

Patrones de distribución a profundidad del carbono orgánico del suelo en diferentes usos del suelo y manejo

Soil organic carbon depth distribution patterns in different land uses and management

Miguel Acosta-Mireles¹ , Fernando Paz-Pellat^{2,3} ,
Claudia Hidalgo-Moreno³  y Jorge Dionisio Etchevers-Barra³ 

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, CE Valle de México. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchan. 56250 Texcoco, Estado de México, México.

² GRENASER, ³ 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.

‡ Autor para correspondencia (ferpazpel@gmail.com)

Editora invitada: Dra. Alma S. Velázquez

RESUMEN

La distribución del carbono orgánico de los suelos (COS) a profundidad es importante para definir almacenes de carbono y analizar los impactos de diferentes mecanismos y procesos de desestabilización. La modelación de la distribución vertical del COS ha sido aproximada por enfoques empíricos o usando modelos de cinéticas de primer orden con multi-compartimentos. En este trabajo se introduce un modelo de cinética de orden n , que generaliza desarrollos previos de uso de un solo compartimento. El modelo es ajustado a perfiles de suelo del Proyecto de Manejo Sustentable de Laderas en la Sierra Norte de Oaxaca, México, en tres microcuencas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe. Los protocolos de muestreo, diseño experimental, sistemas y laboratorio son presentados. El modelo de cinética de orden n se ajustó bien a los datos experimentales ($R^2 > 0.99$), aunque se encontró alta variabilidad (horizontal y a profundidad), la cual fue discutida como una posible relación con la posición de los puntos de muestreo en campo.

Palabras clave: cinética de orden n , modelo mono-compartimento, Oaxaca, Proyecto de Manejo Sustentable de Laderas, puntos de muestreo, Sierra Norte.

SUMMARY

The distribution of soil organic carbon (SOC) at depth is important to define carbon stocks and for analyzing the impacts of different destabilization mechanisms and processes. The modeling of the vertical distribution of the SOC has been approximated by empirical approaches or using first order kinetic models with multi-compartments. This paper introduces a kinetic model of n order, which generalizes previous developments of use of a single compartment. The model is adjusted to soil profiles of the Hillside Sustainable Management Project in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico, in three microbasins of the Mazateca, Cuicateca and Mixe regions. Sampling protocols, experimental design, systems and laboratory are presented. The kinetic model of n order was adjusted well to the experimental data ($R^2 > 0.99$), although high variability (horizontal and vertical) was found, which was discussed as a possible relationship with the position of the field sampling points.

Index words: n order kinetic, mono-compartment model, Oaxaca, Hillside Sustainable Management Project, sampling points, Sierra Norte.

Cita recomendada:

Acosta-Mireles, M., Paz Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C. y Etchevers Barra, J. D. (2022). Patrones de distribución a profundidad del carbono orgánico del suelo en diferentes usos suelo y manejo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-19. e1321. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1321>

Recibido: 14 de diciembre de 2021. Aceptado: 16 de marzo de 2022.
Artículo. Volumen 40, abril de 2022.

INTRODUCCIÓN

La captura de carbono orgánico del suelo (COS) está asociado a los usos del suelo y prácticas de manejo del suelo (Lal, 2004). Las ganancias o pérdidas de COS asociadas a los cambios de uso del suelo (Smith, 2008) son de alto interés en relación al cambio climático por lo que es importante caracterizar estos almacenes (Penman *et al.*, 2003) (Eggleston, 2006). En lo particular, el potencial de captura de los suelos agrícolas está asociado a mejores prácticas de manejo lo cual ha sido enfatizado como una estrategia de alto impacto para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero (Paustian, Larson, Kent, Marx y Swan, 2019). Aunque se ha avanzado en el conocimiento de los mecanismos y procesos de estabilización del COS (Sollins, Homann y Caldwell, 1996; von Lützow *et al.*, 2006; Schrumpf *et al.*, 2013), aun quedan vacíos en el conocimiento para entenderlos (Chabbi y Rumpel, 2009; Stockmann *et al.*, 2013; Bailey, Hicks y Lajtha, 2019).

Es práctica común determinar los almacenes del COS a profundidades someras (0 a 30 cm), recomendado para los inventarios nacionales (Penman *et al.*, 2003; Eggleston, 2006), bajo el argumento de que el COS a profundidades mayores es estable/recalcitrante, con tiempos de residencia grandes y tasas de descomposición bajas (Lorenz y Lal, 2005; Jenkinson, Poulton y Bryant, 2008; Jenkinson y Coleman, 2008; Rumpel y Kögel-Knabner, 2011; Schrumpf *et al.*, 2013). El COS a profundidad en el suelo puede ser desestabilizado al cambiar las practicas de manejo o condiciones ambientales (Bernal *et al.*, 2016; Gross y Harrison, 2019), por lo que la practica de medirlo a mayor profundidad (0 a 1 m) es necesaria (Harrison, Footen y Strahm, 2011).

Ha sido necesario un modelado de la dinámica del COS para entender procesos y realizar proyecciones ante diferentes escenarios de cambio climático o perturbaciones antropogénicas (Lal, 2009) y también el modelado de la distribución del COS a profundidad ha sido planteado como un requerimiento para las nuevas generaciones de modelos (Stockmann *et al.*, 2013; Campbell y Paustian, 2015). Los enfoques del modelo deben ser costo-efectivos, aplicables a la dinámica del COS en paisajes y usar parametrizaciones que puedan ser asociadas a mediciones de laboratorio y con complejidad reducida (Stockmann *et al.*, 2013).

Los modelos de distribución a profundidad del

COS han sido de tipo empírico (Paz y Etchevers, 2016; Murphy, Wilson y Koen, 2019) o mecanicista (Hilinski, 2001; Jenkinson y Coleman, 2008). En lo general los modelos mecanicistas temporales y espaciales (profundidad) de la dinámica del COS representan cinéticas de primer orden y múltiples compartimentos o almacenes del COS (Paustian, Collins y Paul, 1997; Manzoni *et al.*, 2012), lo cual los hace complejos de parametrizar.

La distribución vertical del COS esta asociada mayormente con el tipo de vegetación (Jobbágy y Jackson, 2000 y 2001) debido a que en su mayoría es producto de los ingresos de la muerte y descomposición de las raíces (Jackson *et al.*, 2017; Hicks-Pries *et al.*, 2018; Gross y Harrison, 2019), aunque la distribución del COS se extiende más allá de la profundidad radical, implicando procesos adicionales (descomposición, transporte, bioturbación) a los ingresos provenientes de las raíces y mantillo (superficie).

Un punto importante de la distribución vertical del COS es la caracterización de su “firma” (Franzluebbers, 2002 y 2010) para el desarrollo de indicadores de la calidad del suelo y del tipo de vegetación y manejo. Si se considera el uso de modelos simplificados de la dinámica del COS (modelos de estados y transiciones; Covalada, Paz y Ranero, 2016 y 2018), es necesario conocer si el sistema esta en estado de equilibrio o transitorio, dado que esta consideración puede conducir a sobre o subestimaciones del COS (Sanderman y Baldock, 2010).

Un aspecto importante en la caracterización de los almacenes de carbono orgánico de los suelos es su alta variabilidad espacial (Post, Izaurre, Mann y Bliss, 2001; Paz, Argumedo, Cruz, Etchevers y de Jong, 2016) y su dependencia de la escala de muestreo (Paz, Etchevers, Martínez y Ortiz, 2008, 2009 y 2010). Para inventariar el COS a nivel de paisajes o regiones, se han utilizado técnicas que modelar el COS a profundidad y su variación espacial (Mishra *et al.*, 2009; Meersmans, van Wesmael, De Ridder y van Molle, 2009; Kempen, Brus y Stoorvogel, 2011), para poder caracterizar la distribución tridimensional del COS.

El objetivo de este trabajo es analizar y modelar los patrones de la distribución vertical del COS. En este trabajo se estudiaron perfiles del suelo localizados en tres microcuencas de regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México, con el objetivo de analizar y modelar los patrones de la distribución vertical del COS asociado a diferentes y práctica de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base de perfiles de suelo analizada en este trabajo proviene del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) coordinado por el Colegio de Postgraduados (PMSL, 2001), que inicio operaciones en 1999 en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe pertenecientes a la Sierra Norte de Oaxaca, México.

Los detalles de los sitios de muestreo seleccionados, tales como su descripción, prácticas culturales, rendimientos y análisis económicos de los sistemas implementados pueden ser encontrados en Cortés (2001) y Cortés *et al.* (2005). El diseño muestral y protocolos de campo y laboratorio se pueden encontrar en varias publicaciones (Etchevers, 2001; Etchevers, Acosta, Monreal, Quednow y Jiménez, 2001; Acosta, Etchevers, Monreal, Quednow e Hidalgo, 2001; Etchevers *et al.*, 2003 y 2005a; Monreal *et al.*, 2005). Las estimaciones de los almacenes del COS en los sistemas analizados, incluyendo su distribución a profundidad puede encontrarse en varias publicaciones (Etchevers, 2001; Acosta *et al.*, 2001; Etchevers, Vergara, Acosta, Monreal y Jiménez, 2005b; Monreal *et al.*, 2005). Adicionalmente, información sobre la fertilidad de los suelos puede encontrarse en Etchevers *et al.* (2005b) y Vergara-Sánchez y Etchevers (2006).

La variación espacial (profundidad 0 a 20 cm y 20 a 40 cm) ha sido analizada por Vergara-Sánchez, Etchevers y Vargas (2004) y revisada en relación con

los protocolos de muestreo y laboratorio por González-Molina, Etchevers e Hidalgo (2008).

