

Distribución de agregados y carbono orgánico asociado de los suelos con relación a diferentes tipos de usos de suelo y profundidades

Distribution of soil aggregates and associated organic carbon in relation to different types of land uses and depths

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

¹ 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.

[‡] Autor para correspondencia (ferpazpel@gmail.com)

³ Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, el Cerrito, Piedras Blancas. Toluca de Lerdo, Estado de México, México.

RESUMEN

La distribución de los agregados (masas) en diferentes usos de suelo y profundidades permite caracterizar su estabilidad estructural y comprender los cambios de la dinámica de la distribución del carbono y masa en función del tamaño de los agregados. Para modelar la distribución y masa de los agregados a diferentes profundidades para diferentes usos de suelo se analizaron siete usos de suelo: bosque de *Abies* (BAr), bosque de *Cupressus* (BCr), bosque de *Quercus* (BQr), bosque de *Abies* con incendio forestal (BAq), bosque secundario o achual de *Quercus* (Bs), pastizal (Pz) y agrícola con labranza tradicional (Agt), todos ellos localizados en el monte Tláloc en Texcoco, Estado de México. Adicionalmente se seleccionó un sitio de agricultura de conservación (Agc) en la parte baja del monte Tláloc. Para desarrollar un modelo general, se partió del análisis de los patrones de la distribución de la masa acumulada (M acum) y carbono acumulado (C acum) con relación a las dimensiones de los agregados, para diferentes profundidades en cada uso del suelo. Con base en los modelos matemáticos ajustados, se planteó un modelo general de cinética de orden n como causa para las soluciones observadas. Los ajustes estadísticos fueron excelentes ($R^2 > 0.99$, generalmente).

Palabras clave: cinética de orden n , estabilidad estructural, paradigma Darwiniano, patrones y procesos.

SUMMARY

The aggregates distribution (masses) in different land uses and depths allows characterizing their structural stability and understanding the changes in the dynamics of carbon and mass distribution depending on the aggregates size. To model the distribution and mass of aggregates related to depth for different land uses, seven land uses were analyzed: *Abies* forest (BAr), *Cupressus* forest (BCr), *Quercus* forest (BQr), *Abies* forest with forest fire (BAq), *Quercus* secondary forest (Bs), grassland (Pz) and agriculture with traditional tillage (Agt), all located on Mount Tlaloc in Texcoco, State of Mexico. Additionally, a conservation agriculture site (Agc) was selected in the lower part of Mount Tlaloc. To develop a general model, we started from the analysis of the patterns of the distribution of the accumulated mass (M acum) and accumulated carbon (C acum) in relation to the size of the aggregates, for different soil depths in each land use. Based on the adjusted mathematical models, a general model of n order kinetics was proposed as a cause for the observed

Cita recomendada:

Barrales-Brito, E., Paz-Pellat, F., Velázquez-Rodríguez, A. S., Hidalgo-Moreno, C. y Etchevers-Barra, J. D. (2021). Distribución de agregados y carbono orgánico asociado de los suelos con relación a diferentes tipos de usos de suelo y profundidades. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-22. e1318. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.1318>

Recibido: 25 de agosto de 2021. Aceptado: 14 de diciembre de 2021.
Artículo. Volumen 39, diciembre de 2021.

solutions. The statistical adjustments were excellent ($R^2 > 0.99$, generally).

Index words: *n order kinetics, structural stability, Darwinian paradigm, patterns and processes.*

INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de los principales almacenes de carbono (C) globales, ya que es de dos a tres veces mayor que el atmosférico y el de la vegetación terrestre (Lal, 2004), por lo que es necesario modelar el efecto que las perturbaciones antropogénicas y naturales en los cambios de este almacén, para predecir sus impactos.

Agregados de los Suelos

En condiciones naturales, o de laboratorio, el suelo tiene una estructura representada por el tamaño y arreglo de partículas y poros en su matriz (Bronick y Lal, 2005). Usando técnicas de fraccionamiento físico, la matriz del suelo puede ser caracterizada por (Christensen, 2001): (a) materia orgánica libre u ocluida en agregados, sin formar complejos órgano-minerales; (b) complejos órgano-minerales primarios y, (c) complejos órgano-minerales secundarios (agregados). Los agregados de los suelos son partículas secundarias (unidades estructurales) formadas por la combinación de partículas minerales con agentes cementantes orgánicos o inorgánicos (Bronick y Lal, 2005). Los agregados son generalmente clasificados como microagregados ($< 250 \mu\text{m}$) y macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$) (Tisdall y Oades, 1982), y éstos pueden a su vez agruparse por clases de tamaños de los diámetros de los tamices utilizados. El secuestro de C en el suelo es función del sistema arquitectónico de empaquetamiento de los agregados (Blanco-Canqui y Lal, 2004).

Formación de Agregados

De acuerdo a la teoría jerárquica de agregados de Tisdall y Oades (1982), éstos se forman de tamaños menores a mayores (las partículas primarias forman microagregados y éstas macroagregados), usando agentes cementantes transitorios, temporales y persistentes, donde la resistencia de los agregados se incrementa al aumentar la temporalidad del cementante.

Los macroagregados tienen cementantes transitorios y los microagregados persistentes, por lo que estos últimos son más densos, resistentes y estables. Esta teoría fue modificada posteriormente por Oades (1984) al proponer que los microagregados son creados por la destrucción de los macroagregados, como paso previo para su formación. De esta manera, los microagregados se forman primero dentro de los macroagregados. La materia orgánica del suelo es el principal agente cementante en la teoría jerárquica de agregados. Six, Paustian, Elliot y Combrink (2000b) propusieron un modelo conceptual de formación y estabilización de agregados, donde los macroagregados son formados por la unión de residuos orgánicos frescos, después la materia orgánica particulada de los interagregados finos estabiliza a los macroagregados, permitiendo que las partículas orgánicas finas queden incrustadas en los microagregados, de tal forma que la degradación de los macroagregados produce microagregados estables ricos en materia orgánica. Una discusión detallada de los mecanismos de formación, y factores controlantes, de los agregados puede ser encontrada en la literatura (Amézketa, 1999; Six, Bossuyt, Degryze y Deneff, 2004; Kumar, Rawat, Singh, Singh y Rai, 2013; Totsche *et al.*, 2018), incluyendo su capacidad de secuestro de C (Balesdent, Chenu y Balabane, 2000; Blanco-Canqui y Lal, 2004; Bronick y Lal, 2005; Kumar *et al.*, 2013). Los mecanismos de estabilización y desestabilización del COS en los agregados también han sido revisados en la literatura (Tisdall y Oades, 1982; Sollins, Homman y Caldwell, 1996; Six, Conant, Paul y Paustian, 2002; Kumar *et al.*, 2013).

Métodos para Medir la Estabilidad de Agregados

Para analizar la estabilidad de los agregados (resistencia a la disgregación del suelo al aplicar energía) se han estandarizado métodos para determinar la distribución de las masas de agregados de diferentes tamaños (Kemper y Rosenau, 1986), donde se aplica agitación (energía fija) a un conjunto de mallas de múltiples tamaños. Las técnicas de fraccionamiento usando tamices pueden ser en seco o en húmedo (Kemper y Rosenau, 1986). El tamizado en seco está asociado a la estabilidad de los agregados por la desintegración mecánica y el húmedo incluye efectos adicionales del proceso de humidificación. El tamizado en seco es el método más popular para analizar los efectos de la labranza y erosión eólica (Kemper

y Rosenau, 1986) y es el preferido para mantener un hábitat relativamente intacto y la actividad de los microorganismos (Schutter y Dick, 2002), reflejando condiciones de campo secas, sin riego o lluvia.

