance sequence.*

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) contribuye a la estabilidad de los agregados de los suelos (Tisdall y Oades, 1982) y al secuestro de carbono (C) en los mismos (Lal, 2004). La MOS mantiene o incrementa la fertilidad, la infiltración y resistencia a la erosión de los suelos, entre otras funciones (Brady y Weil, 2008), incrementando la productividad de la vegetación y mitigando las emisiones de CO₂ (Smith y Powlson, 2007), por lo que es importante caracterizar los patrones de la MOS con relación a los cambios de uso del suelo e implementación de prácticas de manejo (Lal, 2009). La MOS está constituida principalmente por C, por lo que el carbono orgánico de los suelos (COS) es materia de inventarios de carbono con relación al estado de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global (Penman *et al.*, 2003; Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara y Tanabe, 2006), tanto a escala espacial como temporal (Paz, Argumedo, Cruz, Etchevers y de Jong, 2016).

En los inventarios del COS es práctica común usar la profundidad de 0 a 30 cm (Penman *et al.*, 2003; Eggleston *et al.*, 2006), bajo argumentos de que a mayor profundidad el COS es más estable o recalcitrante (Lorenz y Lal, 2005), con menores tasas de descomposición (Schrumpf *et al.*, 2013) y tiempos de residencia grandes (Rumpel y Kögel-Knabner, 2011). La estabilidad del COS a profundidad puede estar asociada a diferentes mecanismos (Lützow *et al.*, 2006), los cuales pueden ser modificados y desestabilizar el C al cambiar el medio ambiente o por perturbaciones antropogénicas (Bernal *et al.*, 2016; Gross y Harrison, 2019). La evidencia experimental muestra que la estructura molecular del COS no controla su estabilidad, dado que los controles biológicos y ambientales predominan, por lo que la persistencia del COS debe considerarse como una propiedad del ecosistema (Schmidt *et al.*, 2011).

La desestabilización del COS a mayor profundidad que 30 cm por ingreso de C fresco (Fontaine *et al.*, 2007; Bernal *et al.*, 2016), por incremento en la temperatura (Fang, Smith, Moncrieff y Smith, 2005), por perturbaciones físicas (Diochon y Kellman, 2009) u otros mecanismos (Adams *et al.*, 2005; Strahm *et al.*, 2009) ha planteado la necesidad de inventariar el COS

a mayor profundidad que 30 cm (Harrison, Footen y Strahm, 2011; Jackson *et al.*, 2017). De los numerosos inventarios del COS global a la profundidad de 1 m (Scharlemann, Tanner, Hiederer y Kapos, 2014), sobresale que alrededor del 50% del COS total está en la profundidad de 30 a 100 cm, por lo que es necesario cuantificarlo. La distribución de las raíces de la vegetación a profundidad define parcialmente la distribución vertical del COS, y otros elementos (Jobbágy y Jackson, 2000 y 2001), aunque el COS se extiende más allá del límite radicular. Las entradas del COS a diferentes profundidades son producto de la rizodeposición y microorganismos (Jackson *et al.*, 2017; Pries *et al.*, 2018; Gross y Harrison, 2019), con efectos menores del mantillo en la superficie.

La caracterización, y modelación, de la distribución del COS a profundidad puede ser hecha por métodos empíricos (Murphy, Wilson y Koen, 2019) o a través de modelos mecanicistas (Jenkinson y Coleman, 2008; Hilinski, 2001). Los modelos mecanicistas, tal como el RothC (Coleman y Jenkinson, 1996) y Century (Parton, Stewart y Cole, 1998), entre otros, usan ecuaciones cinéticas de orden uno y almacenes virtuales del C, que producen patrones asociados con ecuaciones exponenciales en el tiempo, que han sido extendidas a la distribución del COS a profundidad (Hilinski, 2001; Nakane, y Shinozaki, 1978).

El objetivo principal de este trabajo es explorar, en forma progresiva, el uso de modelos empíricos de la distribución vertical del COS, hasta fundamentarlos con bases teóricas para que sean congruentes con la cinética de distribución del C a profundidad y sus parámetros tengan bases sólidas, más allá de enfoques de alta significancia estadística, pero irrelevancia para los ciclos biogeoquímicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de Muestreo

Para caracterizar los patrones de la distribución del COS a profundidad se analizó una secuencia de perturbación en un bosque de encino (*Quercus* sp.): bosque de *Quercus* (BQR), bosque secundario o acahual de *Quercus* (BS), pastizal de más de 25 años de establecido (Pz) y agrícola con labranza tradicional de más de 15 años de establecido (Agt). Adicionalmente se consideró el análisis de la distribución vertical del COS en un bosque de *Abies*: bosque de *Abies* (BAR) y

bosque de *Abies* con un incendio ocurrido hace más de 15 años (BAq). Como contexto, se analizó un bosque de *Cupressus* (BCr). La letra *r* es para denotar un bosque de referencia (bosque no perturbado o con perturbación mínima) para tener un estándar de comparación. El área de ubicación de los sitios de muestreo está localizada en el monte Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México, México. El clima en la zona de estudio es semifrío subhúmedo en las partes altas, donde se localizan los bosques de *Abies*, *Cupressus* y *Quercus*, pastizal y acahual (INEGI, 2008).

Para tener un contexto del uso agrícola, se seleccionó un sitio de agricultura de conservación con más de 20-25 años de establecido (Agc) ubicado en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, planicie cercana al monte Tláloc, en Montecillo, Estado de México, con un clima templado (INEGI, 2008).

En el Cuadro 1 se presentan la localización, altitud y tipo de suelo de los sitios de muestreo analizados.

Datos Analíticos en los Perfiles de Suelos

En los sitios de muestreo se determinó la densidad aparente (DAP) con el método del cilindro, cada 10 cm hasta 1 m de profundidad. Se determinó el pH con un potenciómetro (Conductronic pH 20) y se analizó la textura con el método de la pipeta (Burt, 2004).

Para el análisis de los cambios por uso de suelo y profundidad, se determinó la concentración de carbono con un analizador de carbono TOC marca Shimadzu, modelo A5050.

En el caso del bosque de Encino de referencia (BQr) la profundidad máxima fue de 50 cm, al encontrarse

roca a esa profundidad. Para el sitio de agricultura tradicional (Agt) se encontró una capa endurecida a 70 cm de profundidad.

El número de repeticiones para la DAP y textura del suelo fue de tres y para el C se usaron dos repeticiones. En el Cuadro 2 se muestran los promedios de las mediciones realizadas en los suelos, a profundidades incrementales de 10 centímetros.

Modelos Empíricos de la Distribución Vertical del COS

Para el análisis y caracterización de la distribución vertical del COS asociado a diferentes usos del suelo, es práctica común ajustar diferentes funciones matemáticas y seleccionar la de menor error de estimación (Paz y Etchevers, 2016; Murphy *et al.*, 2019). En lo siguiente se presentan funciones utilizadas por diferentes autores en la modelación de la distribución del COS a profundidad (*Z*):

A1: Modelo exponencial (Bennema, 1975; Jobbágy y Jackson, 2000; Minasny, McBratney, Mendonça, Odeh y Guyon, 2006; Mishra *et al.*, 2009; Kempen, Brus y Stoorvogel, 2011; Chai *et al.*, 2015; Paz y Etchevers, 2016; Murphy *et al.*, 2019).

$$C = a \exp(-bZ) \quad (1)$$

A2: Modelo exponencial más constante (Arrouays y Pelissier, 1994; Bernoux, Arrouays, Cerri y Bourennane, 1998; Minasny *et al.*, 2006; Chai *et al.*, 2015; Murphy *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Ubicación y tipo de suelo de los sitios de estudio.
Table 1. Location and soil type of the study sites.