La modelación de la dinámica del COS (2000-2004) en la capa superficial de algunos sitios de muestreo en diferentes sistemas ha sido implementada por González-Molina, Etchevers, González y Paz (2010).

No obstante, se presenta una breve descripción de las regiones de estudio, sistemas, sitios de muestreo, diseño experimental, protocolos de campo y laboratorio.

Regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México

Se muestra en la Figura 1, la localización de las regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México. En la región Mazateca la microcuenca se encuentra localizada entre las coordenadas 18° 08' 57" - 18° 10' 13" N y 96° 53' 30" - 96° 54' 43" O, en Santa Catarina, municipio de San Jerónimo Teocoatl. La superficie de la microcuenca es de 319 ha, con una altitud entre 1300 a 1900 m. La mayor parte de las pendientes rebasan 30% y los suelos dominantes son luvisol, rendzina, feozem y acrisol, con precipitación > 2000 mm y temperatura de 16 a 27 °C. Los principales sistemas son milpa tradicional de maíz (*Zea mays*) intercalado con frijol (*Phaseolus vulgaris*), y ocasionalmente calabaza (*Cucurbita pepo*) y arvenses; pastizal; bosque de aile (*Alnus acuminata*), bosque de liquidambar (*Liquidambar staryflua*), por lo general secundarios;

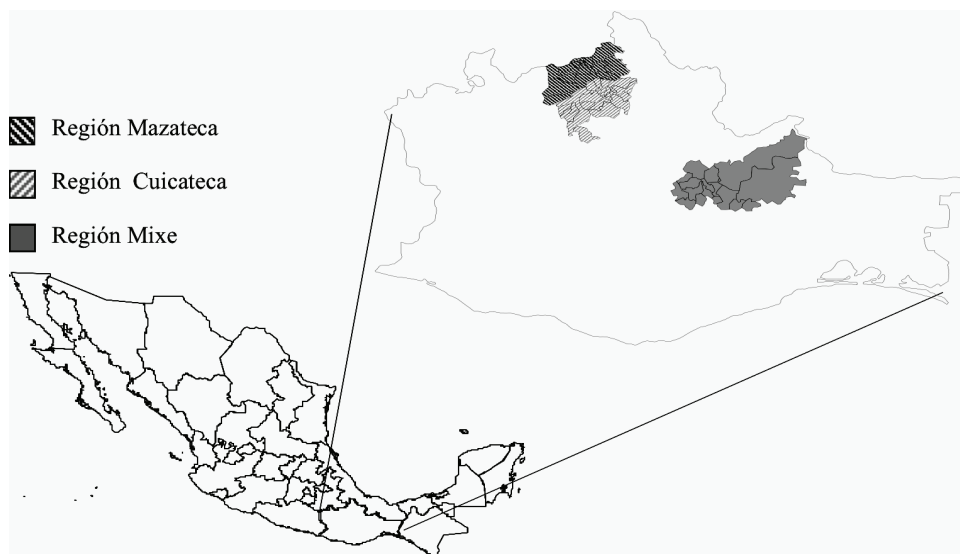


Figura 1. Localización geográfica de las regiones de la Sierra Norte, Oaxaca, México.
Figure 1. Geographic location of the Sierra Norte regions, Oaxaca, Mexico.

y cafetales (*Coffea arabica*) cultivado bajo sombra de árboles de *Inga* sp.

En la región Cuicateca, la microcuenca se encuentra localizada entre las coordenadas 17° 50' 20" y 17° 51' 25" N y 96° 51' 55" y 96° 52' 35" O, en Concepción Pápalo, en municipio del mismo nombre. La microcuenca tiene una superficie de 174 ha, con una altitud entre 1700 y 2200 m. La mayor parte de las pendientes del terreno rebasan el 30% y los suelos dominantes son luvisol, rendzina, feozem y acrisol. La precipitación anual esta entre 500 y 700 mm y la temperatura entre 18 y 20 °C. Los principales sistemas son milpa de maíz, pastizal, bosque de encino (*Quercus* sp.) y matorrales con una mezcla de diferentes especies arbustivas y arbóreas, tipo bosque abierto.

Finalmente, en la región Mixe, la microcuenca se localiza entre las coordenadas 17° 00' 45" y 17° 01' 16" N y 95° 53' 53" y 95° 54' 10" O, en Zompantle, municipio de Cacalotepec. La microcuenca tiene una superficie de 32 ha y la altitud varía entre 1280 y 1520 m. La pendiente que predomina esta entre 25 y 70%, con suelos dominantes acrisol y cambisol. La precipitación anual es de 1500 a 2000 mm año⁻¹ y la temperatura es de 17 a 27 °C. Los principales sistemas son milpa de maíz, café bajo sombra y acahuals (esto es, sucesión secundaria, generada en el descanso de las parcelas de cultivo después de dos a tres años de uso de las parcelas de cultivo).

Sistemas y Prácticas de Manejo

En las tres regiones la mayoría de las familias cultivan su milpa usando el sistema de Roza-Tumba-Quema (RTQ), que consiste en el cultivo de maíz por un periodo corto (dos a tres años), seguido por un periodo de descanso (acahual) que permite la recuperación de la fertilidad, donde este periodo varía en función de la recuperación del suelo y la presión para su uso agrícola.

A partir de 1999, en las regiones de estudio se implementaron tecnologías mejoradas a las existentes: labranza de conservación, sistemas agroforestales y milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), realizándose el primer muestreo del carbono orgánico en los perfiles seleccionados de suelos en 2000.

El Cuadro 1 muestra los sistemas en cada región, agrupados por las siguientes clases genéricas: Sistemas de Vegetación Forestal (SVF), Sistemas Agrícolas Permanentes (SAP), Sistemas Agrícolas Mixtos (SAM) y Sistemas Agrícolas Anuales (SAA).

De acuerdo a la pendiente del terreno se usó el método de siembra manual o con tracción animal (Cuadro 1).

En el Cuadro 1 se observa la diversidad de clima, topografía, prácticas culturales, así como los distintos usos y manejo del suelo entre los sistemas implementados.

Bajo la consideración de que las mediciones de los sistemas mejorados o alternativos tienen un año de su implementación, en el Cuadro 1 se describe el uso del suelo previo, para tener el contexto del legado del sitio o parcela (Foster *et al.*, 2003).

Diseño Experimental en Sitios de Muestreo

Para el Sistema de Vegetación Forestal y Sistema Agrícola Permanente, se utilizaron 5 parcelas de muestreo distribuidas al azar en los sistemas, de 25 m de longitud y de 4 m de ancho, Figura 2a. En cada parcela se establecieron dos puntos de muestreo (relojes) y en cada reloj se realizaron dos mediciones, por lo que el total de mediciones (perfiles) fue de 20 (=5×2×2). Los puntos de medición fueron realizados en círculos fijos (varillas enterradas), midiéndose el año 2000 (T_0 , primer año) en el punto de las 12 y 6 horas, Figura 3. Los otros puntos del reloj se midieron en años posteriores, pero solo en la capa superficial del suelo.

En el caso del Sistema Agrícola Mixto (SAM) y Sistema Agrícola Anual (SAA) se utilizó una parcela de 9 m de longitud y anchura variable, dependiente del tratamiento utilizado. En cada parcela se utilizaron tres repeticiones (R1, R2 y R3), Figura 2b, y se establecieron tres puntos (relojes) de medición en cada repetición (puntos A, B y C, Figura 2b), perpendicular a la hilera de las plantas del sistema. El punto B se colocó cercano a las plantas, por lo que la influencia de éstas es mayor que en los puntos A y C.

Protocolo de Muestreo y Análisis de Laboratorio

Los muestreos en los puntos de medición fueron realizados con una barrena de 3.17 cm de diámetro interno (JMC Backsaver N-3 Handle) en la región Mazateca y de 4.17 cm (AMS Soil Sampling Equipment) en la región Cuicateca y Mixe. El cambio de barrena se justifica por la dificultad suelos con pedregosidad interna.

Los muestreos fueron realizados nominalmente a intervalos de 15 cm, hasta la profundidad de 105 cm.

En los casos que no se pudo llegar a la profundidad de 105 cm, por capa endurecida o roca, el muestreo se terminó hasta el punto de mayor profundidad.

Después de identificar las muestras de campo se trasladaron al laboratorio en bolsas de plástico. En el laboratorio de seco al aire hasta peso constante y se retiraron manualmente las raíces visibles, además de otros residuos de fauna y materia vegetal y gravas.

Las muestras de suelo fueron disgregadas con un martillo de madera hasta hacer pasar la muestra de suelo por una malla de 2 mm, después de homogeneizar (muestreo representativo) la muestra. Después se tomo una submuestra representativa de 5 g, se secó a 105 °C y se molió durante tres minutos en un molino (Speck 8000 Mixer/Mill). La muestra molida se secó a 105 °C durante dos horas y se colocó en un desecador

Cuadro 1. Sistemas implementados en las regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México.

Table 1. Systems implemented in the regions of the Sierra Norte de Oaxaca, Mexico.