Estabilidad Estructural y Distribución de las Masas de los Agregados

La estabilidad estructural es generalmente cuantificada usando diferentes índices que reflejan las relaciones entre las masas de los agregados. Es práctica común usar el diámetro medio ponderado (DMP) o el diámetro medio geométrico (Kemper y Rosenau, 1986), además de una gran variedad de índices en función de la distribución de las masas de los agregados (Six, Elliot y Paustian, 2000a; Márquez, García, Cambardella, Schultz e Isenhardt, 2004; Niewczas y Witkowska, 2005; Nichols y Toro, 2011). Una alternativa integral es modelar la distribución de los agregados (distribución acumulada de masas) usando modelos de distribuciones de probabilidad, los cuales pueden ser de uno a cuatro parámetros (Perfect, Kay, Ferguson, da Silva y Denholm, 1993; Tirgarsoltani, Gorji, Mohammadi y Millan, 2014), donde el modelo potencial ha resultado en buenos ajustes experimentales (Baldock y Kay, 1987; Paz-Pellat, Hidalgo, Etchevers y Fuentes, 2012; Fuentes, Paz, Hidalgo y Etchevers, 2012; Velázquez, Paz, Hidalgo y Etchevers, 2012), que corresponde al modelo fractal (Tyler y Wheatcraft, 1992), bajo ciertas condiciones, de distribución de masas de los agregados. Los índices de estabilidad de agregados pueden ser construidos usando los parámetros de los modelos de la distribución de agregados (Tirgarsoltani *et al.*, 2014; Paz-Pellat *et al.*, 2012) o usar directamente los parámetros para calcular cualquier índice asociado a la distribución de las masas de los agregados (Baldock y Kay, 1987). La distribución de la masa de los agregados es función de la energía de rotura de los mismos (Hadas, 1987; Perfect y Kay, 1994), por lo que es necesario estandarizar la energía aplicada (v. g. ciclos de agitación por minuto en el tamizado en seco) para poder hacer comparaciones con los resultados obtenidos (Kemper y Rosenau, 1986). La aplicación de la labranza y las cargas vehiculares en suelos agrícolas, por ejemplo, están relacionadas con la energía usada para la disgregación de agregados (Hadas, 1987), aunque resulta sumamente difícil replicarla en el laboratorio.

Uso del Suelo y Prácticas de Manejo

Los cambios de uso del suelo (vegetación natural a pastizales o agricultura, por ejemplo) modifican la distribución de los agregados y los contenidos de C asociados a éstos (Gajic, Dugalic y Djurovic, 2006; Ćirić, Manojlovic, Nesić y Belić, 2012; Paz-Pellat y Etchevers, 2016). Los macroagregados contienen la mayor cantidad de C, aunque son poco resistentes a la aplicación de energía, rompiéndose y liberando carbono que se manifiesta en tasas de mineralización altas (Balesdent *et al.*, 2000; Blanco-Canqui y Lal, 2004). Generalmente, entre mayor sea el tamaño de los agregados (DMP), mayor el contenido de COS (Bronick y Lal, 2005). La intensidad de la labranza del suelo reduce el tamaño de los agregados, disminuyendo el COS (Balesdent *et al.*, 2000). Los bosques mejoran la agregación y transfieren el COS a profundidad y los pastizales tienen mejor agregación y COS que los cultivos agrícolas (Blanco-Canqui y Lal, 2004). La práctica de labranza de conservación mejora la agregación y COS en relación a la labranza tradicional (Balesdent *et al.*, 2000; Blanco-Canqui y Lal, 2004).

Agregación de los Suelos a Profundidad

En lo general, el análisis de la distribución de agregados y el carbono asociado es estudiado a profundidades no mayores a 30 cm, representando parcialmente el perfil del suelo. Este tipo de caracterización introduce sesgos en relación al secuestro de carbono asociado a prácticas de labranza de conservación (Baker, Ochsner, Venterea y Griffis, 2006), por lo que es necesario realizar un análisis de todo el perfil del suelo, hasta una profundidad de un metro, dado que el ingreso de C a distintas profundidades del suelo presenta mezclas de C viejo y nuevo (Balesdent *et al.*, 2018). El patrón de distribución del COS muestra una reducción de éste a medida que la profundidad se incrementa (Paz-Pellat y Etchevers, 2016; Paz-Pellat *et al.*, 2019), lo que implica menor agente cementante para los agregados. La profundidad radical de la vegetación no muestra una relación marcada con la distribución del COS (Jobbágy y Jackson, 2000). Los macroagregados se reducen con la profundidad del suelo, particularmente cuando están sujetos a cambios del uso del suelo (Greacen, 1958; Gajic *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2019), lo cual puede ser interpretado como

una menor energía de rotura aplicada; aunque existen otro tipo de procesos (descomposición, transporte y bioturbación) asociados.

Paradigma de Modelación y Objetivos Perseguidos

El paradigma clásico de ciencia actual (realizar mediciones bajo conceptos de hipótesis a validar en términos estadísticos) es costoso y poco eficiente para su desarrollo en México, requiriendo gran cantidad de datos para la generación de modelos de tipo mecanicista. Este paradigma Newtoniano o mecanicista contrasta con enfoques de modelación tipo Darwinianos u holísticos (Harte, 2002), que plantea esquemas de generación de conocimiento integrales, simplificando las aproximaciones en función de la información disponible. Un problema típico encontrado en la modelación de patrones observados es el uso de diferentes modelos matemáticos, implicando diferentes procesos. El paradigma planteado en este trabajo es primero analizar la información disponible en la búsqueda de patrones (regularidades o singularidades – Hutchinson, 1953; Keddy, 2005) que puedan definir mecanismos o procesos asociados; aunque un patrón puede asociarse a múltiples mecanismos (Lawton, 1999), lo cual es definido como equifinalidad (Beven y Freer, 2001). No obstante esta perspectiva de explicaciones múltiples, el desarrollo de una lógica de conexiones axiomáticas para obtener explicaciones generales (Reiners, 1986) permite aproximar los procesos en forma progresiva fundamentada en el enfoque de que los datos definen el camino, para obtener las respuestas correctas por las razones correctas (Kirchner, 2006), planteando su fundamento en los patrones observados (Grimm, 1994; Grimm *et al.*, 1996; Grimm y Railsback, 2012) y la escala de observación (Levin, 1992). Los enfoques mecanicistas requieren una gran cantidad de datos para ser parametrizados, sin que implique una mejoría en sus predicciones, lo que los hace inviables a la escala de país por sus costos e información disponible.

En el caso particular de la dinámica del carbono (C) en los suelos de México se ha intentado parametrizar modelos mecanicistas (Mäser *et al.*, 2003; Coleman y Jenkinson, 1996) con éxito relativo (Álvarez y Rubio, 2012; González *et al.*, 2011 y 2016). A escala nacional, la información disponible consiste del COS total, además de datos de textura (porcentaje de tamaños de las partículas o fracciones físicas del

suelo) (Etchevers, 2013; Paz-Pellat *et al.*, 2019), lo que no permite el desarrollo o aplicación de modelos mecanicistas clásicos, por lo que es necesario el desarrollo de paradigmas Darwinianos, condicionados a la información disponible. En esta perspectiva, el desarrollo de esquemas de modelación generales y, de preferencia, simplificados, pero precisos que usen solo un dato (adicional al COS total y textura), es el objetivo del enfoque de modelación utilizado en este trabajo, además de mostrar el abuso en el uso de modelos estadísticos sin usar conocimiento de los procesos involucrados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de los Sitios de Estudio

El área de estudio está ubicada en el monte Tláloc en el municipio de Texcoco, Estado de México. La vegetación el área comprende bosques de *Abies*, *Cupressus*, *Quercus* y *Pinus*, con diferentes niveles de perturbación que van de acahuales (bosques secundarios) y bosques que sufrieron un incendio hace 15 años a cultivos agrícolas y pastizales. El área forma parte de una red de sitios de monitoreo permanentes para evaluar los almacenes de carbono, incluido el del suelo (Bolaños, Bolaños, Paz y Ponce, 2017).

El clima es semifrío subhúmedo en las partes altas, donde se localizan los bosques de *Abies*, *Cupressus* y *Quercus*, pastizal y acahual y un clima templado subhúmedo en las zonas bajas con uso agrícola con prácticas tradicionales (INEGI, 2008).

Se seleccionaron siete sitios con diferentes usos de suelo: bosque de *Abies* (BAr), bosque de *Cupressus* (BCr), bosque de *Quercus* (BQr), bosque de *Abies* con incendio forestal (BAq), bosque secundario o acahual de *Quercus* (Bs), pastizal (Pz) y agrícola con labranza tradicional (Agt). Adicionalmente se seleccionó un sitio de agricultura de conservación (Agc) ubicado en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, planicie cercana al monte Tláloc, en Montecillo, Estado de México. La letra *r* es para denotar un bosque de referencia; es decir, un bosque no perturbado o con perturbación mínima, para tener un estándar de comparación.

En el Cuadro 1 se presentan las coordenadas de los sitios de muestreo, así como su altitud y tipo de suelo.

Cuadro 1. Localización geográfica y altitud de los sitios de estudio.
Table 1. Geographical location and altitude of the study sites.