Sitio	Uso de suelo	Latitud N	Longitud O	Altitud (m)	Suelo
1	BAr (Abies)	19° 27' 05.3"	98° 45' 06.6"	2931	Luvisol
2	BCr (Cupressus)	19° 27' 45.5"	98° 45' 30.9"	3365	Luvisol
3	BQr (Quercus)	19° 26' 56.9"	98° 46' 17.0"	3192	Luvisol
4	BAq (Abies con incendio)	19° 27' 05.1"	98° 27' 05.1"	2968	Luvisol
5	Bs (acahual)	19° 26' 47.1"	98° 46' 35.2"	2962	Luvisol
6	Pz (pastizal)	19° 27' 47.6"	98° 45' 42.2"	3042	Luvisol
7	Agt (agrícola labranza tradicional)	19° 28' 08.8"	98° 46' 10.3"	2857	Phaozem
8	Agc (agrícola labranza de conservación)	19° 28' 04.8"	98° 53' 45.0"	2244	Vertisol

$$C = a \exp(-bZ) + c \quad (2)$$

A3: Modelo bi-exponencial (Murphy *et al.*, 2019).

$$C = a_1 \exp(-b_1 Z) + a_2 \exp(-b_2 Z) \quad (3)$$

A4: Modelo bi-exponencial más constante (Murphy *et al.*, 2019).

$$C = a_1 \exp(-b_1 Z) + a_2 \exp(-b_2 Z) + c \quad (4)$$

A5: Modelo lineal (Paz y Etchevers, 2016).

$$C = a - bZ \quad (5)$$

A6: Modelo logarítmico (Hiederer, 2009; Chai *et al.*, 2015; James, Devine, Harrison y Terry., 2014; Paz y Etchevers, 2016).

$$C = a - b \ln(Z) \quad (6)$$

A7: Modelo potencial (Bennema, 1975; Bernoux *et al.*, 1998; Jobbágy y Jackson, 2000; Minasny *et al.*, 2006; Chai *et al.*, 2015; Guillaume, Damris Y Kuzyakov, 2015; Paz y Etchevers, 2016; Bai *et al.*, 2016; Murphy *et al.*, 2019).

$$C = aZ^{-b} \quad (7)$$

A8: Modelo potencial más constante (Murphy *et al.*, 2019).

$$C = aZ^{-b} + c \quad (8)$$

A9: Modelo inverso lineal (Zhong y Qiguo, 2001; Paz y Etchevers, 2016; Murphy *et al.*, 2019).

$$C = \frac{a}{(1 + bZ)} \quad (9)$$

A10: Modelo inverso lineal potencial (varios autores japoneses, citado por Nakane y Shinozaki, 1978).

$$C = \frac{a}{(1 + bZ)^c} \quad (10)$$

En el caso del modelo inverso lineal, este ha sido formulado por Zhong y Qiguo (2001) y Paz y Etchevers (2016) como:

$$C = \frac{1}{(A + BZ)} = \frac{\frac{1}{A}}{\left[\frac{A + BZ}{A}\right]} = \frac{\left(\frac{1}{A}\right)}{\left[1 + \left(\frac{B}{A}\right)Z\right]} = \frac{a}{(1 + bZ)}$$

y, por Murphy *et al.* (2019) como:

$$C = \frac{A}{(1 + ABZ)} = \frac{a}{(1 + bZ)}$$

Esta representación muestra la relación entre los parámetros a y b del Modelo A9 (relación 9).

Para el modelo inverso lineal potencial, relación (10), Nakane y Shinozaki (1978) lo describen como:

$$C = \frac{1}{(A + BZ)^c} = \frac{\frac{1}{A^c}}{\left[\frac{A + BZ}{A}\right]^c} = \frac{\left(\frac{1}{A^c}\right)}{\left[1 + \left(\frac{B}{A}\right)Z\right]^c} = \frac{a}{(1 + bZ)^c}$$

Dos modelos adicionales, sujetos a la condición de $C = C_0$ cuando $Z = 0$, son el modelo sigmoide de Brantley, Bandstra, Moore y White (2008):

$$C = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{a - C_0}{C_0}\right) \exp(bZ)\right]} \quad (11)$$

y el modelo de Nakane (1976):

$$C = C_0 \exp\left(-\left[\frac{1}{a + bZ} + c\right]Z\right) \quad (12)$$

Análisis Estadísticos

Los ajustes de los modelos de la distribución vertical de la COS fueron evaluados usando una comparación entre lo medido () y lo estimado (), en función de su pendiente (t) e intersección o sesgo (s):

$$Y_{estimado} = s + t Y_{medido} \quad (13)$$

Adicional al uso del coeficiente de determinación R^2 , el ajuste estadístico de los modelos fue analizado usando la raíz del error cuadrático medio (RECM):

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (14)$$

Cuadro 2. Promedios de las mediciones hechas en los suelos de los sitios de estudio.
Table 2. Averages of the measurements made in the soils of the study sites.

Uso de suelo	Prof.	pH	C	Densidad aparente	Arena	Limo	Arcilla	Uso de suelo	Prof.	pH	C	Densidad aparente	Arena	Limo	Arcilla
	cm		g kg ⁻¹ suelo	g cm ⁻³	- - - - - % - - - - -				cm		g kg ⁻¹ suelo	g cm ⁻³	- - - - - % - - - - -		
BAr	0-10	6.6	59.2	0.88	27.2	23.5	49.3	BS	0-10	6.5	24.4 (0.3)	0.93	25.7	55.8	18.6
	10-20	6.6	31.2	0.90	27.5	23.4	49.1		10-20	6.3	32.5 (0.7)	0.82	81.9	1.5	16.5
	20-30	6.1	24.7	0.90	51.0	36.7	12.2		20-30	6.3	23.9 (0.2)	0.79	48.0	30.8	21.2
	30-40	6.5	15.6	1.10	58.6	20.0	21.4		30-40	6.3	15.9 (0.0)	0.83	18.2	67.3	14.5
	40-50	6.9	14.0	1.20	51.5	38.9	9.6		40-50	5.8	12.1 (0.4)	0.89	35.9	53.2	10.9
	50-60	7.1	11.6	1.14	46.4	49.8	3.8		50-60	6.3	6.7 (0.1)	1.07	46.7	27.4	25.9
	60-70	7.2	8.7	1.15	20.5	65.5	14.0		60-70	6.7	6.4 (0.0)	1.14	41.7	40.4	17.9
	70-80	7.2	4.0	1.25	33.9	50.9	15.2		70-80	6.8	6.1 (0.0)	1.12	44.3	49.6	6.0
	80-90	7.2	3.4	1.24	44.4	33.5	22.1		80-90	6.9	3.7 (1.2)	1.17	10.4	54.1	35.5
90-100	7.4	2.0	1.22	45.1	35.1	19.8	90-100	6.8	3.3 (0.8)	1.04	56.6	24.7	18.7		
BCr	0-10	7.5	96.8	0.61	9.6	68.5	21.9	Pz	0-10	6.1	42.9 (11.6)	0.83	40.3	46.5	13.2
	10-20	7.6	24.3	0.85	18.5	66.2	15.3		10-20	6.3	35.5 (6.4)	0.90	39.2	49.1	11.7
	20-30	6.1	20.5	0.95	20.2	63.2	15.0		20-30	5.6	30.2 (0.6)	0.90	35.4	56.6	8.1
	30-40	6.1	12.5	1.05	46.4	47.9	5.7		30-40	6.6	28.8 (0.2)	0.95	50.0	33.9	16.2
	40-50	6.1	10.3	0.98	20.7	65.6	13.7		40-50	6.6	22.9 (7.5)	1.17	44.8	39.3	15.8
	50-60	6.1	10.3	1.15	39	44.1	16.9		50-60	6.7	22.8 (7.6)	0.67	46.9	33.2	19.9
	60-70	6.1	9.3	1.07	36.7	34.3	29.0		60-70	7	14.7 (3.6)	0.70	51.6	28.8	19.7
	70-80	6.3	8.1	1.06	37.8	46.7	15.6		70-80	7	13.5 (0.5)	0.81	46.1	33.7	20.2
	80-90	6.2	5.7	1.15	50.7	31.1	18.2		80-90	7.3	3.0 (1.4)	0.95	37.3	34	28.8
90-100	6.1	4.3	1.14	49.6	35.5	15.0	90-100	7.5	2.4 (1.4)	1.01	40.6	33.1	26.4		
BQr	0-10	7.3	101.6	0.57	43.6	25.2	31.2	Agt	0-10	6.6	21.5 (1.5)	0.98	33.1	46.5	20.4
	10-20	7.2	54.4	0.81	61.8	18.4	19.7		10-20	6.6	19.8 (0.8)	1.00	27.1	53.1	19.7
	20-30	6.3	43.6	0.88	35.4	54	10.5		20-30	6.7	19.5 (1.0)	1.04	40.1	46.4	13.5
	30-40	6.2	36.7	0.90	39.3	50.4	10.3		30-40	7	16.1 (1.2)	1.01	27.2	50.0	22.7
	40-50	6.4	36.1	0.85	44.1	45.7	10.2		40-50	7.2	7.5 (1.0)	0.98	33.8	50.2	16.0
BAq	0-10	7.4	99.7	0.79	48.9	19.2	34.0	Agc	50-60	7.3	7.4 (0.6)	0.99	34.4	48.2	17.4
	10-20	7.8	41.4	0.77	64.4	12.9	22.7		60-70	7.4	3.4 (1.2)	0.96	31.1	47.4	21.5
	20-30	7.7	23.3	0.73	67.3	19.1	13.6		0-10	7.5	25.0 (3.9)	1.12	11.8	38.7	49.5
	30-40	7.5	19.4	0.52	58.9	10.3	30.8		10-20	7.6	20.8 (6.3)	1.08	6.4	45.3	48.3
	40-50	7.7	15.5	0.81	61.4	18.2	20.4		20-30	7.6	18.1 (4.8)	1.10	11.1	41.9	47.0
	50-60	7.5	12.3	0.71	62.9	5.2	32.0		30-40	7.7	17.7 (5.3)	0.88	9.4	34.2	56.3
	60-70	7.5	11.0	0.75	5.6	19.3	75.1		40-50	8	16.6 (6.0)	0.97	10.9	41	48.1
	70-80	7.5	10.3	0.81	50.6	7.4	42.0		50-60	7.7	16.2 (6.3)	0.98	12.0	44.5	43.5
	80-90	7.5	8.8	0.74	34.9	5.4	59.7		60-70	7.8	14.0 (3.9)	1.03	9.2	42.9	47.9
	90-100	7.4	8.3	0.78	45	4.3	50.7		70-80	7.8	12.4 (2.6)	0.96	5.1	49.9	45.0
								80-90	7.5	11.4 (1.7)	0.84	6.0	47.5	46.5	
								90-100	7.3	11.0 (1.7)	1.04	4.9	54	41.1	

Prof. = profundidad.