Sistema	Región	Uso previo de suelo	Uso de suelo	Edad (años)	Clave uso de suelo [†]	Pendiente (%)	
Sistemas de Vegetación Forestal (SVF)	Mazateca	Bosque de aile	Bosque de aile	10	BAi-10	40	
		Bosque de aile	Bosque de aile	15-20	BAi-15/20	35	
		Bosque de liquidambar	Bosque liquidambar	40	BLi-40	20	
	Cuicateca	Bosque de encino	Bosque encino	40	BEEn-40	25	
		Milpa	Achual	2	ACa-2	50	
		Mixe	Milpa	Achual	7	ACa-7	25
			Milpa	Achual	15	ACa-10	35
		Bosque de pino	Bosque pino		BPi	30	
Sistemas Agrícolas Permanentes (SAP)	Mazateca	Café bajo sombra	Café bajo sombra		CBS	20	
		Pradera	Pradera		PRA	30	
	Cuicateca	Pradera	Pradera		PRA	10	
		Mixe	Café bajo sombra	Café bajo sombra		CBS	20
Sistemas Agrícolas Mixtos (SAM)	Mazateca	Milpa	MIAF-Durazno	1	MIAF-Dur (CS)	> 30	
		Milpa	MIAF-Durazno	1	MIAF-Dur (SC)	< 30	
	Cuicateca	Milpa	MIAF-Durazno	1	MIAF-Dur (CY)	35	
		Milpa	MIAF-Durazno	1	MIAF-Dur (LC)	30	
	Mixe	Milpa	MIAF-Café	1	MIAF-Caf	30	
Sistemas Agrícolas Anuales (SAA)	Mazateca	Milpa	Agricultura de conservación	1	Aco (CS)	> 30	
		Milpa	Agricultura tradicional	< 30	Atr (CS)	> 30	
		Milpa	Agricultura de conservación	1	Aco (SC)	< 30	
		Milpa	Agricultura tradicional	> 60	Atr (SC)	< 30	
	Cuicateca	Milpa	Agricultura de conservación	1	Aco (CY)	35	
		Milpa	Agricultura tradicional		Atr (CY)	35	
		Milpa	Agricultura de conservación	1	Aco (LC)	40	
		Milpa	Agricultura tradicional		Atr (LC)	30	
		Milpa	Agricultura de conservación	1	Aco (MI)	35	
		Milpa	Agricultura tradicional	< 30	Atr (MI)	30	

% Inicialmente se implementó MIAF-Café, pero debido al poco crecimiento del café se cambió a durazno el segundo año. [†] Sitios de las parcelas: CS = centro de salud; SC = Santa Catarina; CY = camino a Yacuay; LC = La Colorada; MI = Minatitlán.

% Initially, MIAF-Coffee was implemented, but due to the low growth of coffee, it was changed to peach the second year. [†] Plot sites: CS = health center; SC = Santa Catarina; CY = road to Yacuay; LC = La Colorada; MI = Minatitlán.

antes de la determinación del contenido del C en un autoanalizador (Shimadzu TOC 5000-A). Previo al análisis de la muestra principal, se utilizaron muestras representativas para comprobar que no hubiere C inorgánico (carbonatos) en las muestras.

Modelos de la Distribución del COS a Profundidad

Los modelos empíricos más usados (Paz y Etchevers, 2016; Murphy *et al.*, 2019), con dos parámetros, fueron:

$$\text{Modelo exponencial: } C = a \exp(-bZ_0) \quad (1)$$

$$\text{Modelo logarítmico: } C = a - b \ln(Z_0 + 1) \quad (2)$$

$$\text{Modelo potencial: } C = a(Z_0 + 1)^{-b} \quad (3)$$

donde: C es el COS (g C kg⁻¹ suelo) a la profundidad Z (cm) y $Z_0 = Z - Z_{15 \text{ cm}}$.

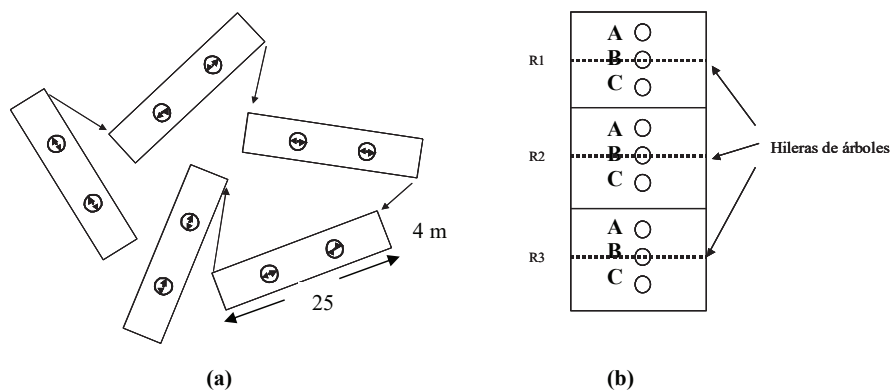


Figura 2. Arreglo de muestreos en los sitios experimentales. (a) Sistema de Vegetación Forestal y Sistema Agrícola Permanentes y (b) Sistema Agrícola Mixto y Sistema Agrícola Anual.

Figure 2. Sampling arrangement at the experimental sites. (a) Permanent Forest Vegetation System and Agricultural System and (b) Mixed Agricultural System and Annual Agricultural System.

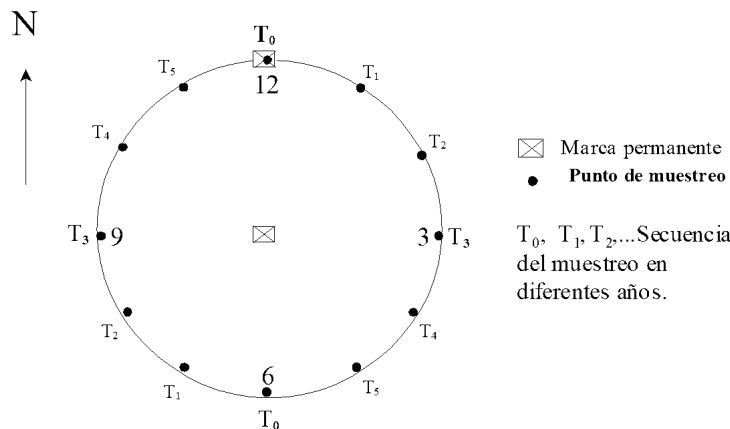


Figura 3. Punto de medición definido por un reloj indicando los tiempos de medición.

Figure 3. Measurement point defined by a clock indicating the measurement times.

El uso de $Z_0 + 1$ en el modelo logarítmico y potencial, es para tener $C = C_0$ (15 cm) cuando $Z = Z_0$.

En vez de utilizar cinéticas de orden uno y múltiples compartimentos como es clásico, se utilizó un solo almacén genérico:

$$\frac{dC}{dZ} = -k_n C^n \quad (4)$$

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 dinámica de la relación (4) difiere de este tipo de reacciones. La solución a la relación (4), para diferentes valores de n está mostrada en muchos textos de la literatura clásica de cinética de reacciones (p. ej. El Seoud, Baader y Bastos, 2016).

Cinética de orden $n = 0$

$$\frac{dC}{dZ} = -k_0 C^0 = -k_0 \quad (5)$$

Cuya solución es:

$$C = C_0 - k_0 Z \quad (6)$$

que representa un patrón gradacional, de acuerdo con la tipología de patrones del COS a profundidad de Minasny, Stockmann, Hartemink y McBratney (2006).

Cinética de orden $n = 1$

$$\frac{dC}{dZ} = -k_1 C^1 = -k_1 C \quad (7)$$

Cuya solución es:

$$C = C_0 \exp(-k_1 Z) \quad (8)$$

que representa un patrón no lineal en la tipología de Minasny *et al.* (2006), y es uno de los modelos más usados, particularmente por tener bases teóricas asociadas al transporte y descomposición del COS a profundidad (Nakane y Shinozaki, 1978; O'Brien y Stout, 1978).

Cinética de orden $n = 2$

$$\frac{dC}{dZ} = -k_2 C^2 = -k_2 C \cdot C \quad (9)$$

Cuya solución es:

$$C = \frac{C_0}{1 + k_2 C_0 Z} \quad (10)$$

La cinética de orden 2 ha sido utilizada previamente en las ciencias del suelo (Stanford, 1969; Whitmore, 1996a y b). En el caso de la mineralización del suelo, Whitmore (1996a y b) planteo la cinética en función del producto de dos componentes: una proporcional al sustrato (p. ej. αC) y la otra de los microorganismos derivados del sustrato (p. ej. $[1-\alpha]C$). La cinética de orden $n = 2$ queda entonces como:

$$\frac{dC}{dZ} = -k_2 \alpha (1-\alpha) C^2, 0 < \alpha < 1 \quad (11)$$

cuya solución es:

$$C = \frac{C_0}{1 + k_2 \alpha (1-\alpha) C_0 Z} \quad (12)$$

Cinética de orden $n \neq 1$

$$\frac{dC}{dZ} = -k_n C^n = -k_2 C^{n_1} \cdot C^{n_2} \dots C^{n_n} \quad (13)$$

Con:

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_n \quad (14)$$

Cuya solución es:

$$C = \frac{C_0}{[1 + k_n C_0^{n-1} (n-1) Z]^{1/n-1}} \quad (15)$$

La solución general de la relación (13), $n \neq 1$, implica un proceso iterativo (en profundidad o en el tiempo) que puede tener valores de $n < 1$ o $n > 1$ de subprocesos (relación 12), incluyendo el caso $n < 0$.

El modelo exponencial es solo un caso de las soluciones de la cinética de orden n , por lo que los ajustes satisfactorios con este modelo avalan la dinámica.