Sitio	Uso de suelo	Latitud N	Longitud O	Altitud (m)	Suelo
1.00	BAr (<i>Abies</i>)	19° 27' 05.3''	98° 45' 06.6''	2931	Luvisol
2.00	BCr (<i>Cupressus</i>)	19° 27' 45.5''	98° 45' 30.9''	3365	Luvisol
3.00	BQr (<i>Quercus</i>)	19° 26' 56.9''	98° 46' 17.0''	3192	Luvisol
4.00	BAq (<i>Abies</i> con incendio)	19° 27' 05.1''	98° 27' 05.1''	2968	Luvisol
5.00	Bs (Acahual)	19° 26' 47.1''	98° 46' 35.2''	2962	Luvisol
6.00	Pz (Pastizal)	19° 27' 47.6''	98° 45' 42.2''	3042	Luvisol
7.00	Agt (Agrícola tradicional)	19° 28' 08.8''	98° 46' 10.3''	2857	Phaozem
8.00	Agc (Agrícola de conservación)	19° 28' 04.8''	98° 53' 45.0''	2244	Vertisol

Mediciones en los Perfiles de Suelos

Se analizó la textura con el método de la pipeta (Burt, 2004). Para observar los cambios por uso de suelo y profundidad, se midió la concentración de carbono con un analizador de carbono TOC (marca Shimadzu, modelo A5050).

Se determinó la proporción del tamaño de agregados en seco, por el método de agitación mecánica. Se colocó 1 kg de suelo seco al aire en un juego de tamices de malla 3, 4, 6, 10, 18, 35, 60, los cuales corresponden a tamaño de agregados de macroagregados (6.36, 4.76 y 3.36 mm), mesoagregados (2.00 y 1.00 mm) y microagregados (0.50, 0.25 y <0.25 mm). Posteriormente se colocaron en el agitador mecánico y se agitaron a 210 ciclos min^{-1} durante 5 min. Se pesó la cantidad de suelo en cada tamiz después de la agitación y se determinó el porcentaje en cada tamaño de agregado.

En el Cuadro 2 se muestran las características de los suelos, a profundidades incrementales de 10 centímetros.

Análisis Estadísticos

Los modelos desarrollados fueron evaluados usando una comparación entre lo medido (Y_i) y lo estimado (\hat{Y}_i), en función de su pendiente (d) e intersección o sesgo (c):

$$Y_{\text{estimado}} = c + d Y_{\text{medido}} \quad (1)$$

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):

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

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

$$EAM = 100 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \right\} \quad (3)$$

Modelo Inicial de la Distribución de Masa y Carbono en los Tamaños de los Agregados

Las relaciones a modelar fueron la masa acumulada (M acum) y carbono orgánico acumulado (C acum), de menor a mayor, por tamaño de agregados. Si se normaliza la masa acumulada y el COS por sus totales (obteniendo valores de 0 a 1), esto representa el equivalente a una distribución de probabilidad acumulada.

Con la consideración que no se conoce el tamaño máximo superior a la malla más grande usada, los datos fueron truncados usando esta última como límite superior, por lo que los valores de C de la distribución de agregados no coinciden con los mostrados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características (promedios y desviaciones estándar entre paréntesis, tres repeticiones para textura y dos repeticiones para C) de los suelos de los sitios de estudio, a diferentes niveles de profundidad (incrementos de 10 cm).**Table 2. Characteristics (means and standard deviations in parentheses, three repetitions for texture and two repetitions for C) of the soils of the study sites, at different depth levels (10 cm increments).**

Uso del Suelo	Prof.	Arena	Limo	Arcilla	C	Uso del Suelo	Prof.	Arena	Limo	Arcilla	C
	cm	- - - - - % - - - - -			g kg ⁻¹		cm	- - - - - % - - - - -			g kg ⁻¹
BAr	0-10	27.2 (1.4)	23.5 (0.4)	49.3 (0.9)	59.2 (0.3)	BS	0-10	25.7 (5.4)	55.8 (4.0)	18.6 (1.3)	32.5 (0.7)
	10-20	27.5 (1.5)	23.4 (0.5)	49.1 (1.0)	31.2 (0.2)		10-20	81.9 (0.3)	1.5 (0.0)	16.5 (0.3)	24.4 (0.3)
	20-30	51.0 (2.0)	36.7 (1.5)	12.2 (0.5)	24.7 (0.8)		20-30	48.0 (0.4)	30.8 (0.3)	21.2 (0.2)	23.9 (0.2)
	30-40	58.6 (2.1)	20.0 (1.0)	21.4 (1.1)	15.6 (0.2)		30-40	18.2 (0.5)	67.3 (0.4)	14.5 (0.1)	15.9 (0.0)
	40-50	51.5 (1.0)	38.9 (0.8)	9.6 (0.2)	14.0 (0.1)		40-50	35.9 (2.3)	53.2 (1.9)	10.9 (0.4)	12.1 (0.4)
	50-60	46.4 (2.5)	49.8 (2.4)	3.8 (0.2)	11.6 (0.3)		50-60	46.7 (1.8)	27.4 (0.9)	25.9 (0.9)	6.7 (0.1)
	60-70	20.5 (2.3)	65.5 (1.9)	14.0 (0.4)	8.7 (0.2)		60-70	41.7 (0.1)	40.4 (0.1)	17.9 (0.0)	6.4 (0.0)
	70-80	33.9 (1.0)	50.9 (0.8)	15.2 (0.2)	4.0 (0.0)		70-80	44.3 (0.9)	49.6 (0.8)	6.1 (0.1)	6.1 (0.0)
	80-90	44.4 (2.2)	33.5 (1.3)	22.1 (0.9)	3.4 (0.3)		80-90	10.4 (0.3)	54.1 (0.2)	35.5 (0.1)	3.7 (1.2)
	90-100	45.1 (1.1)	35.1 (0.7)	19.8 (0.4)	2.0 (0.5)		90-100	56.6 (0.6)	24.7 (0.3)	18.7 (0.2)	3.3 (0.8)
BCr	0-10	9.6 (0.8)	68.5 (0.6)	21.9 (0.2)	96.8 (7.5)	Pz	0-10	40.3 (1.5)	46.5 (1.2)	13.2 (0.3)	42.9 (11.6)
	10-20	18.5 (2.1)	66.2 (1.7)	15.3 (0.4)	24.3 (0.9)		10-20	39.2 (1.3)	49.1 (1.0)	11.7 (0.2)	35.5 (6.4)
	20-30	20.2 (0.0)	63.2(0.0)	15.0 (0.0)	20.5 (0.4)		20-30	35.4 (3.0)	56.6 (2.6)	8.1 (0.4)	30.2 (0.6)
	30-40	46.4 (0.6)	47.9 (0.6)	5.7 (0.1)	12.5 (0.1)		30-40	50.0 (2.0)	33.9 (1.4)	16.2 (0.6)	28.8 (0.2)
	40-50	20.7 (1.4)	65.6 (1.1)	13.7 (0.2)	10.3 (0.2)		40-50	44.8 (2.1)	39.3 (1.5)	15.8 (0.6)	22.9 (7.5)
	50-60	39.0 (1.3)	44.1 (0.9)	16.9 (0.3)	10.3 (0.3)		50-60	46.9 (1.3)	33.2 (0.8)	19.9 (0.5)	22.8 (7.6)
	60-70	36.7 (1.1)	34.3 (0.6)	29.0 (0.5)	9.3 (0.7)		60-70	51.6 (1.1)	28.8 (0.6)	19.7 (0.4)	14.7 (3.6)
	70-80	37.8 (1.2)	46.7 (0.9)	15.6 (0.3)	8.1 (0.3)		70-80	46.1 (1.8)	33.7 (1.1)	20.2 (0.7)	13.5 (0.5)
	80-90	50.7 (0.7)	31.1 (0.4)	18.2 (0.3)	5.7 (0.5)		80-90	37.3 (1.3)	34.0 (0.7)	28.8 (0.6)	3.0 (1.4)
	90-100	49.6 (2.0)	35.5 (1.4)	15.0 (0.6)	4.3 (0.3)		90-100	40.6 (1.9)	33.1 (1.1)	26.4 (0.8)	2.4 (1.4)
BQr	0-10	43.6 (2.1)	25.2 (1.0)	31.2 (1.2)	101.6 (2.5)	Agt	0-10	33.1 (1.6)	46.5 (1.1)	20.4 (0.5)	21.5 (1.5)
	10-20	61.8 (1.2)	18.4 (0.6)	19.7 (0.6)	54.4 (0.7)		10-20	27.1 (1.5)	53.1 (1.1)	19.7 (0.4)	19.8 (0.8)
	20-30	35.4 (0.8)	54.0 (0.7)	10.5 (0.1)	43.6 (1.0)		20-30	40.1 (3.2)	46.4 (2.5)	13.5 (0.7)	19.5 (1.0)
	30-40	39.3 (1.2)	50.4 (1.0)	10.3 (0.2)	36.7 (1.1)		30-40	27.2 (1.7)	50.0 (1.2)	22.7 (0.5)	16.1 (1.2)
	40-50	44.1 (1.5)	45.7 (1.3)	10.2 (0.3)	36.1 (0.1)		40-50	33.8 (1.7)	50.2 (1.3)	16.0 (0.4)	7.5 (1.0)
BQq	0-10	48.9 (2.1)	19.2 (0.8)	34.0 (1.3)	99.7 (0.8)	Agc	50-60	34.4 (1.4)	48.2 (1.0)	17.4 (0.4)	7.4 (0.6)
	10-20	64.4 (1.0)	12.9 (0.4)	22.7 (0.6)	41.4 (0.5)		60-70	31.1 (1.5)	47.4 (1.0)	21.5 (0.5)	3.4 (1.2)
	20-30	67.3 (1.6)	19.1 (1.0)	13.6 (0.7)	23.3 (1.6)		0-10	11.8 (1.8)	38.7 (0.8)	49.5 (1.0)	25.0 (3.9)
	30-40	58.9 (1.9)	10.3 (0.3)	30.8 (1.0)	19.4 (0.3)		10-20	6.4 (0.3)	45.3 (0.2)	48.3 (0.2)	20.8 (6.3)
	40-50	61.4 (1.9)	18.2 (0.9)	20.4 (1.0)	15.5 (0.2)		20-30	11.1 (1.6)	41.9 (0.8)	47.0 (0.9)	18.1 (4.8)
	50-60	62.9 (2.0)	5.2 (0.3)	32.0 (1.7)	12.3 (0.1)		30-40	9.4 (2.3)	34.2 (0.9)	56.3 (1.5)	17.7 (5.3)
	60-70	5.6 (0.5)	19.3 (0.1)	75.1 (0.4)	11.0 (0.3)		40-50	10.9 (1.3)	41.0 (0.6)	48.1 (0.7)	16.6 (6.0)
	70-80	50.6 (0.3)	7.4 (0.0)	42.0 (0.3)	10.3 (0.4)		50-60	12.0 (1.9)	44.5 (1.0)	43.5 (0.9)	16.2 (6.3)
	80-90	34.9 (1.6)	5.4 (0.1)	59.7 (1.5)	8.8 (0.1)		60-70	9.2 (2.1)	42.9 (1.0)	47.9 (1.1)	14.0 (3.9)
	90-100	45.0 (1.8)	4.3 (0.1)	50.7 (1.7)	8.3 (0.1)		70-80	5.1 (1.1)	49.9 (0.6)	45.0 (0.5)	12.4 (2.6)
						80-90	6.0 (1.4)	47.5 (0.7)	46.5 (0.7)	11.4 (1.7)	
						90-100	4.9 (1.1)	54.0 (0.6)	41.1 (0.5)	11.0 (1.7)	