Prof. = depth.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución del COS en los Perfiles de los Suelo

Los perfiles de la distribución del COS para los diferentes usos del suelo están mostrados en la Figura 1.

La mayoría de los patrones son convexos (Figura 1), con excepción de Agt que es cóncavo. Los cambios de

los patrones convexos no lineales son diversos, por lo que se puede inferir que algunos modelos matemáticos no tendrán un buen ajuste. Asimismo, aparte de patrones no lineales, también hay patrones que se aproximan a un comportamiento lineal (Pz y Agc), por lo cual hay una diversidad aceptable de patrones para realizar ajustes experimentales a los diferentes usos del suelo y manejo.

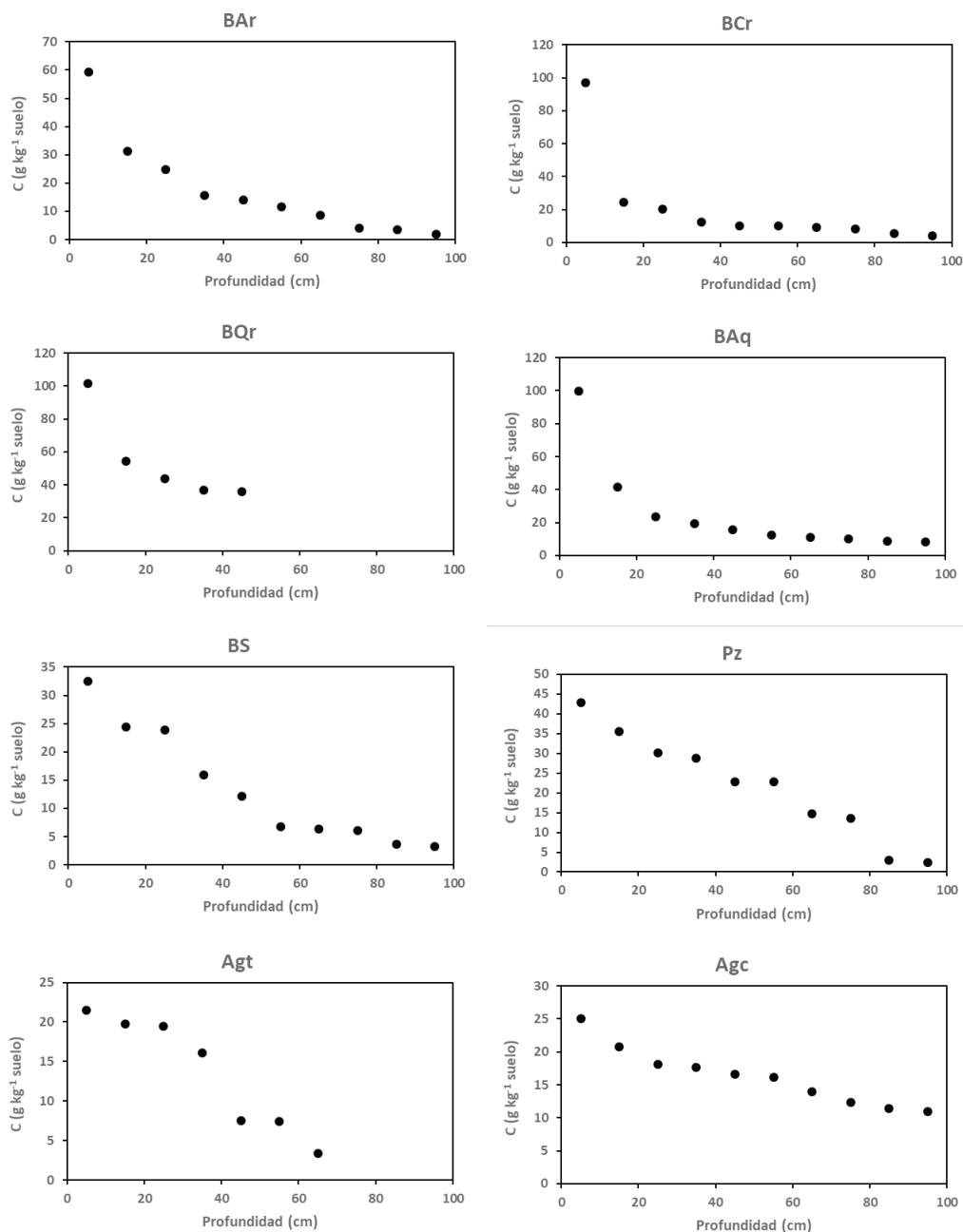


Figura 1. Patrones de la distribución del C en los perfiles de los suelos.

Figure 1. Patterns of C distribution in soil profiles.

De acuerdo con la tipología de formas de los perfiles de suelos planteada por Minasny, Stockmann, Hartemink y McBratney (2016), los perfiles de la Figura 1 representan los patrones gradacionales y no lineales (potencial y exponencial en términos de la tipología), aunque también el denominado frente de humedecimiento (relación 11) y abrupto (uso del suelo A_{gt}) pueden ser considerados. En el caso de usos de suelo agrícolas, las prácticas de labranza y erosión del suelo producen patrones abruptos, donde el perfil no lineal se presenta debajo de la profundidad de labranza (Meersmans, van Wesemael, De Ridder y van Molle, 2009; Kempen *et al.*, 2011; Guillaume *et al.*, 2015; Paz y Etchevers, 2016), por lo que es necesario asignar uno o varios valores de C (dependiendo del número de estratos) a la profundidad de labranza, además de la función inferior de distribución del COS.

Ajuste de los Modelos Empíricos de la Distribución Vertical del COS

Los modelos A1 a A10 fueron ajustados por regresión no lineal usando la función SOLVER^{MR} de Excel^{MR} en todos los casos, así como en los resultados

que se presentan más adelante. La estimación de los parámetros de las funciones matemáticas fue realizada minimizando la suma del error cuadrático de estimación.

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del ajuste estadístico de los diferentes modelos analizados, mostrando la RECM y R² resultantes, así como los parámetros *s* y *t*. Los ajustes fueron realizados sin imponer restricciones, de tal manera que los parámetros de las funciones de los modelos A1 a A10 tomarán valores de acuerdo al proceso de minimización del error de estimación.

Las tres mejores estimaciones del COS a diferentes profundidades de los diferentes usos del suelo: bi-exponencial más constante, potencial más constante e inverso lineal potencial (Figura 2). Los modelos ajustados muestran valores de R² > 0.979, por lo que, generalmente, estos resultados son considerados como suficientes para fines de selección de modelos empíricos de ajustes estadísticos. En el caso del modelo inverso lineal potencial hay un dato que diverge en las estimaciones e incrementa los errores de estimación (uso del suelo BAr), lo cual es discutido más adelante.

Cuadro 3. Resultados del ajuste por regresión no lineal de los modelos empíricos.
Table 3. Results of the non-linear regression adjustment of the empirical models.