Análisis Estadísticos

Para la evaluación de los ajustes empíricos de los modelos presentados, se usó una comparación entre lo medido (Y_i) y lo estimado (\hat{Y}_i), en función de su pendiente (t) e intersección o sesgo (s):

$$\hat{Y}_{estimado} = s + tY_{medido} \quad (16)$$

Además del uso del coeficiente de determinación R^2 , las métricas de error de los ajustes estadísticos fueron la raíz del error cuadrático medio (RECM):

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (17)$$

y el error absoluto medio (EAM), en porcentaje:

$$EAM = 100 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \right\} \quad (18)$$

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En lo general, todos los análisis del COS a profundidad se realizaron usando la profundidad media de las mediciones (7.5, 22.5, 37.5, 52.5, 67.5, 82.5, 97.5 cm), con algunos casos de valores de profundidad diferentes por el uso de muestreos diferentes de los nominales.

Distribución Vertical del Contenido de COS en los Sistemas

La Figura 4 muestra la distribución de los estadísticos, promedio ± 1 desviación estándar, del COS a profundidad para los Sistemas de Vegetación Forestal, donde se aprecia la variabilidad del COS en los perfiles. En lo general, los patrones de la Figura 4 son del tipo no lineal, con el COS decreciendo en forma continua con la profundidad.

La Figura 5 muestra los Sistemas Agrícolas Permanente, donde para el caso de la región Mazateca

(CBS y PRA) se observa gran variación del COS a profundidad. Los patrones son decrecientes, con algunos casos donde se observan pequeños rompimientos de la tendencia (ligero incremento en vez de disminución).

En el caso de los Sistemas Agrícolas Mixtos, la Figura 6 muestra los patrones, donde se presentan situaciones de efectos en el estrato superficial (MIAF-Dur CS) de labranza e incrementos ligeros, en vez de decrementos, del COS a profundidad (MIAF-Dur CY), reflejando la situación del poco tiempo de establecimiento.

Finalmente, en la Figura 7 se observan los patrones de la distribución vertical del COS de los Sistemas Agrícolas Anuales, donde el patrón de ACO (CS) en la región Mazateca tiene horizontes enriquecidos de C en las profundidades medias, por lo que este sistema no fue analizado en lo siguiente por representar discontinuidades. Los patrones del COS son decrecientes (convexos), con excepción de ATtr (CS) de la región Mazateca que es cóncavo.

Ajustes Estadísticos de los Modelos

Para analizar los ajustes estadísticos de los modelos propuestos (exponencial, logarítmico, potencial y cinética de orden n), usando regresión no lineal (función Solver de Excel^{MR}), se utilizaron los perfiles del COS de la región Mazateca, para los casos de la profundidad media de 82.5 y 97.5 cm. En el Cuadro 2 se presentan los resultados de los ajustes estadísticos.

Del Cuadro 2, resulta claro que el modelo de cinética de orden n resultó en el mejor ajuste, siendo el modelo exponencial el segundo mejor. Dado que el modelo exponencial es parte del de cinética de orden n , entonces es claro que en lo general este modelo genera resultados de ajustes estadísticos buenos ($R^2 > 0.99$).

Ajustes del Modelo de Cinética de Orden n para Promedios de la Distribución del COS en los Perfiles

La Figura 8 y el Cuadro 3 muestran los ajustes estadísticos (regresión no lineal) del modelo de cinética de orden n a los diferentes sistemas de las tres regiones analizadas. Los ajustes fueron realizados considerando solo los perfiles con una profundidad hasta 105 cm, hasta 90 cm, hasta 75 cm y hasta 65 cm, para no considerar perfiles con número de datos variables. Solo el patrón atípico de Aco (CS)

de la región Mazateca y Aco (CY) de la región Cuicateca (datos hasta la profundidad de 45 cm) no se consideraron.

Para analizar la relación orden n -tasa de reacción k_n , bajo la consideración de cuando $-k_n \rightarrow 0$, entonces

$\exp(k_n) \rightarrow 1$, se analizó el espacio $n\text{-exp}(k_n)$, Figura 8. Cuando $n = 1$ (modelo exponencial) se puede establecer como un umbral donde el COS a profundidad está en equilibrio, dado que $\exp(k_n)$ es cercano a 1. Para valores de $n > 1$, $\exp(k_n)$ tiende a estar más cerca de 1.

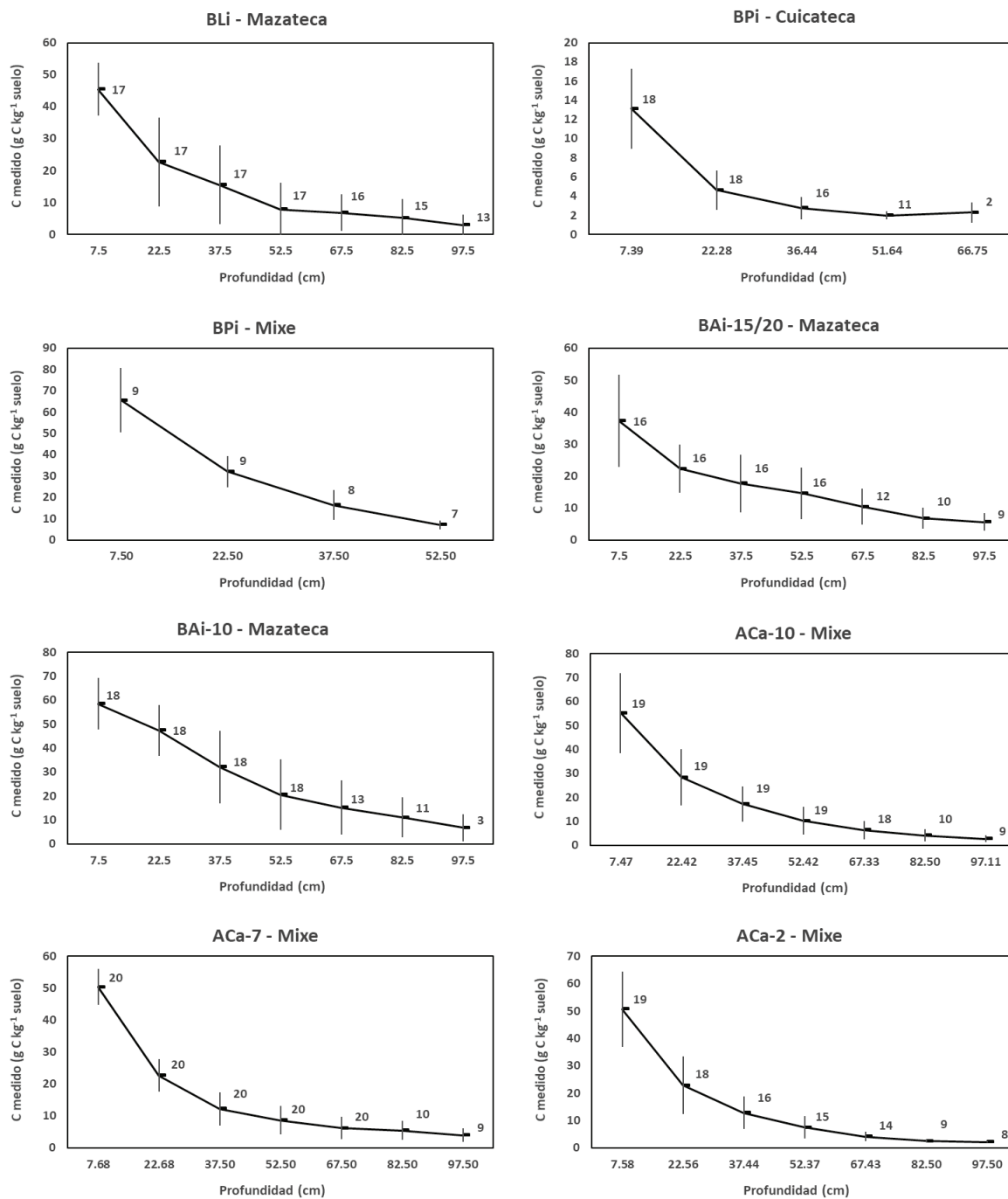


Figura 4. Patrones de la media ± 1 desviación estándar del COS a profundidad de los Sistemas de Vegetación Forestal. Los números se refieren muestran la cantidad de perfiles usados para los estadísticos.

Figure 4. Patterns of the mean ± 1 standard deviation of the SOC at depth of the Forest Vegetation Systems. The numbers refer to the number of profiles used for the statistics.

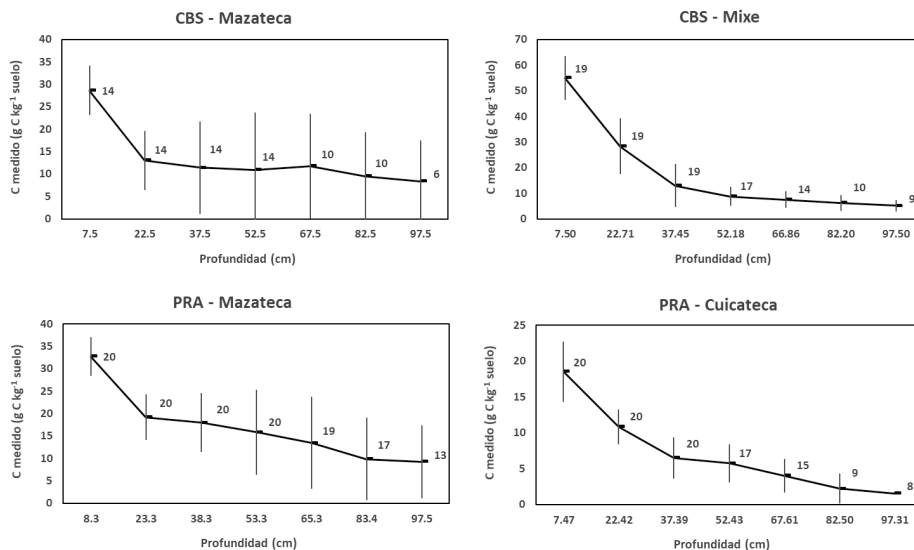


Figura 5. Patrones de la media ± 1 desviación estándar del COS a profundidad de los Sistemas Agrícolas Permanentes. Los números se refieren muestran la cantidad de perfiles usados para los estadísticos.
Figure 5. Patterns of the mean ± 1 standard deviation of the SOC at depth of the Permanent Agricultural Systems. The numbers refer to the number of profiles used for the statistics.