Prof. = profundidad.

Los modelos matemáticos utilizados inicialmente para caracterizar la relación entre las variables acumuladas ($Y = M_{acum}$ o $Y = C_{acum}$) y el tamaño de los agregados (T) fueron:

$$\text{Modelo 1: } Y = a \left(\frac{1}{T}\right)^{-b} \quad (4)$$

$$\text{Modelo 2: } Y = a - b \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

$$\text{Modelo 3: } Y = a - b \left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

donde: a y b son constantes obtenidas por regresión estadística.

El modelo 1 (potencial) ha sido propuesto por Paz-Pellat *et al.* (2012), Velázquez *et al.* (2012) y Fuentes *et al.* (2012) para agregados a profundidades someras (0-30 cm) y para macetas con plantas y tepetates. El modelo 1 usando $(1/T)$ es equivalente a la misma ecuación, pero cambiando $-b$ por b en la relación con T (Baldock y Kay, 1987). Lo mismo ocurre para el caso del modelo 2 (logarítmico), puesto con relación a T . En el caso del modelo 3 (lineal) la relación con T implica un cambio de la relación matemática, por lo que por esta razón se utilizó $(1/T)$, para tener tres relaciones en función de las mismas variables.

Para el caso de la sonicación de suelos en partículas órgano-minerales (no agregados) usando ultrasonido, Paz-Pellat, Covalada y Etchevers (2014) usaron el modelo 3 para las fracciones físicas con dispersión completa y el modelo 2 para el caso de dispersión incompleta (Paz-Pellat, Covalada, Hidalgo, Etchevers y Matus, 2016).

Los modelos propuestos están relacionados con niveles de energía asociados a prácticas de labranza, enmiendas y ultrasonido, por lo que reflejan patrones aparentemente diferentes.

Relación entre la Masa y Carbono Acumulados por Tamaño de los Agregados

Para establecer una relación entre C_{acum} y M_{acum} , los modelos de las relaciones (4) a (6) deben despejarse para obtener $(1/T)$ e igualarlos para obtener la relación buscada.

Bajo el supuesto que los modelos entre M_{acum} y C_{acum} con T sean iguales, la relación entre C_{acum} y

M_{acum} implica un modelo lineal para el caso de los modelos 5 y 6. Para el caso del modelo 4, la relación entre C_{acum} y M_{acum} es del tipo potencial, donde el exponente está definido por la razón entre el exponente b del caso del C_{acum} con el exponente b de la M_{acum} . Paz-Pellat *et al.* (2012) plantearon que, para el caso de los modelos potenciales, la razón de exponentes es cercana a 1, por lo que se puede plantear una relación generalizada del tipo:

$$C_{acum} = a_l + b_l(M_{acum}) \quad (7)$$

La relación entre los exponentes del modelo (7) con los modelos (4) a (6) es obtenida al despejar $(1/T)$ de estos últimos e igualarlos.

Propiedades de Líneas Rectas que se Interceptan en un Punto Común

Una estrategia importante para reducir la dimensionalidad o complejidad de un problema es utilizar propiedades esperadas, o forzarlas a esa condición, de las soluciones. En esta perspectiva, Paz-Pellat, Odi, Cano, Bolaños y Zarco (2009b) plantearon el uso de la propiedad de que los parámetros de un conjunto de líneas rectas ($Y = a_i + b_i X$) que se interceptan en un punto común, los parámetros están relacionados en forma lineal ($a = X_0 - [Y_0]b$), Figura 1. Para el caso del modelo 2 (logarítmico), usando $\ln(C)$ en la Figura 1a, se obtiene la misma relación [$a = Y_0 - \ln(X_0)b$]. En el caso del modelo 3 (potencial), el resultado es similar al usar $\ln(X)$ y $\ln(Y)$, pero para la relación $b \cdot \ln(a)$ [$\ln(a) = \ln(Y_0) - \ln(X_0)b$] (Lumer, 1936).

Heurísticas de Primer Orden

De la revisión de trabajos previos de caracterización de los patrones empíricos entre las variables de interés, se puede proponer que, a medida que la energía aplicada al suelo se incrementa (o tiempo después de una perturbación), el modelo pasa de potencial a logarítmico a lineal. Algo similar puede ser esperado por el efecto de la profundidad del suelo, pero para patrones no necesariamente asociados a diferentes niveles de aplicación de energía o perturbación, ya que existen procesos coexistentes (descomposición, transporte y bioturbación).

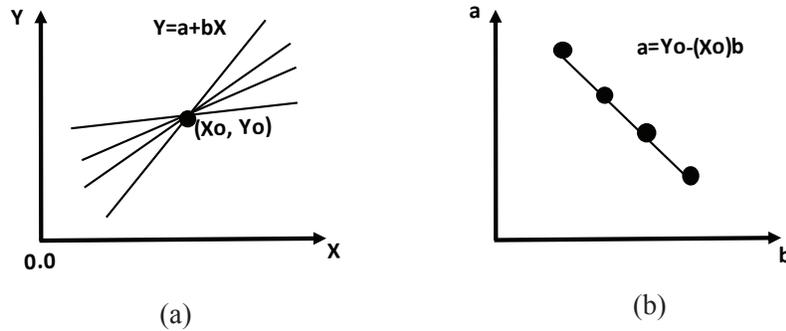


Figura 1. Relación entre los parámetros a y b de las líneas rectas: (a) líneas rectas que se interceptan en el punto común (X_o, Y_o) y (b) relación lineal entre los parámetros b y a . Las variables X y Y representan cualquier tipo de transformación que haga lineales los modelos (v.g. logarítmica).