Modelo	Representación	RECM	R ²	s	t
A1	$C = a \exp(-bZ)$	6.0916	0.9247	-0.2058	1.0367
A2	$C = a \exp(-bZ) + c$	2.9659	0.9791	0.4385	0.9665
A3	$C = a_1 \exp(-b_1Z) + a_2 \exp(b_2Z)$	4.3963	0.9593	-1.3771	1.0112
A4	$C = a_1 \exp(-b_1Z) + a_2 \exp(b_2Z) + c$	1.9352	0.9909	0.1967	0.9910
A5	$C = a - bZ$	10.9294	0.7118	5.8374	0.7023
A6	$C = a - b \ln(Z)$	7.5650	0.8618	2.9600	0.8522
A7	$C = aZ^{-b}$	5.8789	0.9243	0.4822	1.0050
A8	$C = aZ^{-b} + c$	2.6873	0.9826	0.4247	0.9749
A9	$C = \frac{a}{(1 + bZ)}$	9.6710	0.8622	-5.4652	1.0443
A10	$C = \frac{a}{(1 + bZ)^c}$	2.9301	0.9795	0.4361	0.9795

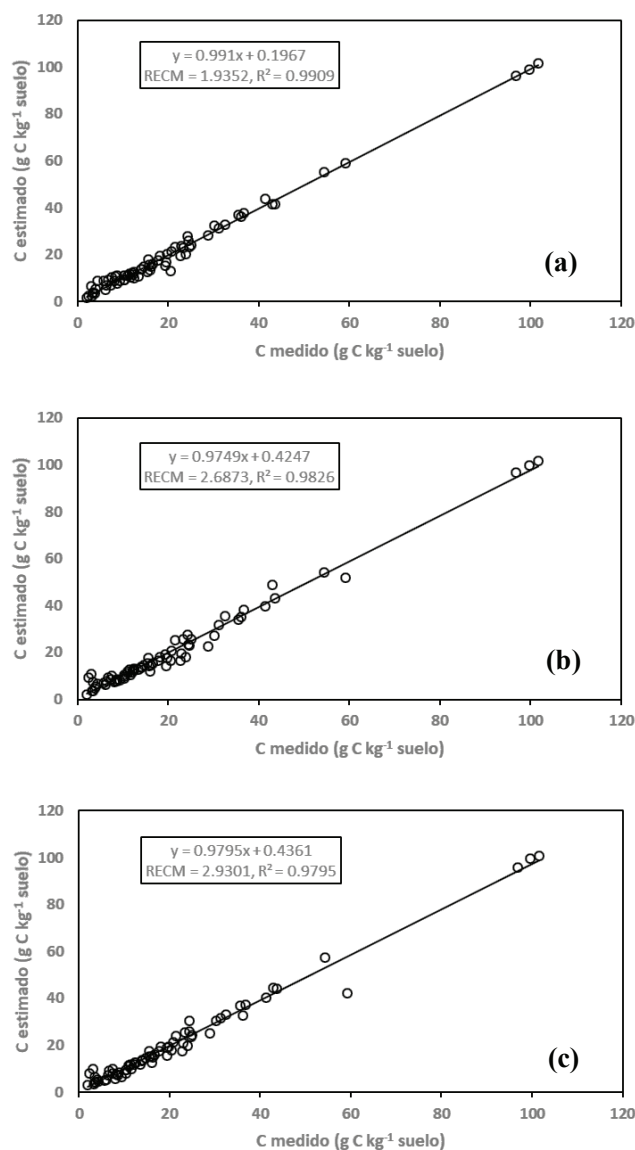


Figura 2. Resultados de los tres mejores ajustes estadísticas para COS a diferentes profundidades para los diferentes usos del suelo. (a) modelo bi-exponencial más constante, (b) modelo potencial más constante, y (c) modelo inverso lineal potencial.

Figure 2. Results of the three best statistical fits for SOC at different depths for the different land uses. (a) bi-exponential plus constant model, (b) potential plus constant model, and (c) linear inverse potential model.

Ajustes Empíricos Condicionados a Pasar por el Origen de la Profundidad

En el caso de los modelos logarítmicos y potenciales, el valor del COS tiende a infinito (modelos potenciales) o no está definido (modelo logarítmico) para el caso de $Z = 0$. Si se consideran profundidades de estratos

de 10 cm de espesor, podemos definir el valor de C_0 para el caso de $Z = 5$ cm (mitad del primer estrato), de tal manera que la profundidad estará definida por $Z_0 = Z - 5$. Para los modelos logarítmicos y potenciales, para evitar el problema en el origen de Z_0 , se utilizó el valor $Z_0 + 1$ (el logaritmo de cero no está definido) para definir el origen de la profundidad.

El Cuadro 4 muestra los resultados del ajuste de los modelos condicionados a $Z_0 = 0$, donde se observa que algunos valores tienen errores de estimación altos, producto de los ajustes al uso del suelo BAR, tal como es el caso del modelo potencial mostrado en la Figura 3.

La Figura 4 muestra los resultados de las estimaciones de los tres mejores modelos: bi-exponencial con constante, inverso lineal potencial y exponencial más constante.

Se observa de la Figura 4 que el modelo inverso lineal potencial y modelo exponencial más constante tienen el error de estimar el valor de C_0 del uso del suelo BAR, tal como el caso del modelo potencial mostrado en la Figura 3, por lo que ambos modelos son atractivos como selección del mejor, dado que tienen menos parámetros que el bi-exponencial más constante.

Ajustes Empíricos con Condicionamiento General

Aparte del condicionamiento de $Z_0 = 0$, para que tengan sentido biofísico, los modelos deben cumplir con $C(Z_0 = 0) = C_0$. Otro límite necesario es que cuando la profundidad tiende a infinito, el valor del COS debe ser C_∞ o 0. El condicionamiento de los ajustes estadísticos a los valores de C en los límites (estrato más superior y estrato más inferior) ha sido usado por Arrouays y Pelissier (1994) y Bernoux *et al.* (1998) para ajustar el modelo exponencial.

Para tener un significado claro de los parámetros de los modelos, las constantes b de los Cuadros 3 y 4 deben ser cambiadas por k , para denotar tasas de reacción con relación a la profundidad.

Bajo la consideración de procesos de transporte y de descomposición constantes con relación a la profundidad, se puede establecer una solución analítica para la distribución vertical del COS (O'Brien y Stout, 1978; Nakane y Shinozaki, 1978; Rosenbloom, Doney y Schimel, 2001) para definir el modelo mono-exponencial (un solo almacén) que es la base del uso de este modelo en los ajustes estadísticos (Russell y Moore, 1968; Minasny *et al.*, 2006 y 2016; Kempen *et al.*, 2011):

Cuadro 4. Resultados del ajuste por regresión no lineal de todos los modelos empíricos, condicionados a $Z_0 = 0$.
Table 4. Results of the nonlinear regression adjustment of all the empirical models, conditioned to $Z_0 = 0$.

Modelo	Representación	RECM	R ²	s	t
B1	$C = a \exp(-bZ_0)$	5.3458	0.9377	-0.9914	0.9792
B2	$C = a \exp(-bZ_0) + c$	2.9659	0.9791	0.4385	0.9665
B3	$C = a_1 \exp(-b_1Z_0) + a_2 \exp(b_2Z_0)$	4.3963	0.9593	-1.3771	1.0112
B4	$C = a_1 \exp(-b_1Z_0) + a_2 \exp(b_2Z_0) + c$	1.9248	0.9910	0.1946	0.9910
B5	$C = a - bZ_0$	10.9294	0.7118	5.8374	0.7023
B6	$C = a - b \ln(Z_0 + 1)$	4.6528	0.9478	0.9713	0.9583
B7	$C = a(Z_0 + 1)^{-b}$	21.1615	0.5675	-0.7927	1.1665
B8	$C = a(Z_0 + 1)^{-b} + c$	3.4477	0.9715	0.4469	0.9843
B9	$C = \frac{a}{(1 + bZ_0)}$	10.5540	0.7318	5.3840	0.7568
B10	$C = \frac{a}{(1 + bZ_0)^c}$	2.7635	0.9816	0.6073	0.9644

$$C = C_0 \exp(-kZ_0) \quad (15)$$

Adicionalmente se puede considerar un modelo mono-exponencial más almacén inerte (C_∞) que permanece constante (no se descompone), definido por (Hilinski, 2001; Sleutel, De Neve y Hofman, 2003; Minasny *et al.*, 2006; Meersmans *et al.*, 2009; Ottoy *et al.*, 2016; Hobley y Wilson, 2016; Murphy *et al.*, 2019):

$$C = (C_0 - C_\infty) \exp(-kZ_0) + C_\infty \quad (16)$$

En esta perspectiva, se puede considerar un modelo con dos almacenes (modelo bi-exponencial), definido como:

$$C = C_0 [p \exp(-k_1Z_0) + (1 - p) \exp(-k_2Z_0)] \quad (17)$$

donde: p es la proporción de C_0 para el almacén 1 del COS. El modelo de la relación (17) representa reacciones en paralelo de los ingresos a los almacenes, pero también puede representar reacciones en serie o con interacciones entre los almacenes del COS (Manzoni *et al.*, 2012).