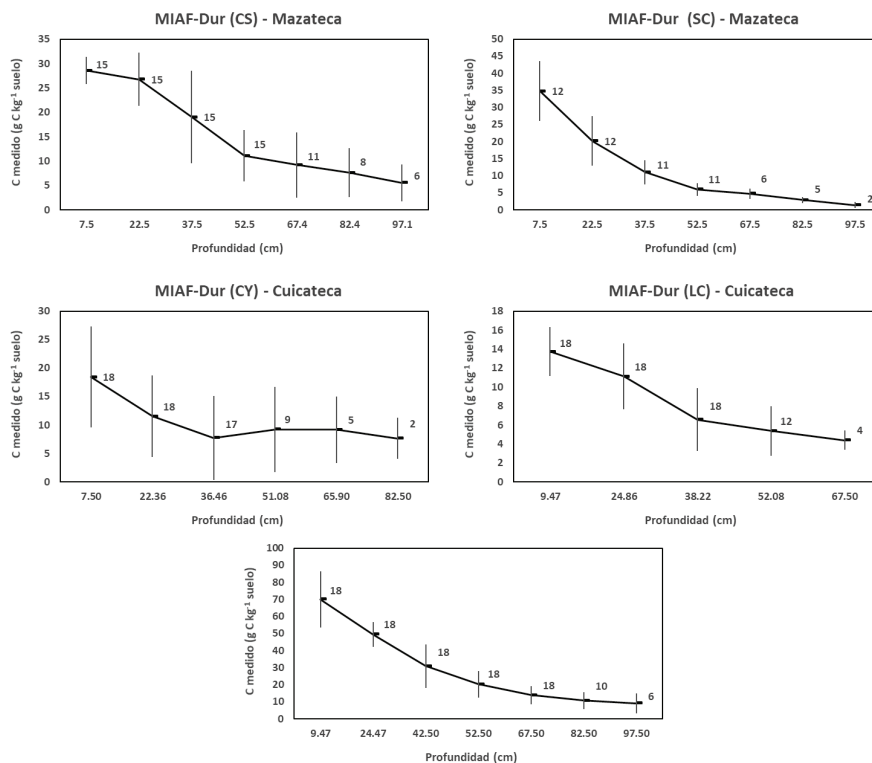


Figura 6. Patrones de la media ± 1 desviación estándar del COS a profundidad de los Sistemas Agrícolas Mixtos. Los números se refieren muestran la cantidad de perfiles usados para los estadísticos.
Figure 6. Patterns of the mean ± 1 standard deviation of the SOC at depth of the Mixed Agricultural Systems. The numbers refer to the number of profiles used for the statistics.

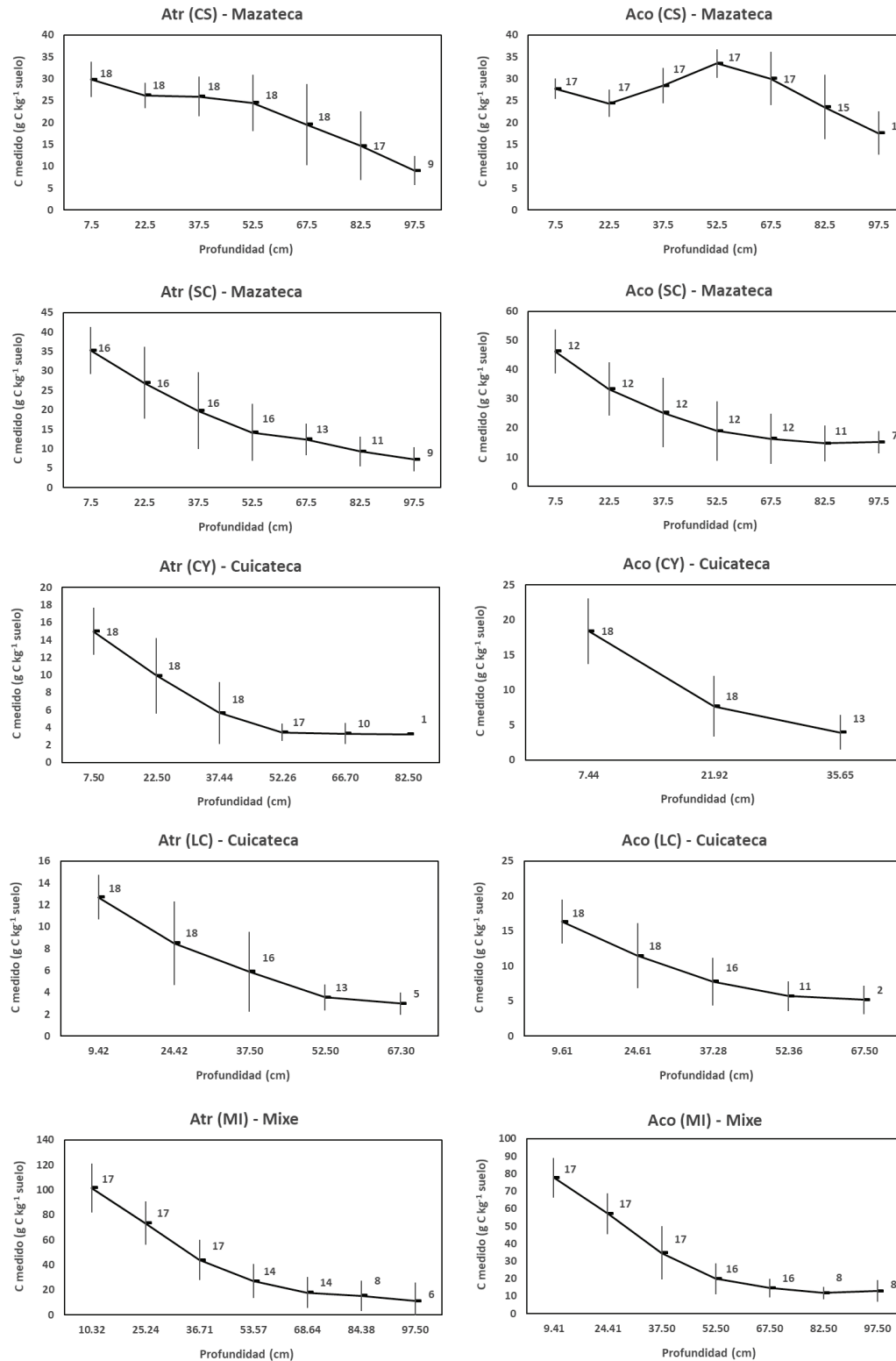


Figura 7. Patrones de la media \pm 1 desviación estándar del COS a profundidad de los Sistemas Agrícolas Anuales. Los números se refieren muestran la cantidad de perfiles usados para los estadísticos.

Figure 7. Patterns of the mean \pm 1 standard deviation of the SOC at depth of the Annual Agricultural Systems. The numbers refer to the number of profiles used for the statistics.

Cuadro 2. Métricas de los ajustes estadísticos de los modelos del COS a profundidad.
Table 2. Metrics of the statistical adjustments of the SOC models at depth.

Representación	RECM	EAM	R ²	s	t
$C = a \exp(-bZ_0)$	2.3139	28.70	0.9744	-0.1329	0.9931
$C = a - b \ln(Z_0 + 1)$	3.9154	50.78	0.9249	1.2136	0.9249
$C = a(Z_0 + 1)^{-b}$	4.7432	53.69	0.8901	2.3268	0.8709
$C = \frac{C_0}{[1 + k_n C_0^{n-1} (n-1)Z]^{1/n-1}}$	1.3400	14.59	0.9912	0.1440	0.9890

Los valores de $\exp(k_n)$ cercanos a uno implican una “profundidad media de residencia” muy grande, por lo que el modelo depende solo de su grado de estabilidad o equilibrio (orden n).

Los patrones de la relación $n - \exp(k_n)$ están asociados a dos tendencias: $n > 1$ de sistemas en equilibrio o estables y $n < 1$ con patrones no en equilibrio, asociados a sistemas en sucesión o de agricultura tradicional.

En la Figura 8c (profundidad hasta 75 cm), se observa que el patrón hacia no equilibrio de $n - \exp(k_n)$ tiene dos tendencias: la mostrada dentro de la elipse en rojo de la Figura 8c representa los sistemas Atr (LC) y MIAF-Dur (CS) de la región Cuicateca que presentan patrones transitorios diferentes al resto: Bai-10, MIAF-Caf. Aco, CBS y Acahuales, que son del tipo transicional, pero con tendencia diferente a los previos. Algo similar sucede para la profundidad de 0 a 60 cm, Figura 8d, donde los mostrados dentro de la elipse de línea roja corresponden a MIAF-Dur, Atr y Aco del sitio LC de la región Mazateca. Una posible razón de estas tendencias es el número de datos usados, ya que para los casos de profundidades de 0 a 105 cm y 0 a 90 cm, se observa una sola tendencia.