Figure 1. Relationship between the parameters a and b of the straight lines: (a) straight lines that intersect at the common point (X_o, Y_o) and (b) linear relationship between the parameters b and a . The variables X and Y represent any type of transformation that makes the models linear (e.g. logarithmic).

Para poder generalizar las heurísticas de primer orden (validación estadística clásica) en un modelo generalizado es necesario partir de los resultados (soluciones) a la ecuación generadora (ecuación diferencial) que tenga como solución todos los modelos ajustados estadísticamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrones Asociados a Diferentes Usos de Suelo

Para el caso de la masa acumulada (%) asociada a la distribución de los tamaños de los agregados ($1/T$), la Figura 2 muestra el caso de la profundidad de 0 a 10 cm, la cual tiene mayores efectos del uso del suelo, cambio de uso del suelo y prácticas de manejo.

De la Figura 2, la estabilidad de los agregados de los diferentes usos de suelo está asociada al incremento del exponente b , o decremento de la constante a , del modelo potencial. Para el caso de la cantidad (masa) de macroagregados ($1/T = 4$, $T = 0.25$ mm), los suelos de los bosques de referencia tienen mayor estabilidad, donde el caso del suelo de un bosque de encino con incendio hace 15 años (BQq) presenta menor cantidad de macroagregados que el suelo del bosque de encino de referencia (BQr) y el acahual de bosque de encino (BS) presenta la menor estabilidad de todos los suelos de los bosques, reflejando claramente una relación de estabilidad con el grado de perturbación

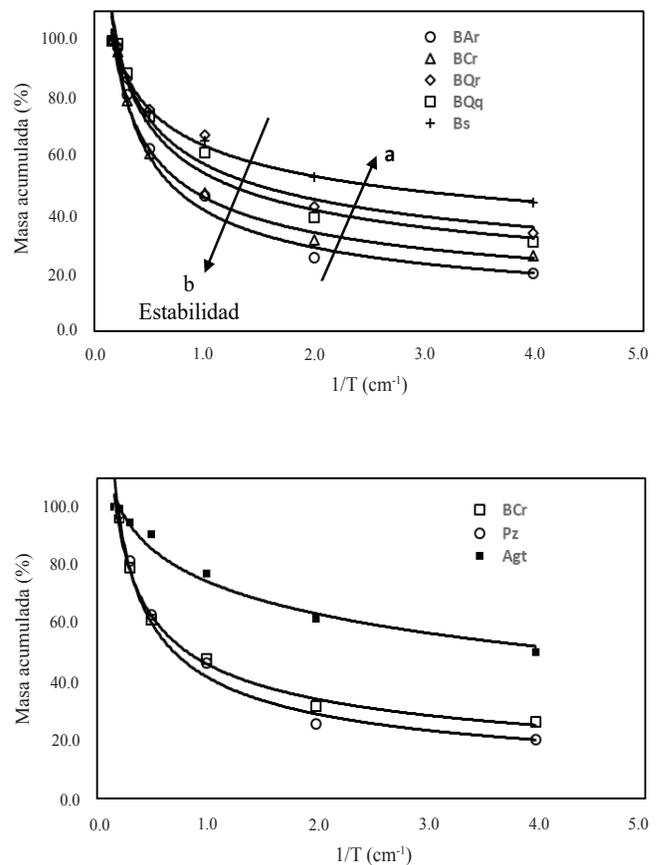


Figura 2. Distribución de la masa acumulada del suelo por tamaño de los agregados ($1/T$) para la profundidad de 0 a 10 cm. Figure 2. Distribution of the accumulated mass of the soil by size of the aggregates ($1/T$) for the depth of 0 to 10 cm.

de la vegetación. El uso agrícola tradicional del suelo (Agt) presenta la menor cantidad de macroagregados y el pastizal (Pz) tiene una distribución de agregados cercana al suelo del mejor bosque (BAr), producto de la distribución de sus raíces en el estrato superior (Jobbágy y Jackson, 2000).

En la Figura 3 se muestra la distribución del C acumulado en los tamaños de los agregados, donde la estabilidad estructural (mayor a medida que el exponente b es menor) tiene un patrón contrario al de la M_{acum} . El uso del suelo agrícola tradicional (Agt) tiene una distribución acumulada del carbono uniforme en los diferentes tamaños de los agregados, con un patrón lineal en la relación $(1/T)$ -C acum.

De los patrones mostrados en la Figura 3, caso de los bosques, resulta difícil su análisis dado

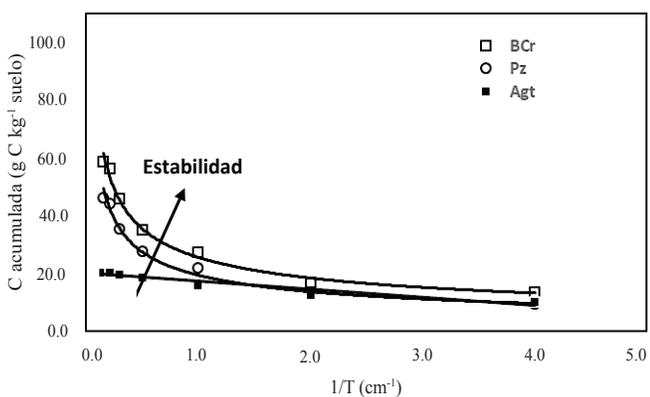
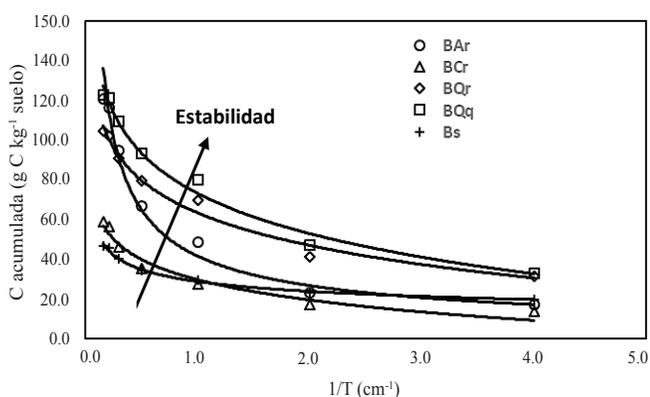


Figura 3. Distribución del carbono acumulado del suelo por tamaño de los agregados ($1/T$) para la profundidad de 0 a 10 cm.
Figure 3. Distribution of accumulated soil carbon by aggregate size ($1/T$) for depths from 0 to 10 cm.

el traslape de algunas curvas de $(1/T)$ y C acum. Una alternativa, tal como se explora más adelante, es usar valores de C acum en forma normalizada (0 a 100%) para caracterizar en forma más clara la estabilidad estructural. Considerando el modelo potencial, en su transformación logarítmica, la Figura 4 muestra las relaciones $\ln(1/T)$ contra $\ln(C_{acum})$ de la Figura 3, donde ahora el patrón de estabilidad estructural está bien caracterizado.

El uso del C acumulado normalizado permite utilizar el patrón de líneas rectas interceptándose en un punto común, por lo que con el conocimiento del C total (punto de C acum normalizado = 100%) es posible caracterizar el modelo de distribución del carbono a diferentes profundidades del suelo.

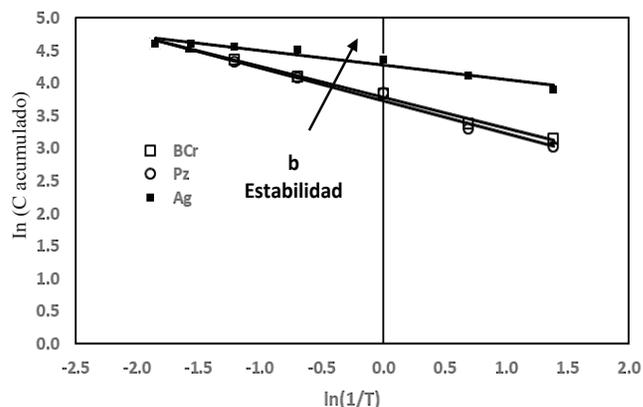
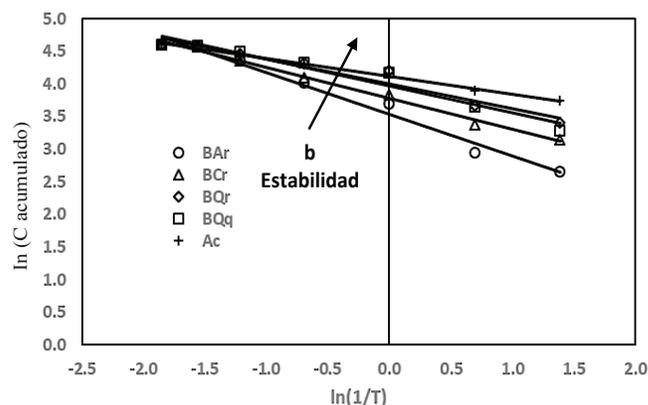


Figura 4. Distribución del carbono acumulado normalizado (0-100 %) del suelo por tamaño de los agregados ($1/T$) para la profundidad de 0 a 10 cm.