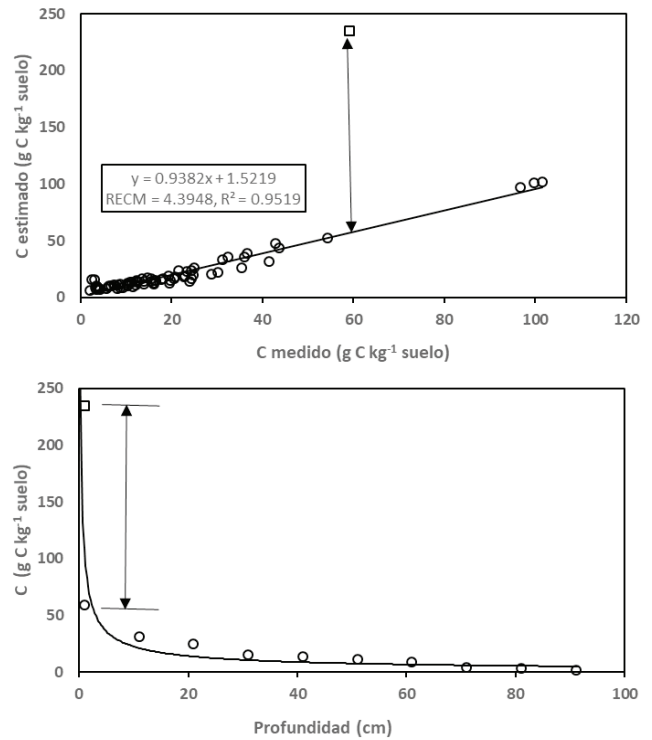


Figura 3. Resultado del ajuste y estimaciones del modelo potencial condicionado.

Figure 3. Result of the fit and estimates of the conditioned potential model.

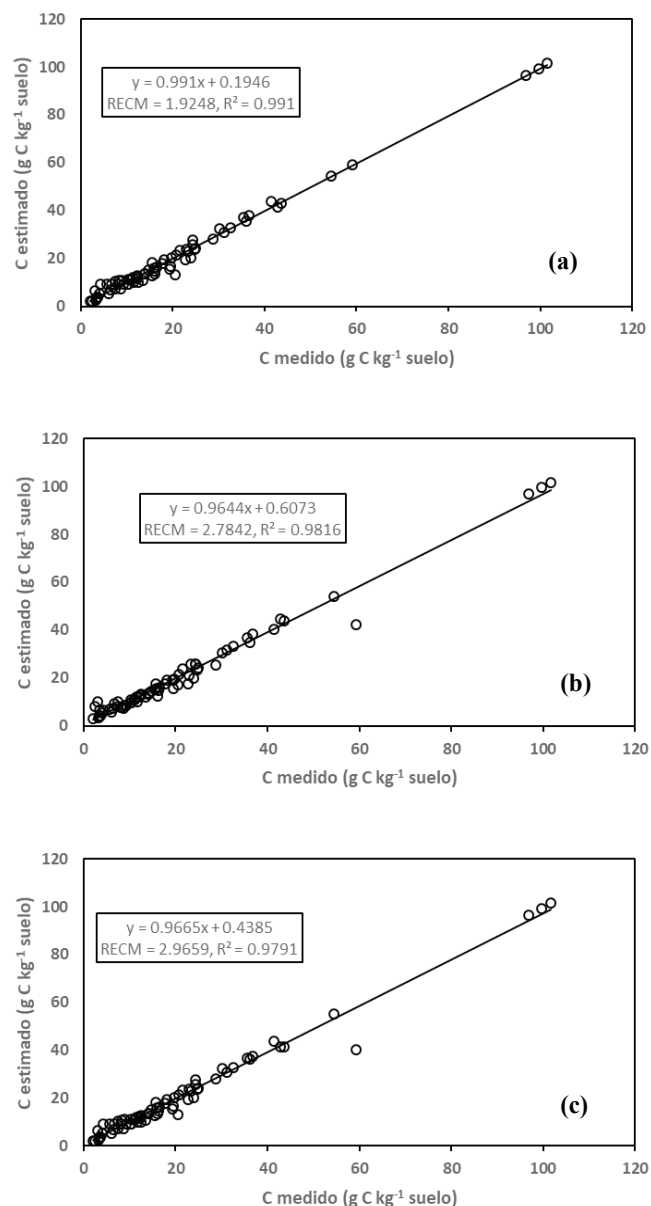


Figura 4. Mejores tres estimaciones del COS a profundidad para los diferentes usos del suelo, condicionados a $Z_0 = 0$. (a) modelo bi-exponencial más constante, (b) modelo inverso lineal potencial, y (c) modelo exponencial más constante.

Figure 4. Best three estimates of COS at depth for the different land uses, conditional on $Z_0 = 0$. (a) bi-exponential plus constant model, (b) inverse linear power model, and (c) exponential plus constant model.

El modelo bi-exponencial puede ser expandido para considerar un almacén inerte (modelo bi-exponencial más almacén inerte), definido como:

$$C = C_0[p\exp(-k_1Z_0) + (1 - p)\exp(-k_2Z_0)] + C_\infty \quad (18)$$

Al igual que el caso del modelo exponencial, la parametrización de los modelos analizados previamente puede ser hecha para el cumplimiento de las condiciones de frontera impuestas, tal como se muestra en el Cuadro 5.

Condicionando los ajustes de regresión no lineal a $C = C_0$ (estrato más superior) cuando $Z_0 = 0$ (C_0 no es un parámetro de estimación), en el Cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos.

Los tres mejores modelos fueron: bi-exponencial con almacén inerte, sigmoide y bi-exponencial (Cuadro 5). Los resultados para el modelo sigmoide resultan algo sorprendentes, dados los patrones mostrados en la Figura 1, por lo que este modelo tiene buena flexibilidad para ajustarse a patrones más allá de un sigmoide puro.

La Figura 5 muestra las estimaciones de los ajustes de los tres mejores modelos para el caso del condicionamiento de $C = C_0$ para $Z_0 = 0$.

El condicionamiento introducido permite definir bases fisicoquímicas para la interpretación de los parámetros de los modelos analizados, pero sujetos a ajustes por regresión no lineal de los mismos. En el Cuadro 6 se muestran los parámetros de los tres mejores modelos, para cada uso del suelo analizado. En el caso del modelo sigmoide, los parámetros muestran valores positivos y negativos de a y k que resultan difíciles de interpretar sin considerar un modelo de distribución vertical del COS. El modelo bi-exponencial más almacén inerte tiene valores negativos para C_∞ , por lo que su ajuste es artificio de la regresión no lineal. Finalmente, el modelo bi-exponencial muestra patrones contrarios para los usos del suelo BAr y Agc, dado que el almacén 1 es más lábil (se descompone más fácilmente) que el almacén 2, por lo que sus parámetros son resultados de la regresión no lineal. En resumen, aunque los modelos tienen ajustes experimentales altamente significativos ($R^2 > 0.99$), estos muestran incongruencias en sus parámetros.

Modelo Alternativo Generalizado

Si se considera un enfoque de análisis de patrones (ajuste de los modelos) para encontrar un mecanismo común que los genere, en el Cuadro 7 se observa que los modelos lineal, exponencial, inverso lineal e inverso lineal potencial compiten en los resultados de errores mínimos de estimación (RECM) para algunos usos del suelo, por lo que pueden ser considerados como viables.

Cuadro 5. Resultados del ajuste por regresión no lineal de los modelos empíricos, condicionados a $C = C_0$ cuando $Z_0 = 0$.
Table 5. Results of the non-linear regression adjustment of the empirical models, conditioned to $C = C_0$ when $Z_0 = 0$.

Modelo	Representación	C para $Z_0 = 0$	C para $Z_0 = \infty$	RECM	R ²	s	t
C1	$C = C_0 \exp(-kZ_0)$	C_0	0	5.4446	0.9336	-0.5099	0.9985
C2	$C = (C_0 - C_\infty) \exp(-kZ_0) + C_\infty$	C_0	C_∞	2.1810	0.9886	0.1204	0.9965
C3	$C = C_0 [p \exp(-k_1 Z_0) + (1-p) \exp(k_2 Z_0)]$	C_0	0	1.9336	0.9910	0.3143	0.9839
C4	$C = (C_0 - C_\infty) [p \exp(-k_1 Z_0) + (1-p) \exp(k_2 Z_0)] + C_\infty$	C_0	C_∞	1.3378	0.9957	0.0691	0.9979
C5	$C = C_0 - kZ_0$	C_0	$-\infty Z_0 = C_0/k$ para $C = 0$	17.5652	0.6449	2.7978	1.1061
C6	$C = C_0 - k \ln(Z_0 + 1)$	C_0	$-\infty Z_0 = \exp(C_0/k) - 1$ para $C = 0$	5.0278	0.9408	0.3240	0.9836
C7	$C = C_0 (Z_0 + 1)^{-k}$	C_0	0	4.7448	0.9465	1.7747	0.9175
C8	$C = (C_0 - C_\infty) (Z_0 + 1)^{-k} + C_\infty$	C_0	C_∞	3.5705	0.9696	0.5994	0.9565
C9	$C = \frac{C_0}{(1 + kZ_0)}$	C_0	0	15.3623	0.6508	3.0828	1.0077
C10	$C = \frac{C_0}{(1 + kZ_0)^c}$	C_0	0	2.0651	0.9897	0.3729	0.9827
C11	$C = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{a - C_0}{C_0}\right) \exp(kZ_0)\right]}$	C_0	0	1.7700	0.9925	-0.0461	1.0033
C12	$C = C_0 \exp\left(-\left[\frac{1}{a + kZ_0} + c\right] Z_0\right)$	C_0	0	3.6990	0.9713	-1.2632	1.0257

Dados los resultados del Cuadro 7, se puede plantear que los modelos son soluciones de una ecuación de cinética definida por:

$$\frac{dC}{dZ} = -k_n C^n \quad (19)$$

que es una reacción de cinética de orden n , con tasa de reacción k_n . Los modelos exponenciales, y la gran mayoría de los modelos mecanicistas (Manzoni *et al.*, 2012), son de orden $n = 1$, por lo que los patrones de la relación (19) difieren de este tipo de reacciones y los generaliza.