Ajustes del Modelo de Cinética de Orden n para Perfiles Individuales de la Distribución del COS

Para analizar el ajuste del modelo de cinética de orden n a perfiles individuales de los sistemas, se consideraron solo perfiles con profundidades de 0 a 105 cm o 0 a 90 cm, dando un total de 74 perfiles.

La Figura 9 muestra los ajustes estadísticos y la relación $n - \exp(k_n)$ para este caso, donde se observa un solo patrón general entre n y $\exp(k_n)$, similar al de la Figura 8a y b.

Cronosecuencia de Sucesión de los Acahuales en la Región Mixe

En la región Mixe se muestreo la distribución vertical del COS en una secuencia de acahuales de 2, 7 y 10 años, por lo que resultante interesante su análisis en términos de tendencias hacia el equilibrio (bosque maduro). La Figura 10 muestra los resultados de los ajustes del modelo, 23 perfiles donde 21 son de la profundidad de 0 a 105 cm, 1 de la profundidad 0 a 90 cm y 1 de la profundidad de 0 a 75 cm.

De la Figura 10 se observa que la relación orden $n - \exp(k_n)$ es variable para las diferentes edades de los acahuales, pudiendo implicar que los sitios de muestreo (cerca o alejados de árboles) y la distribución espacial de las plantas define situaciones de equilibrio y transitorias.

Discusión

El modelo de cinética de orden n , un solo almacén, generaliza modelos previos, presentando flexibilidad en los ajustes estadísticos y representando una relación entre el orden n y la tasa de reacción k_n que sigue la tendencia de condiciones de equilibrio o transitorias de las dinámicas del uso del suelo.

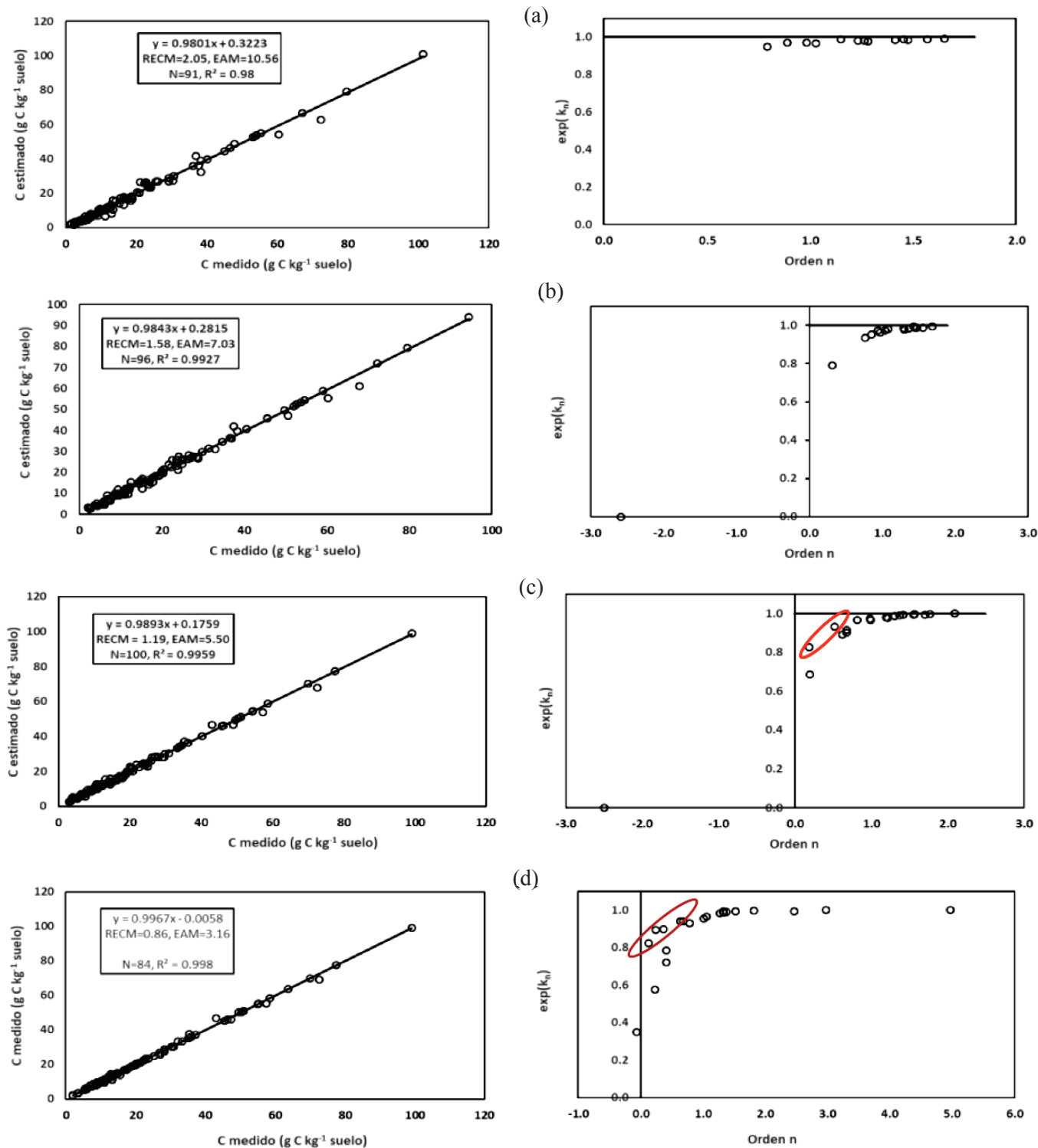


Figura 8. Relaciones entre el C medido y el C estimado, además de las relaciones orden $n - \exp(k_n)$ para: (a) Profundidad de 0 a 105 cm, (b) profundidad de 0 a 90 cm, (c) profundidad de 0 a 75 cm y (d) profundidad de 0 a 60 cm.

Figure 8. Relations between the measured C and the estimated C, in addition to the relations order $n - \exp(k_n)$ for: (a) Depth from 0 to 105 cm, (b) depth from 0 to 90 cm, (c) depth from 0 to 75 cm and (d) depth from 0 to 60 cm.

Cuadro 3. Resultados de los ajustes por regresión no lineal del modelo de cinética de orden n para diferentes profundidades del COS.
Table 3. Results of the non-linear regression adjustments of the n -order kinetics model for different depths of the SOC.

Sistema	Región	Clave uso de suelo	0-105 cm			0-90 cm			0-75 cm			0-60 cm		
			No.	n	k_n	No.	n	k_n	No.	n	k_n	No.	n	k_n
SVF	Mazateca	BAi-10	3	0.1659	-0.33847	11	0.3114	-0.23145	13	0.1927	-0.37906	18	-0.0580	-1.05011
		BAi-15/20	9	1.6515	-0.00320	10	1.6852	-0.00273	12	2.0962	-0.00076	16	2.9718	-0.00005
		BLi-40	13	1.2312	-0.01563	15	1.2991	-0.01353	16	1.3750	-0.01136	17	1.3807	-0.01170
	Cuicateca	BEn-40										12	2.4713	-0.00612
		ACa-2	8	1.2810	-0.01963	9	1.3086	-0.01893	14	1.2150	-0.02372	15	1.2782	-0.01924
	Mixe	ACa-7	9	1.5701	-0.00721	10	1.5620	-0.00755	20	1.5600	-0.00763	20	1.5204	-0.00871
		ACa-10	9	1.4139	-0.01032	10	1.4774	-0.00861	18	1.3086	-0.01396	19	1.3370	-0.01269
SAP	Mazateca	BPi										7	1.0198	-0.04564
		CBS										14	4.9189	-0.00100
	Cuicateca	PRA				17	3.8264	-3.61E-6						
		PRA	8	1.4737	-0.01016	9	1.4541	-0.00972	15	1.7079	-0.00548	17	1.8183	-0.00418
	Mixe	CBS	9	1.4537	-0.00896	10	1.3617	-0.01269	14	1.1981	-0.02174	17	1.0059	-0.04323
	Mazateca	MIAF-Dur (CS)	6	0.8817	-0.02287	8	0.9433	-0.02184	11	0.1901	-0.19219	15	-1.6784	-60.78
		MIAF-Dur (SC)				5	0.9774	-0.03390	6	0.9894	-0.03607	11	0.7842	-0.07311
SAM	Cuicateca	MIAF-Dur (CY)										9	4.9739	-1.01E-6
		MIAF-Dur (LC)	2	1.2638	-0.01557				4	1.4152	-0.00829	12	0.2463	-0.11126
	Mixe	MIAF-Caf	6	0.7927	-0.04807	10	0.8599	-0.04400	18	0.6759	-0.08836	18	0.4158	-0.24160
	Mazateca	Aco (CS)							18	-2.5033	-530.30	18	0.9847	-0.00509
		Atr (CS)												
		Aco (SC)	7	1.1490	1.14900	11	1.4324	-0.00380	12	1.5632	-0.00281	12	1.3285	-0.00646
		Atr (SC)	9	0.8903	-0.02580	11	1.0798	-0.01484	13	0.8143	-0.03356	18	0.6390	-0.06266
Cuicateca	Aco (CY)													
	Atr (CY)							10	0.9803	-0.02864	17	0.6830	-0.06263	
	Aco (LC)							2	1.7699	-0.00466	11	0.1278	-0.19548	
Mixe	Atr (LC)							5	0.5216	-0.07002	13	0.3726	-0.10636	
	Aco (MI)	8	0.9822	-0.02712	8	0.7701	-0.06260	16	0.6260	-0.11647	16	0.2368	-0.55010	
	Atr (MI)	6	1.0275	-0.02776	9	1.0392	-0.02447	14	0.6776	-0.10512	14	0.4089	-0.32705	

Una característica del caso estudio analizado es la alta variación espacial (horizontal y vertical) natural. González-Molina *et al.* (2008) revisaron si esta variabilidad es producto de protocolos de laboratorio, concluyendo que, para el caso de las concentraciones del carbono, los resultados son reproducibles y no sesgados por los procedimientos analíticos utilizados.