Figure 4. Distribution of the normalized accumulated carbon (0-100%) of the soil by aggregate size ($1/T$) for the depth of 0 to 10 cm.

Patrones Asociados a Diferentes Usos de Suelo y Profundidades

Para analizar la viabilidad de los modelos 4 a 6 de la distribución de M_{acum} y C_{acum} a profundidad en los diferentes usos de suelo analizados, los modelos fueron ajustados por regresión lineal para estimar sus parámetros (a y b) y calcular su coeficiente de determinación (R^2) como medida del mejor ajuste. El Cuadro 3 muestra los resultados obtenidos.

Para el caso de la distribución de M_{acum} , la información del Cuadro 3 muestra un patrón del modelo potencial al logarítmico y posteriormente al lineal a medida que la profundidad se incrementa (Figura 5a) o patrones con un mismo modelo (potencial o logarítmico) con un patrón de mayor estabilidad

(mayor pendiente) al incrementarse la profundidad (Figura 5b).

El mismo patrón observado para M_{acum} se presenta para C_{acum} , pero el concepto de estabilidad es inverso (Figura 3), tal como puede notarse en la Figura 6.

De acuerdo al Cuadro 3, a medida que se incrementa la profundidad el patrón de estabilidad estructural o de distribución de los agregados se revierte (esto es, inicia con pendientes creciendo y después se inicia el decrecimiento), tal como se muestra en la Figura 7. En esta figura el exponente n se del modelo potencial es $n = 1 - b$ (b con signo), para el logarítmico $n = 1$ y para el lineal $n = 2$, usando los datos del Cuadro 3. Las relaciones mostradas de n con los modelos 4 a 6 son discutidas más adelante.

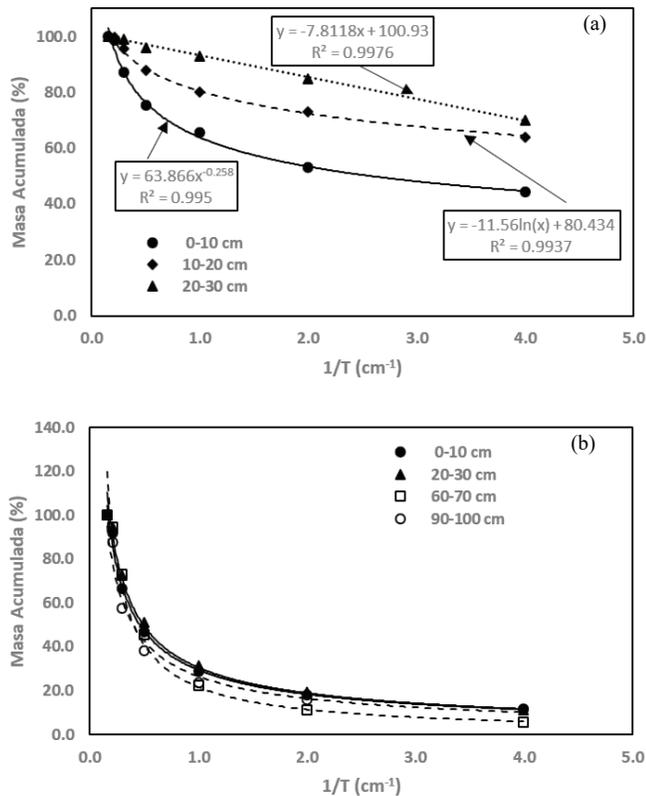


Figura 5. Distribución de la masa acumulada del suelo por tamaño de los agregados ($1/T$) para distintas profundidades: (a) Bosque secundario o acahual (Bs) y (b) Agricultura de conservación (Agt).

Figure 5. Distribution of the accumulated mass of the soil by size of the aggregates ($1/T$) for different depths: (a) Secondary or acahual forest (Bs) and (b) Conservation agriculture (Agt).

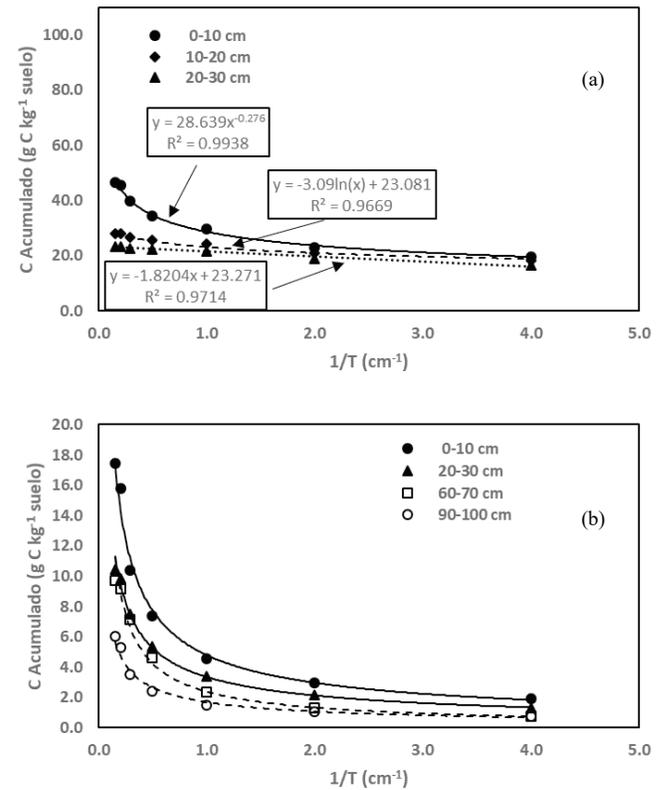


Figura 6. Distribución del carbono acumulado del suelo por tamaño de los agregados ($1/T$) para distintas profundidades: (a) Bosque secundario o acahual (Bs) y (b) Agricultura con labranza de conservación (Agt).

Figure 6. Distribution of accumulated soil carbon by aggregate size ($1/T$) for different depths: (a) Secondary or acahual forest (Bs) and (b) Agriculture with conservation tillage (Agt).

Cuadro 3. Coeficientes de determinación para los modelos de las relaciones (1/T)-M acum y (1/T)-C acum.
Table 3. Determination coefficients for the models of the relationships (1 / T) -M accum and (1 / T) -C accum.

Uso del Suelo	Prof. media (cm)	Relación 1/T contra M acumulada				Relación 1/T contra C acumulado			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Mejor Modelo	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Mejor Modelo
BCr	5	0.983	0.974	0.733	1	0.983	0.963	0.702	1
	15	0.988	0.990	0.804	2	0.991	0.981	0.768	1
	25	0.981	0.993	0.845	2	0.977	0.992	0.861	2
	35	0.977	0.992	0.834	2	0.972	0.992	0.852	2
	45	0.962	0.990	0.843	2	0.965	0.989	0.85	2
	55	0.947	0.986	0.859	2	0.946	0.984	0.878	2
	65	0.935	0.979	0.877	2	0.937	0.976	0.885	2
	75	0.940	0.982	0.871	2	0.942	0.982	0.877	2
	85	0.934	0.979	0.872	2	0.939	0.980	0.877	2
	95	0.925	0.970	0.887	2	0.944	0.982	0.869	2
BAr	5	0.992	0.961	0.698	1	0.992	0.964	0.706	1
	15	0.978	0.934	0.661	1	0.973	0.913	0.625	1
	25	0.899	0.921	0.956	3	0.925	0.95	0.942	2
	35	0.887	0.913	0.966	3	0.918	0.944	0.95	3
	45	0.878	0.914	0.971	3	0.845	0.878	0.976	3
	55	0.895	0.936	0.951	3	0.877	0.916	0.955	3
	65	0.900	0.940	0.947	3	0.904	0.944	0.952	3
	75	0.915	0.954	0.932	2	0.893	0.934	0.952	3
	85	0.808	0.838	0.988	3	0.809	0.841	0.953	3
	95	0.823	0.852	0.995	3	0.832	0.877	0.994	3
BQr	5	0.961	0.985	0.844	2	0.952	0.983	0.847	2
	15	0.975	0.987	0.815	2	0.975	0.986	0.815	2
	25	0.968	0.983	0.883	2	0.961	0.978	0.894	2
	35	0.968	0.982	0.895	2	0.945	0.963	0.923	2
	45	0.985	0.974	0.781	1	0.966	0.982	0.898	2
BQq	5	0.975	0.989	0.814	2	0.949	0.986	0.861	2
	15	0.990	0.992	0.814	2	0.985	0.994	0.843	2
	25	0.981	0.992	0.863	2	0.982	0.992	0.86	2
	35	0.948	0.972	0.919	2	0.938	0.963	0.922	2
	45	0.927	0.958	0.937	2	0.932	0.963	0.933	2
	55	0.920	0.950	0.946	2	0.917	0.945	0.942	2
	65	0.929	0.961	0.935	2	0.913	0.946	0.944	2
	75	0.949	0.979	0.896	2	0.944	0.973	0.905	2
	85	0.983	0.974	0.733	1	0.943	0.973	0.902	2
	95	0.942	0.977	0.892	2	0.939	0.971	0.903	2