La solución a la relación (19), para diferentes valores de n está mostrada en muchos libros de cinética de reacciones (p. ej.: El Seoud, Baader y Bastos, 2016):

$$\frac{1}{C^{n-1}} = \frac{1}{C_0^{n-1}} + k_n (n-1) C \quad (20)$$

que es válida para $n \neq 1$, la cual puede ser formulada en términos de C como:

$$C = \frac{C_0}{\left[1 + k_n C_0^{n-1} (n-1) Z\right]^{\frac{1}{n-1}}} \quad (21)$$

donde $C = C_0$ corresponde al caso de $Z = 0$.

Para el caso $n = 1$, se tiene:

$$\frac{dC}{dZ} = -k_1 C \quad (22)$$

cuya solución es:

$$C = C_0 \exp(-k_1 Z) \quad (23)$$

Finalmente, para el caso $n = 2$ se tiene:

$$\frac{dC}{dZ} = -k_2 C^2 \quad (24)$$

Cuya solución es:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} - k_2 Z \quad (25)$$

que puede ser puesta en función de C como:

$$C = \frac{C_0}{1 + k_2 C_0 Z} \quad (26)$$

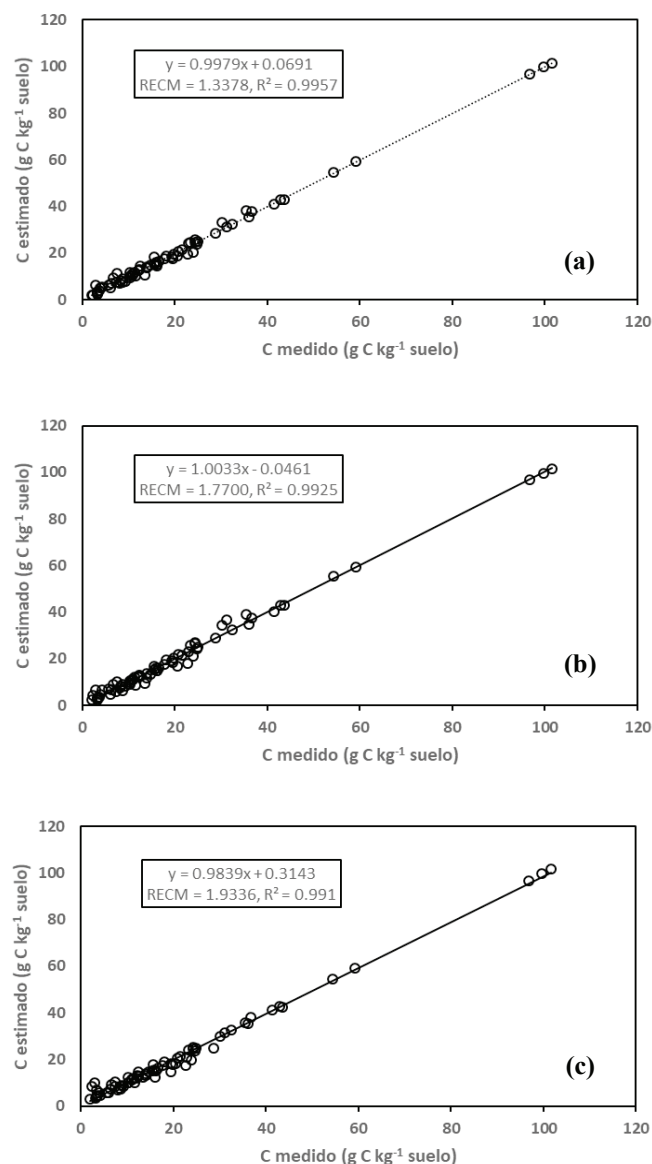


Figura 5. Mejores tres estimaciones del COS a profundidad para los diferentes usos del suelo, condicionados a $C_0 = 0$ cuando $Z_0 = 0$. (a) modelo bi-exponencial más almacén inerte, (b) modelo sigmoide, y (c) modelo bi-exponencial.

Figure 5. Best three estimates of SOC at depth for the different land uses, conditional on $C_0 = 0$ when $Z_0 = 0$. (a) bi-exponential model plus buffer, (b) sigmoid model, and (c) bi model -exponential.

El modelo de cinética de orden n de la relación (19) produce los modelos del Cuadro 7, por lo que resulta interesante de evaluar, además de que define las relaciones entre los parámetros de los modelos.

La Figura 6a muestra los resultados de las estimaciones para el modelo de la relación (21), donde sus parámetros, dejando fijo $C = C_0$ para $Z_0 = 0$, fueron

ajustados por regresión no lineal. Los ajustes resultaron mejores usando el modelo de la relación (21) que el uso de los parámetros k y c del Cuadro 5. Esto plantea que el uso de las regresiones estadísticas clásicas como medio de ajuste de modelos, en forma empírica y sin bases biofísicoquímicas, sin privilegiar el conocimiento, puede generar ajustes estadísticos “significativos”, pero irrelevantes.

Bajo la consideración que k_n tiene valores cercanos a cero en muchos usos del suelo, en la Figura 6b se muestra la relación entre el orden n y $\exp(k_n)$, que muestra un límite superior de 1.0. La Figura 6b muestra que para la secuencia de perturbación del bosque de encino (BQr, BS, Pz y Agt), los estados perturbados (BS, Pz y Agt) tienen valor de $\exp(k_n)$ menores a 1.0 y ordenes con $n \leq 1.0$. El caso de BA_r y BA_q ($n > 1$), $\exp(k_n)$ tiende a 1.0, y BA_q tienen un orden n mayor que BA_r, mostrando un estado de sucesión mejor (n mayor). En lo particular, el caso de la agricultura de conservación (Agc), su estado es similar al de los bosques de referencia (sin perturbaciones).

En lo general, de acuerdo a la Figura 6, la relación entre $\exp(k_n)$ y n refleja el nivel de perturbación (cambio de uso del suelo o prácticas de manejo) de los usos del suelo, definiendo patrones de la distribución del COS a profundidad que pueden ser interpretados en forma clara, a diferencia de los mejores modelos previos, donde la relación entre sus parámetros no está claramente definida, resultando difícil de interpretar.

En la Figura 7 se muestra las relaciones entre los diferentes usos del suelo y el orden n y tasa de reacción k_n . Para la secuencia de perturbación del bosque de encino, todo el perfil, el orden n disminuye y la tasa de reacción k_n se incrementa a medida que el nivel de perturbación aumenta.

Discusión

La modelación de la distribución vertical del carbono orgánico de los suelos (COS), hasta un metro de profundidad, ha sido analizada en forma progresiva desde una visión empírica a una de modelación general, basada en el análisis de los patrones observados para diferentes usos del suelo y los modelos ajustados por regresión no lineal. El ejercicio realizado pone en relevancia la necesidad de orientar la caracterización de los patrones del COS hacia esquemas de ajustes estadísticos fundamentados en el conocimiento, y no solo ajustes empíricos de modelos matemáticos, de

Cuadro 6. Parámetros de los tres modelos con mejor ajuste estadístico.
Table 6. Parameters of the three models with the best statistical adjustment.