Una posible explicación de la variabilidad observada en los parámetros ajustados al modelo cinético de orden n es la posición de muestreo utilizada.

En el Cuadro 4 se presentan los parámetros del modelo para algunos casos de sitios de medición definidos en la Figura 2b (Sistemas Agrícolas Mixtos y Anuales), el punto B esta bajo la influencia del árbol o planta de cultivo. Se observa de este cuadro que la posición de muestreo B muestra patrón de mayor equilibrio (orden n) que los muestreos sin alta influencia de la vegetación. Los perfiles considerados en el análisis del Cuadro 4 corresponde a las profundidades 0 a 105 centímetros.

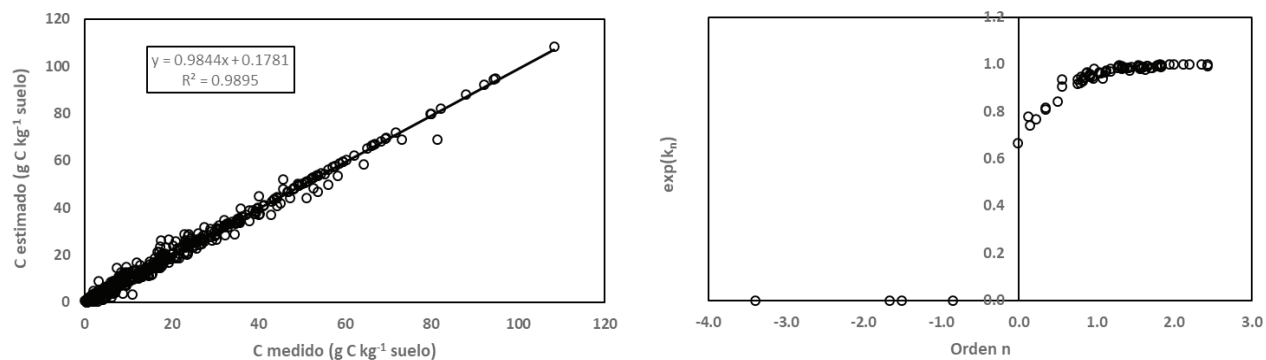


Figura 9. Ajustes de la distribución del COS a profundidad en los perfiles con profundidad mayor o igual a 90 cm, así como la relación entre el orden n y $\exp(k_n)$.

Figure 9. Fits of the SOC distribution at depth in the profiles with depth greater than or equal to 90 cm, as well as the relationship between the order n and $\exp(k_n)$.

Para el COS distribuido a profundidad, el mayor ingreso proviene de las raíces de las plantas (Rasse, Rumpel y Dignac, 2005; Gross y Harrison, 2019), por lo que la zona de la rizosfera (Uren, 2007) define las interacciones con el carbono orgánico del suelo (Hafner, Wiesenberger, Stolnikova, Merz y Kuzyakov, 2014). En los Sistemas Agrícolas Mixtos (agroforestales), la posición de muestreo con relación a la ubicación de los troncos de los árboles define la concentración de los nutrientes, incluido el carbono (Zinke, 1962; Rhoades, 1996; Pardon *et al.*, 2017) y su distribución vertical (Rhoades, 1996; Bayala *et al.*, 2019); aunque también la pendiente y la posición en la misma influyen sobre las concentraciones del COS

(Wei, Shao, Fu y Horton, 2010). En caso de cultivos agrícolas y tipos de labranza, la posición del muestreo en relación a las hileras y espacio entre hileras, también cambia la concentración del COS y las emisiones de CO_2 y estructura de la matriz del suelo (da Silva, Ball, Tormena, Giarola y Guimarães, 2014; Ferreira *et al.*, 2015). El uso de promedios aritméticos no refleja los pesos de los puntos de muestreo en términos de una función de decaimiento de la influencia de los árboles o plantas, por lo es necesario realizar un promedio ponderado para considerar esta situación.

La modelación de la distribución vertical del COS asociado a diferentes usos del suelos y prácticas de manejo permite caracterizar sus patrones. El considerar el carbono orgánico a profundidad (integrado) permite analizar en forma completa los efectos del manejo de los cultivos, y así evitar enfoques parciales de evaluación de prácticas como la labranza de conservación (Baker, Ochsner, Venterea y Griffis, 2006).

CONCLUSIONES

La distribución del carbono a profundidad debe considerarse para tener una visión mejor del almacén y sus mecanismos de estabilización y desestabilización, implicados en el orden de la cinética. La modelación del carbono orgánico del suelo a profundidad requiere de esquemas alternativos simples (menos parámetros), pero que consideren la complejidad de los procesos asociados, en forma genérica.

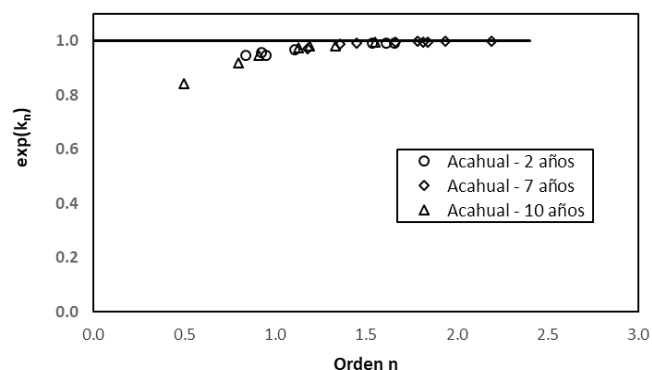


Figura 10. Patrón de la relación orden n – $\exp(k_n)$ para los acahuales de la región Mixe.

Figure 10. Pattern of the relationship order n – $\exp(k_n)$ for the acahuales of the Mixe Region.

Cuadro 4. Resultados del ajuste del modelo de cinética de orden n en función de la repetición y posición del punto de muestra para Sistemas Agrícolas Mixtos y Anuales, profundidad de 0 a 105 cm.**Table 4. Results of the fit of the n -order kinetics model as a function of the repetition and position of the sample point for Mixed and Annual Agricultural Systems, depth from 0 to 105 cm.**

Región	Vegetación	Repetición	Posición	n	k_n	$\exp(k_n)$	R ²
Mazateca	Labranza Conservación (SC)	1	C	1.2921	-0.00573	0.99429	0.9976
Mazateca	Labranza Conservación (SC)	2	B	2.4322	-0.00016	0.99984	0.9916
Mazateca	Labranza Conservación (SC)	2	B	1.8135	-0.00136	0.99864	0.9869
Mixe	MIAF-Café	3	A	0.3408	-0.20319	0.81612	0.9925
Mixe	MIAF-Café	3	B	0.8220	-0.07352	0.92911	0.9969
Mixe	MIAF-Café	3	B	0.7626	-0.08535	0.91819	0.9902
Mixe	Labranza Tradicional (MI)	2	C	0.8681	-0.03740	0.96329	0.9843
Mixe	Labranza Tradicional (MI)	3	B	2.3589	-0.00009	0.99991	0.9661
Mixe	Labranza Conservación (MI)	3	A	0.7991	-0.05319	0.94820	0.9839
Mixe	Labranza Conservación (MI)	3	B	1.2814	-0.00824	0.99180	0.9837
Mixe	Labranza Conservación (MI)	3	C	1.5379	-0.00352	0.99649	0.9554

El modelo de cinética de orden n introducido se ajustó a los datos de diferentes perfiles de suelos asociados a diferentes usos del suelo y prácticas de manejo, generando resultados aceptables (generalmente $R^2 > 0.99$), por lo que su aplicación empírica quedó demostrada.

El uso de una cinética de reacción de orden n implica un proceso iterativo de modificación del carbono orgánico en el suelo (profundidad y tiempo), que podría modelar un gran número de subprocesos. En esta perspectiva, de acuerdo a la evidencia empírica presentada, es necesario el desarrollo teórico para la modelación continua de la dinámica del carbono, bajo la consideración de un solo almacén, que no utiliza almacenes virtuales y cinéticas asociadas.