Cuadro 3 (continuación). Coeficientes de determinación para los modelos de las relaciones (1/T)-M acum y (1/T)-C acum.
Table 3 (continuation). Determination coefficients for the models of the relationships (1 / T) -M accum and (1 / T) -C accum.

Uso del Suelo	Prof. media (cm)	Relación 1/T contra M acumulada				Relación 1/T contra C acumulado			
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Mejor Modelo	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Mejor Modelo
Bs	5	0.992	0.984	0.772	1	0.994	0.981	0.760	1
	15	0.938	0.957	0.942	2	0.949	0.967	0.924	2
	25	0.901	0.923	0.967	3	0.895	0.916	0.971	3
	35	0.9	0.922	0.964	3	0.913	0.934	0.958	3
	45	0.878	0.904	0.971	3	0.876	0.902	0.976	3
	55	0.917	0.951	0.947	2	0.897	0.93	0.964	3
	65	0.973	0.991	0.833	2	0.970	0.989	0.860	2
	75	0.983	0.974	0.733	1	0.970	0.99	0.850	2
	85	0.985	0.985	0.774	1	0.963	0.99	0.852	2
Pz	5	0.990	0.975	0.744	1	0.989	0.979	0.774	1
	15	0.983	0.974	0.733	1	0.988	0.969	0.724	1
	15	0.961	0.983	0.888	2	0.967	0.986	0.872	2
	25	0.920	0.948	0.937	2	0.918	0.944	0.934	2
	35	0.913	0.959	0.91	2	0.913	0.952	0.921	2
	45	0.917	0.961	0.913	2	0.886	0.926	0.945	3
	55	0.924	0.973	0.877	2	0.905	0.944	0.92	2
	65	0.926	0.979	0.856	2	0.909	0.955	0.901	2
	75	0.955	0.987	0.825	2	0.930	0.965	0.900	2
Agt	5	0.980	0.977	0.746	1	0.938	0.976	0.869	2
	15	0.990	0.955	0.684	1	0.912	0.817	0.505	1
	5	0.953	0.976	0.906	2	0.938	0.965	0.923	2
	15	0.928	0.957	0.942	2	0.924	0.955	0.945	2
	25	0.924	0.951	0.949	2	0.904	0.934	0.962	3
	35	0.939	0.962	0.943	2	0.939	0.963	0.942	2
	45	0.929	0.953	0.949	2	0.922	0.947	0.952	3
	55	0.930	0.955	0.942	2	0.941	0.961	0.929	2
	65	0.959	0.986	0.881	2	0.903	0.936	0.954	3
Agc	5	0.998	0.922	0.622	1	0.994	0.888	0.577	1
	15	0.995	0.942	0.657	1	0.893	0.934	0.952	3
	25	0.996	0.947	0.665	1	0.997	0.945	0.663	1
	35	0.991	0.957	0.688	1	0.994	0.957	0.690	1
	45	0.994	0.937	0.643	1	0.995	0.942	0.652	1
	55	0.997	0.912	0.602	1	0.996	0.919	0.614	1
	65	0.992	0.931	0.630	1	0.994	0.933	0.634	1
	75	0.995	0.910	0.596	1	0.995	0.914	0.604	1
	85	0.995	0.898	0.581	1	0.992	0.904	0.589	1
95	0.986	0.866	0.542	1	0.983	0.866	0.543	1	

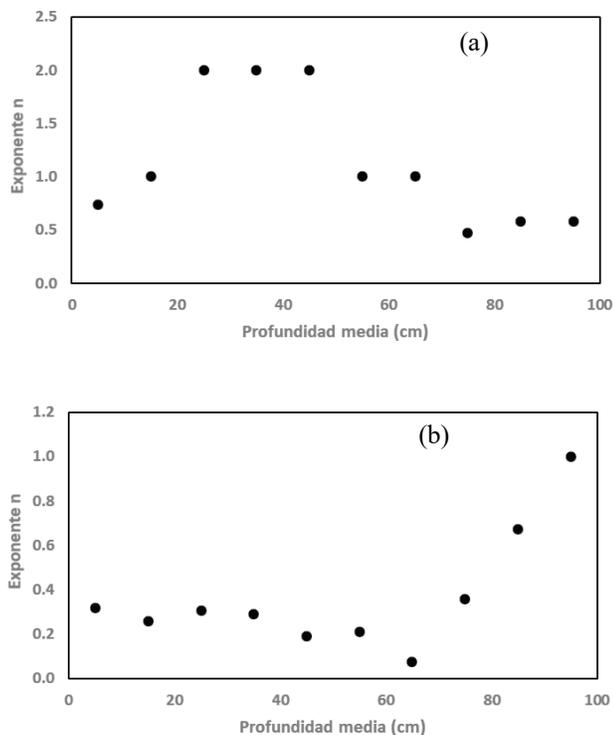


Figura 7. Exponentes n asociados a la estabilidad estructural de los agregados en relación a la profundidad media (promedio entre límite superior e inferior de cada estrato): (a) Bosque secundario o achual (Bs) y (b) Agricultura con labranza de conservación (Agc).

Figure 7. Exponents n associated with the structural stability of the aggregates in relation to the mean depth (average between the upper and lower limits of each stratum): (a) Secondary or achual forest (Bs) and (b) Agriculture with conservation tillage (Agc).

Relación Carbono Acumulado Contra Masa Acumulada

El modelo de la relación (7) resultó en excelentes ajustes, tal como se muestra en la Figura 8. La relación entre la pendiente b_1 con C total (dato sin considerar el C que queda en la malla de dimensión mayor usada) esta mostrada en la Figura 8, donde la intersección no es diferente de cero, por lo que $b_1 = 0.1 \times C$ total, tal como ha sido propuesto por Paz-Pellat *et al.* (2012) y Fuentes *et al.* (2012). El factor 0.1 es porque M acum está en porcentaje y C acum (en $10 \times C\%$, $g C kg^{-1}$ suelo), de otro modo la relación es $b_1 = C$ total.

El modelo de la relación (7), conocido C total, solo requiere de un dato para poder estimar el parámetro faltante (a_1).

Modelo Generalizado para Macum y Cacum Contra (1/T)

Los modelos potencial, logarítmico y lineal pueden tener buenos ajustes experimentales y ser el mejor modelo para ciertos usos de suelo y profundidades, sin que exista un mejor modelo para todos los casos. Esta situación plantea que los modelos son soluciones o casos especiales de un modelo general, el cual puede obtenerse al integrar las ecuaciones diferenciales dM/dt o dC/dt .