Uso del suelo	Bi-exponencial			Bi-exponencial más almacén inerte			Sigmoide		
	p	k_1	k_2	C_∞	p	k_1	k_2	a	k
BAr	0.2876	2.3466	0.0290	-2.9512	0.3068	1.2828	0.0237	-70.1579	0.0289
BCr	0.2749	0.0195	0.3310	4.1884	0.3090	0.0339	1.8188	5.1464	-0.0157
BQr	0.4405	0.0059	0.1515	33.6657	0.6885	0.0808	1.4231	30.8274	-0.0453
BAq	0.2493	0.0129	0.1354	4.5854	0.2547	0.0214	0.1433	2.6236	-0.0041
BS	0.5114	0.0250	0.0250	-2.6563	0.5401	0.0214	0.0214	72.0171	0.0348
Pz	0.5180	0.0180	0.0180	-1.2289	6.4884	0.0017	0.0000	52.5647	0.0432
Agt	0.5585	0.0186	0.0186	2.9797	11.2050	-0.0072	-0.0088	22.3129	0.0858
Agc	0.8861	0.0078	0.2723	-737.8530	0.0052	0.1775	0.0002	3.5637	-0.0025

las dinámicas implícitas, o no, de la distribución del COS a profundidad, como un paso al desarrollo de modelos generales que se orienten a patrones múltiples (soluciones) de una misma dinámica o cinética de reacción.

Los perfiles de suelos con niveles bajos de perturbación, como los bosques de referencia, muestran valores del orden $n > 1$, asociados a tasas de reacción k_n cercanas a cero (poco cambio), que reflejan que la curvatura (orden n) de la distribución vertical del carbono predomina, mostrando condiciones de estabilidad que caracteriza la evolución del COS de estos usos del suelo. Los bosques, al sufrir perturbaciones, reducen su orden n e incrementan la tasa de reacción

k_n , para caracterizar patrones transitorios asociados a usos del suelo no bosque (p. ej. agrícola o pastizal) o bosque degradado.

Para el caso de uso agrícola del suelo, la agricultura de conservación muestra perfiles de distribución del COS similares a la de los bosques de referencia (sin perturbación), diferenciados de los patrones de la agricultura tradicional.

El modelo de cinética de orden n , rompe los esquemas de modelación tradicionales de cinéticas de orden uno y múltiples almacenes (Paustian, Collins y Paul, 2019; Manzoni *et al.*, 2012), al considerar un solo almacén, pero con cinética de orden n variable, asociado al uso del suelo y su manejo.

Cuadro 7. RECM de algunos modelos para la condición $C = C_0$ para $Z_0 = Z$.
Table 7. RECM of some models for the condition $C = C_0$ for $Z_0 = Z$.

Uso del suelo	$C = C_0 - kZ_0$	$C = C_0 \exp(-kZ_0)$	$C = \frac{C_0}{(1 + kZ_0)}$	$C = \frac{C_0}{(1 + kZ_0)^c}$
BAr	12.85	6.18	2.58	1.96
BCr	32.25	7.72	29.51	1.53
BQr	16.03	8.72	13.43	0.93
BAq	29.32	7.47	26.64	0.92
BS	3.92	1.62	3.39	1.64
Pz	2.23	3.65	2.06	3.71
Agt	2.66	2.72	2.57	2.97
Agc	1.65	0.83	1.33	0.77

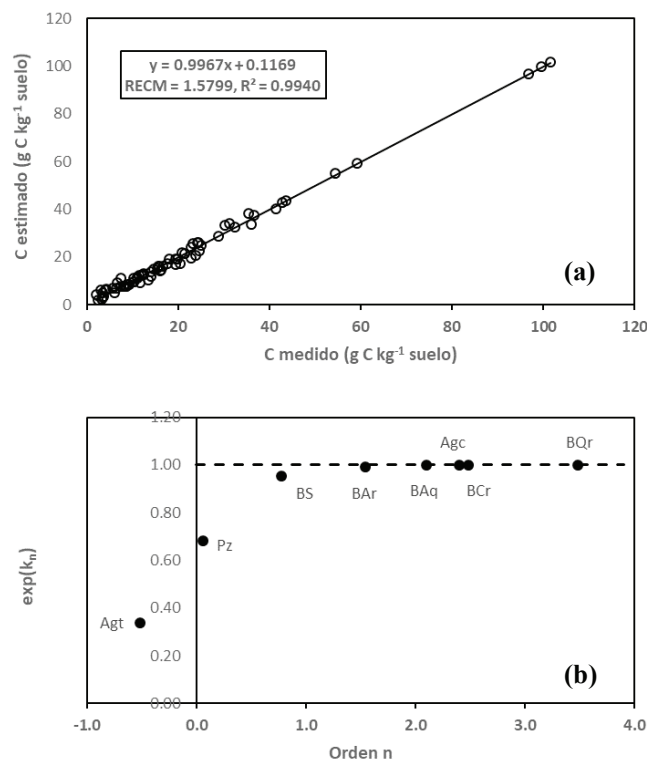


Figura 6. Resultados del ajuste del modelo de la relación (21). (a) estimaciones para los diferentes usos del suelo y (b) relación entre el orden n y $\exp(k_n)$.

Figure 6. Results of the fit of the relationship model (21). (a) estimates for the different land uses and (b) relationship between order n and $\exp(k_n)$.

El orden n y la tasa de reacción k_n están relacionados entre sí, definiendo patrones regulares para caracterizar el grado de perturbación de los suelos asociados a diferentes usos del suelo, de tal manera que estas “firmas” de la distribución vertical del COS, como un solo almacén, pueden ser usados para caracterizar la dinámica vertical (y horizontal) del carbono.

CONCLUSIONES

El enfoque metodológico discutido en este trabajo plantea una reconsideración a los enfoques clásicos de caracterizar la distribución vertical del carbono orgánico en los suelos (COS) al pasar de ejercicios meramente empíricos de ajustes estadísticos a los patrones observados, al desarrollo de esquemas de modelación progresiva basada en la introducción de parámetros biofísicoquímicos relevantes a la dinámica

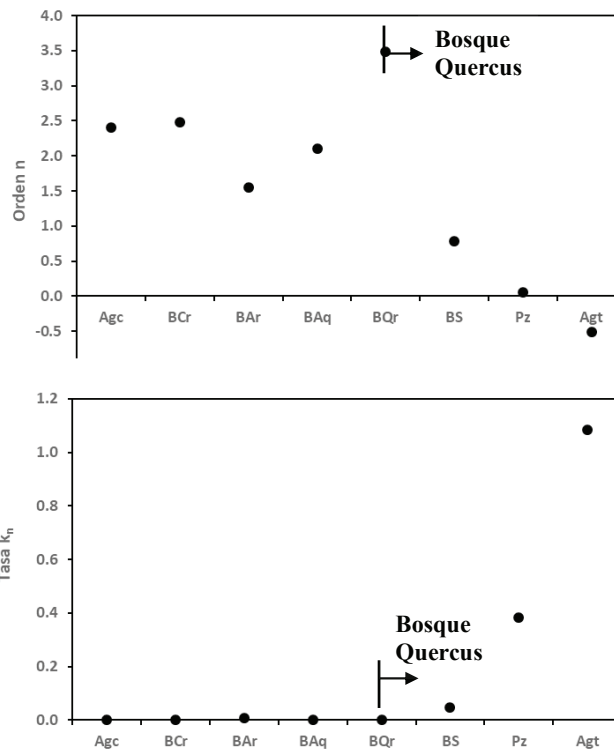


Figura 7. Relación entre el orden n y la tasa k_n para los diferentes usos del suelo.

Figure 7. Relationship between order n and rate k_n for different land uses.

del COS a profundidad. La estadística es usada como un medio de análisis de la viabilidad de los modelos, no como criterio de selección del mejor modelo ajustado, bajo la óptica de que no es suficiente que los modelos tengan un error de estimación mínimo, si no que es necesario obtener las respuestas correctas por las razones correctas (Kirchner, 2006).

El modelo de cinética de orden n variable introducido se ajustó bien ($R^2 > 0.99$) a los datos experimentales de diferentes usos del suelo, con parámetros que pueden ser asociados a la perturbación (estabilidad) de la distribución vertical del COS en los suelos.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles de los autores previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y diseño: E.B.B y F.P.P. Protocolo de laboratorio y supervisión: C.H.M y F.P.P. Revisión resultados: A.V.R. Escritura: F.P.P., E.B.B. y A.V.R. Revisión manuscrito: J.E.B., C.H.M. y A.V.R.