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

LITERATURA CITADA

- Acosta, M., Etchevers, J. D., Monreal, C., Quednow, K., & Hidalgo, C. (2001). Un método para la medición del carbono en los compartimentos subterráneos (raíces y suelos) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales* (pp. 9-18). Valdivia, Chile. Disponible en http://www.iufro.org/download/file/6976/153/ws13papeles1_pdf/
- Bailey, V. L., Hicks Pries, C., & Lajtha, K. (2019). What do we know about soil carbon stabilization? *Environmental Research Letters*, 14(8), 1-15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2c11>
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., & Griffis, T. J. (2006). Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1-4), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.014>

- Bayala, J., Sanou, J., Bazié, H. R., Coe, R., Kalinganiere, A., & Sinclair, F. L. (2019). Regenerated trees in farmers' fields increase soil carbon across the Sahel. *Agroforestry Systems*, 94, 401-415. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00403-6>
- 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>
- Campbell, E. E., & Paustian, K. (2015). Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environmental Research Letters*, 10(12), 123004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/123004>
- Chabbi, A., & Rumpel, C. (2009). Organic matter dynamics in agro-ecosystems – the knowledge gaps. *European Journal of Soil Science*, 60(2), 153-157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01116.x>
- Cortés-Flores, J. I. (2001). Subproyecto III: Tecnologías alternativas sustentables. En *Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) de las regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe del estado de Oaxaca, México* (pp. 52-63). Montecillo, México: COLPOS.
- Cortés-Flores, J. I., Turrent, A., Díaz, P., Jiménez, L., Hernández, E., & Mendoza, R. (2005). Hillside agriculture and food security in Mexico: Advances in the sustainable hillside management project. In R. Lal, N. Uphoff, B. A. Stewart, & D. O. Hansen. (Eds.). *Climate change and global food security* (pp. 569-588), chapter 23. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420028614>
- Covaleda, S., Paz, F., & Ranero, A. (2016). Carbono edáfico en Chiapas: planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 97-112.
- Covaleda, S., Paz, F., & Ranero, A. (2018). Escenarios de mitigación de emisiones para el sector rural del Estado de Chiapas utilizando modelos de estados y transiciones. *Madera y Bosques*, 24(núm. especial), e2401897. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401897>
- da Silva, A. P., Ball, B. C., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B., & Guimarães, R. M. L. (2014). Soil structure and greenhouse gas production differences between row and interrow position under no-tillage. *Scientia Agricola*, 71(2), 157-162.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., & Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan: IPCC.
- El Seoud, O. A., Baader, W. J., & Bastos, E. L. (2016). Practical chemical kinetics in solution. In Z. Wang (Ed.). *Encyclopedia of physical organic chemistry* (pp. 1-68). New York, NY, USA: John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118468586.epoc1012>
- Etchevers, J. D. (2001). Subproyecto II: Metodología para la medición de la captura de carbono. Informe (2001). En *Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) de las regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe del estado de Oaxaca, México*. Montecillo, México: COLPOS.
- Etchevers, J. D., Acosta, M., Monreal, C., Quednow, K., & Jiménez, L. (2001). *Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México*. En Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales (pp. 39-50). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Etchevers, J. D., Acosta, M., Monreal, C., Hidalgo, C., Padilla, J., & Jiménez, L. (2003). Below-ground (roots and soil) compartments of carbon in forest and agricultural systems on hillsides of Mexico. In C. A. Scott Smith (Ed.). *Soil organic carbon and agriculture: Developing indicators for policy analysis* (pp. 163-172). Ottawa, ON, Canada: Agriculture and Agri-Food Canada
- Etchevers, J. D., Monreal, C. M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., & López, R. M. (2005a). *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*. Texcoco, Edo. de México, México: Colegio de Postgraduados.
- Etchevers, J. D., Vergara, M. A., Acosta, M., Monreal, C. M., & Jiménez, L. (2005b). Soil organic carbon, quality index, and soil fertility in hillside agriculture. In R. Lal, B. A. Stewart, N. Uphoff, & D. O. Hansen (Ed.). *Climate change and global food security* (pp. 589-604). Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis.
- Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Moreira, W. H., Zotarelli, L., Betioli, E., & Anghinoni, G. (2016). Sampling position under no-tillage systems affect the results of soil physical properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150189>
- Foster, D., Swanson, F., Aber, J., Burke, I., Brokaw, N., Tilman, D., & Knapp, A. (2003). The importance of land-use legacies to ecology and conservation. *BioScience*, 53(1), 77-88. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0077:TIOULU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0077:TIOULU]2.0.CO;2)
- Franzluebbers, A. J. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95-106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00018-1)
- Franzluebbers, A. J. (2010). Depth distribution of soil organic carbon as a signature of soil quality. In R. J. Gilkes, & N. Prakougep (Eds.). *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science* (pp. 1-6). Brisbane, Qld., Australia: WCSS.
- González-Molina, L., Etchevers, J. D., González, J. M., & Paz, F. (2010). Soil organic carbon changes at the plot level in hillside systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4), 508-515. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.010>
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J. D., & Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751.
- Gross, C. D., & Harrison, R. B. (2019). The case of digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 3(2), 28 <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Hafner, S., Wiesenberg, G. L. B., Stolnikova, E., Merz, K., & Kuzyakov, Y. (2014). Spatial distribution and turnover of root-derived carbon in alfalfa rhizosphere depending in top- and subsoil properties and mycorrhization. *Plant and Soil*, 380(1), 101-115. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2059-z>
- Harrison, R. B., Footen, P. W., & Strahm, B. D. (2011). Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools 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>

- Hicks-Pries, C. E., 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>
- Hilinski, T. E. (2001). *Implementation of exponential depth distribution of organic carbon in the CENTURY model*. Dep. of Soil and Crop Sci. Fort Collins, CO, USA: Colorado State Univ.
- 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>
- 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>
- Jenkinson, D. S., Poulton, P. R., & Bryant, C. (2008). The turnover of organic carbon in subsoils. Part 1. Natural and bomb radiocarbon in soil profiles from the Rothamsted long-term field experiments. *European Journal of Soil Science*, 59(2), 391-399.
- 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>
- 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)
- 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 delay 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., & 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., Stockmann, U., Hartemink, A. E., & McBratney, A. B. (2006). Measuring and modelling soil depth functions. In: A. E. Hartemink, & B. Minasny (Eds.). *Digital soil morphometrics. Progress in Soil Science* (pp. 225-240). Switzerland: Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28295-4_14
- 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 and Water Management and Conservation*, 73(2), 614-621. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0410>
- Monreal, C. M., Etchevers, J. D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R. M., ... Velázquez, A. (2005). A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(Special Issue), 523-530. <https://doi.org/10.4141/S04-086>
- 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., & 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), 309-312. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90028-7)
- Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., ... Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.018>
- Paustian, K., Collins, H. P., & Paul, E. A. (1997). Management controls on soil carbon. In E. A. Paul, E. T. Elliott, K. Paustian, & C. V. Cole (Eds.). *Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long term experiments in North America* (pp. 15-49). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367811693>
- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2019). Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, 1, 8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Paz, F., Balbontín, C., Etchevers, J., Martínez, M., & Ortiz, C. (2008). Análisis multifractal del carbono en los suelos 1. Función universal de escalamiento. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 183-191.
- Paz, F., Balbontín, C., Etchevers, J., Martínez, M., & Ortiz, C. (2009). Análisis multifractal del carbono en los suelos 2. Divergencia de momentos estadísticos. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 257-264.
- Paz, F., Balbontín, C., Etchevers, J., Martínez, M., & Ortiz, C. (2010). Análisis multifractal del carbono en los suelos 3. Estimaciones escalantes. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 89-95.
- Paz, F., & Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Paz, F., Argumedo, J., Cruz, C. O., Etchevers, 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: IPCC.

- PMSL (Proyecto Manejo Sostenible de Laderas). (2001). *Manejo sostenible de laderas. Regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe, estado de Oaxaca, México*. Investigación/Desarrollo 1999-2005. Texcoco, Edo. de México, México: Colpos.
- Post, W. M., Izaurrealde, R. C., Mann, L. K., & Bliss, N. (2001). Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. In N. J. Rosenberg, & R. C. Izaurrealde (Eds.). *Storing carbon in agricultural soils: A multi-purpose environmental strategy* (pp. 73-99). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3089-1_4
- Rasse, D. P., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil*, 269(1), 341-356. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
- Rhoades, C. C. (1996). Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural forest and savanna ecosystems. *Agroforestry Systems*, 35(1), 71-94. <https://doi.org/10.1007/BF02345330>
- Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338, 143-158. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>
- Sanderman, J., & Baldock, J. A. (2010). Accounting for soil carbon sequestration in national inventories: a soil scientist's perspective. *Environmental Research Letters*, 5(3), 034003.
- 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>
- Smith, P. (2008). Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2), 169-178. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y>
- Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74(1-2), 65-105. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5)
- Stanford, G. (1969). Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: 2. A kinetic approach to estimating the NAOH-distillable fraction. *Soil Science*, 107(5), 323-328.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... Zimmeermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, 80-99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- Uren, N. (2007). Types, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil-grown plants. In R. Pinton, Z. Varanini, & P. Nanipieri (Eds.). *The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface* (pp. 35-56). Boca Rato, FL, USA: CRC Press.
- Vergara-Sánchez, M. Á., & Etchevers-Barra, J. D. (2006). Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 40(5), 557-567.
- Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Vargas-Hernández, M. (2004). Variabilidad del9 carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 359-367.
- von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, K., 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>
- Wei, X., Shao, M., Fu, X., & Horton, R. (2010). Changes in soil organic carbon and total nitrogen after 28 years grassland afforestation: effect of tree species, slope position, and soil order. *Plant and Soil*, 331(1), 165-179. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0243-3>
- Whitmore, A. P. (1996a). Alternative kinetic laws to describe the turnover of the microbial biomass. *Plant and Soil*, 181(1), 169-173. <https://doi.org/10.1007/BF00011304>
- Whitmore, A. P. (1996b). Describing the mineralization of carbon added to soil in crop residues using second-order kinetics. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(10-11), 1435-1442. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00153-8)
- Zinke, P. J. (1962). The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecology*, 43(1), 130-133. <https://doi.org/10.2307/1932049>
- 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, 175-185. <https://doi.org/10.1023/A:1010350020951>