LITERATURA CITADA

- Adams, A. B., Harrison, R. B., Sletten, R. S., Strahm, B. D., Turnblom, E. C., & Jensen, C. M. (2005). Nitrogen-fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 313-325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.018>
- Arrouays, D., & Pelissier, P. (1994). Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 157(3), 185-192.
- Bai, J., Zhang, G., Zhao, Q., Lu, Q., Jia, J., Cui, B., & Liu, X. (2016). Depth-distribution patterns and control of soil organic carbon in coastal salt marshes with different plant covers. *Scientific Reports*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep34835>
- Bennema, J. (1975). Organic carbon profiles in oxisols. *Pedologie*, 4(2), 119-146.
- Bernal, B., McKinley, D. C., Hungate, B. A., White, P. M., Mozdzer, T. J., & Megonigal, J. P. (2016). Limits to soil carbon stability; Deep, ancient soil carbon decomposition stimulated by new labile organic inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 98, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.007>
- Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C. C., & Bourennane, H. (1998). Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon (Rondonia). *Soil Science*, 163(12), 941-951. <https://doi.org/10.1097/00010694-199812000-00004>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). Nitrogen and sulfur economy of soils. In N. C. Brady, & R. R. Weil. (2008) *The nature and properties of soil* (pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ. USA: Prentice-Hall.
- Brantley, S. L., Bandstra, J., Moore, J., & White, A. F. (2008). Modelling chemical depletion profiles in regolith. *Geoderma*, 145(3-4), 494-504. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.02.010>
- Burt, R. (2004). *Soil survey laboratory methods manual*. Soil survey investigations report no. 42, version 4.0. Washington, DC, USA: NRCS-USDA.
- Chai, H., Yu, G., He, N., Wen, D., Li, J., & Fang, J. (2015). Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems. *Chinese Geographical Science*, 25(5), 549-560. <https://doi.org/10.1007/s11769-015-0756-z>
- Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In D. S. Powlson, P. Smith, & J. U. Smith (Eds.). *Evaluation of soil organic matter models* (pp. 237-246). Heidelberg, Berlin: Springer.
- Diochon, A. C., & Kellman, L. (2009). Physical fractionation of soil organic matter: Destabilization of deep soil carbon following harvesting of a temperate coniferous forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G1). <https://doi.org/10.1029/2008JG000844>
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Japan: IPCC.
- El Seoud, O. A., Baader, W. J., & Bastos, E. L. (2016). Practical chemical kinetics in solution. In Z. Wang, U. Wille, & E. Juaristi (Eds). *Encyclopedia of physical organic chemistry* (pp. 1-68). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118468586.epoc1012>
- Fang, C. M., Smith, P., Moncrieff, J. B., & Smith, J. U. (2005). Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 433, 57-59. <https://doi.org/10.1038/nature03138>
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(7167), 277-280. <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Gross, C. D., & Harrison, R. B. (2019). The case for digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 3(2), 28. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Guillaume, T., Damris, M., & Kuzyakov, Y. (2015). Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by $\delta^{13}\text{C}$. *Global Change Biology*, 21(9), 3548-3560. <https://doi.org/10.1111/gcb.12907>
- Harrison, R. B., Footen, P. W., & Strahm, B. D. (2011). Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change. *Forest Science*, 57(1), 67-76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/57.1.67>
- Hilinski, T. E. (2001). *Implementation of exponential depth distribution of organic carbon in the CENTURY model*. Fort Collins, CO, USA: Department of Soil and Crop Sciences Colorado State University Fort Collins.
- Hiederer, R. (2009). *Distribution of organic carbon in soil profile data*. Italy: JCR-IES.
- Hobley, E. U., & Wilson, B. (2016). The depth distribution of organic carbon in the soils of eastern Australia. *Ecosphere*, 7(1), e01214. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1214>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 00 000*. Unidades climáticas. Consultado el 03 febrero, 2017, desde <http://www.bela.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>

- Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., & Piñeiro, G. (2017). The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419-445. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>
- James, J., Devine, W., Harrison, R., & Terry, T. (2014). Deep soil carbon: quantification and modeling in subsurface layers. *Soil Science Society of America Journal*, 78(S1), S1-S10. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0245nafsc>
- Jenkinson, D. S., & Coleman, K. (2008). The turnover of organic carbon in subsoils. Part 2. Modelling carbon turnover. *European Journal of Soil Science*, 59(2), 400-413. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01026.x>
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1), 51-77. <https://doi.org/10.1023/A:1010760720215>
- Kempen, B., Brus, D. J., & Stoorvogel, J. J. (2011). Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma*, 162(1-2), 107-123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.010>
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42(3), W03S04. <https://doi.org/10.1029/2005WR004362>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R. (2009). Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, 60(2), 158-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 88, 35-66. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88002-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88002-2)
- Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 426-445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- Manzoni, S., Piñeiro, G., Jackson, R. B., Jobbágy, E. G., Kim, J. H., & Porporato, A. (2012). Analytical models of soil and litter decomposition: solutions for mass loss and time-dependent decay rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.029>
- Meersmans, J., van Wesemael, B., De Ridder, F. A., & van Molle, M. (2009). Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 152(1-2), 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.015>
- Minasny, B., McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M., Odeh, I. O. A., & Guyon, B. (2006). Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Soil Research*, 44(3), 233-244. <https://doi.org/10.1071/SR05136>
- Minasny, B., Stockmann, U., Hartemink, A. E., & McBratney, A. B. (2016). Measuring and modelling soil depth functions. In: A. Hartemink, & B. Minasny. (Eds.). *Digital soil morphometrics. Progress in soil science* (pp. 225-240). Heidelberg, Berlin: Springer,
- Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., & Van Meirvenne, M. (2009). Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 614-621. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0410>
- Murphy, B. W., Wilson, B. R., & Koen, T. (2019). Mathematical functions to model the depth distribution of soil organic carbon in a range of soils from New South Wales, Australia under different land uses. *Soil Systems*, 3(3), 46. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3030046>
- Nakane, K. (1976). An empirical formulation of the vertical distribution of carbon concentration in forest soils. *Japanese Journal of Ecology*, 26(3), 171-174. https://doi.org/10.18960/seitai.26.3_171
- Nakane, K., & Shinozaki, K. (1978). A mathematical model of the behavior and vertical distribution of organic carbon in forest soils. *Japanese Journal of Ecology*, 28(2), 111-122. https://doi.org/10.18960/seitai.28.2_111
- O'brien, B. J., & Stout, J. D. (1978). Movement and turnover of soil organic matter as indicated by carbon isotope measurements. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(4), 309-317. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90028-7)
- Ottoy, S., Elsen, A., Van De Vreken, P., Gobin, A., Merckx, R., Hermy, M., & Van Orshoven, J. (2016). An exponential change decline function to estimate soil organic carbon stocks and their changes from topsoil measurements. *European Journal of Soil Science*, 67(6), 816-826. <https://doi.org/10.1111/ejss.12394>
- Parton, W. J., Stewart, J. W., & Cole, C. V. (1988). Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 5(1), 109-131. <https://doi.org/10.1007/BF02180320>
- Paustian, K., Collins, H. P., & Paul, E. A. (2019). Management controls on soil carbon. In E. A. Paul, E. T. Elliott, K. Paustian, & C. V. Cole (Eds). *Soil organic matter in temperate agroecosystems* (pp. 15-49). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Paz, F., & Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Paz-Pellat, F., Argumedo-Espinoza, J., Cruz-Gaistardo, C. O., Etchevers-Barra, J. D., & de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 289-310.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., ... Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Japan: IAEA.
- Pries, C. E. H., Sulman, B. N., West, C., O'Neill, C., Poppleton, E., Porras, R. C., ... & Torn, M. S. (2018). Root litter decomposition slows with soil depth. *Soil Biology and Biochemistry*, 125, 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.07.002>

- Rosenbloom, N. A., Doney, S. C., & Schimel, D. S. (2001). Geomorphic evolution of soil texture and organic matter in eroding landscapes. *Global Biogeochemical Cycles*, *15*(2), 365-381. <https://doi.org/10.1029/1999GB001251>
- Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and soil*, *338*(1), 143-158. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>
- Russell, J. S., & Moore, A. W. (1986). Comparison of different depth weightings in the numerical analysis of anisotropic soil profile data. In *Transactions, 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, Australia, 1968* (pp. 205-213). Sydney, Australia: International Society of Soil Science and Angus and Robertson.
- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, *5*(1), 81-91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., ... Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, *478*(7367), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Schrumpf, M., Kaiser, K., Guggenberger, G., Persson, T., Kögel-Knabner, I., & Schulze, E. D. (2013). Storage and stability of organic carbon in soils as related to depth, occlusion within aggregates, and attachment to minerals. *Biogeosciences*, *10*(3), 1675-1691. <https://doi.org/10.5194/bg-10-1675-2013>
- Sleutel, S., De Neve, S., & Hofman, G. (2003). Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. *Soil Use and Management*, *19*(2), 166-171. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00299.x>
- Smith, P., & Powlson, D. S. (2007). Sustainability of soil management practices - a global perspective. In: L. K. Abbott, & D. V. Murphy, (Eds.). *Soil biological fertility* (pp. 241-254). Dordrecht, Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6619-1_12
- Strahm, B. D., Harrison, R. B., Terry, T. A., Harrington, T. B., Adams, A. B., & Footen, P. W. (2009). Changes in dissolved organic matter with depth suggest the potential for postharvest organic matter retention to increase subsurface soil carbon pools. *Forest Ecology and Management*, *258*(10), 2347-2352. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.014>
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, *33*(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Zhong, L., & Qiguo, Z. (2001). Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant and Soil*, *231*(2), 175-185. <https://doi.org/10.1023/A:1010350020951>