Para formular una ecuación general ($Y = M$ o $Y = C$) en función del tamaño de los agregados (T), podemos plantear la ecuación diferencial en formato inverso como:

$$\frac{dT}{dY} = k_n T^n \quad (8)$$

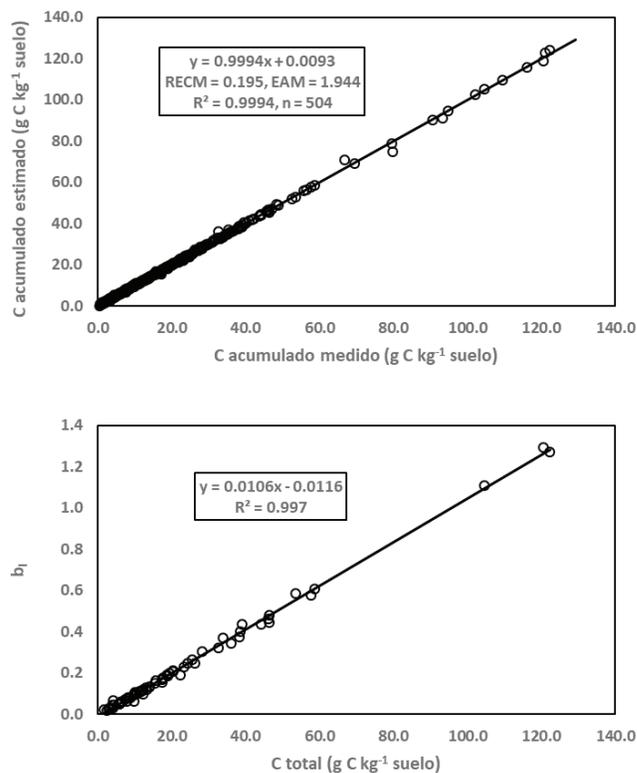


Figura 8. Ajuste del modelo de la relación (7) para estimar C acum y relación entre el parámetro de ajuste b_1 con C total del suelo.

Figure 8. Model fit of the relationship (7) to estimate C acum and the relationship between the adjustment parameter b_1 with total soil C .

que es una reacción de cinética de orden n , con tasa de reacción k_n .

La solución a la relación (8), para diferentes valores de n puede ser encontrada, p. ej. en El Seoud, Baader, y Bastos, 2017 (17):

$$\frac{1}{T^{n-1}} = \frac{1}{T_0^{n-1}} - k_n(n-1)Y \quad (9)$$

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

$$Y = \left[\frac{1}{k_n(n-1)} \right] \left(\frac{1}{T_0} \right)^{n-1} - \left[\frac{1}{k_n(n-1)} \right] \left(\frac{1}{T} \right)^{n-1} \quad (10)$$

donde $T = T_0$ corresponde al caso de $Y = 0$.

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

$$\frac{dT}{dY} = -k_1 T \quad (11)$$

cuya solución es:

$$T = T_0 \exp(-k_1 Y) \quad (12)$$

que puede ser puesta en función de Y como:

$$Y = \left(\frac{1}{k_1} \right) \ln \left(\frac{1}{T_0} \right) - \left(\frac{1}{k_1} \right) \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (13)$$

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

$$\frac{dT}{dY} = -k_2 T^2 \quad (14)$$

Cuya solución es:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - k_2 Y \quad (15)$$

que puede ser puesta en función de Y como:

$$Y = \left(\frac{1}{k_2} \right) \left(\frac{1}{T_0} \right) - \left(\frac{1}{k_2} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \quad (16)$$

La solución para la ecuación potencial ($n \neq 1$), relación (8), puede ser resuelta en función de T o $(1/T)$,

al igual que la ecuación logarítmica ($n = 1$), relación (11); pero la relación lineal ($n = 2$) para $(1/T)$ no tiene la misma forma para T , por lo que el uso del formato $(1/T)$ generaliza los modelos 1 a 3 discutidos previamente.

Ajuste del Modelo General a Masa y Carbono

La ecuación general de la relación (10) para $n \neq 1$, puede ser formulada para ajustes de regresión estadística como:

$$Y = A - B \left(\frac{1}{T} \right)^C \quad (17)$$

con los parámetros de la relación (10) definidos como:

$$n = C + 1 \quad (18)$$

$$k_n = \frac{1}{B(n-1)} \quad (19)$$

$$\frac{1}{T_0} = \left(\frac{A}{B} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (20)$$

La Figura 9 muestra los resultados del ajuste por regresión no lineal minimizando el error cuadrático de estimación con la función Solver^{MR} de Excel^{MR}, para el caso del uso de la relación (17) para la M acum. En todos los casos siguientes el proceso de ajuste experimental por regresión no lineal fue realizado con el mismo procedimiento.

De la Figura 9 se observa que el ajuste del modelo general ($n \neq 1$) resulta adecuado ($R^2 = 0.9896$, con error absoluto medio de 5.35%), con sub y sobre estimaciones producto de casos donde n tiene valores cercanos a 2, lo que implica que el modelo de la relación (13) debe ser aplicado. La relación entre los parámetros A , B y C de la relación (17), caso de un conjunto de curvas que se interceptan en el punto de M acum = 100%, plantea que el modelo puede ser parametrizado con un solo dato (conocimiento de A , por ejemplo). Las relaciones entre los parámetros del modelo son consecuencia de las relaciones (18) a (20):

$$B = A \left(\frac{1}{T_0} \right)^{1-n} \quad (21)$$

$$C = \left[\frac{\left(\frac{1}{T_0}\right)^{n-1}}{k_n} \right] \left(\frac{1}{A}\right) \quad (22)$$

La Figura 10 muestra la variación del exponente n y la tasa de reacción con la profundidad para diferentes tipos de uso del suelo.

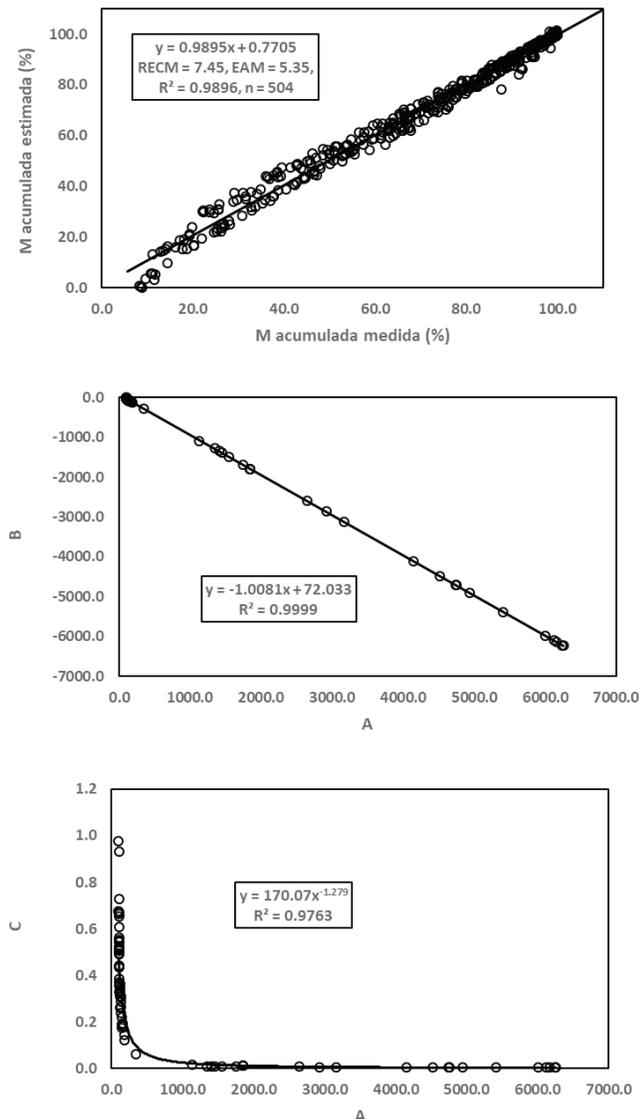


Figura 9. Ajuste por regresión no lineal de la relación (17) para estimar M_{cum} y las relaciones entre sus parámetros.

Figure 9. Nonlinear regression adjustment of the relationship (17) to estimate M_{cum} and the relationships between its parameters.

En forma relativamente similar a la Figura 7, el exponente n se incrementa inicialmente y después disminuye con la profundidad del suelo y k_n presenta patrones contrarios o similares a n .

Los ajustes de la relación (17) para el caso de C_{acum} están mostrados en la Figura 11, donde los ajustes son adecuados ($R^2 = 0.9954$ y error absoluto medio de 7.21%). Considerando que las relaciones $(1/T)$ contra C_{acum} no coinciden en un punto común, solo la relación A-B (relación 21) está bien definida (Figura 11).

En la Figura 12 se muestra la variación de n y k_n con respecto a la profundidad del suelo para diferentes tipos de uso del suelo. El exponente n se incrementa con valores tendientes a 1.0 con la profundidad del suelo y la tasa de reacción k_n se reduce con la profundidad. Al igual que el patrón de M_{acum} , para el caso del bosque de encino con incendio hace 15 años, n se reduce hasta la profundidad de 20 cm y después toma el patrón creciente.

Los ajustes mostrados utilizan el formato de la relación (17) para las regresiones no lineales, sin utilizar directamente la estructura de las relaciones entre sus parámetros, tal como se define en la relación (10). Usando directamente el formato de esta última relación en las regresiones no lineales, la Figura 13 muestra los resultados obtenidos para el caso de M_{acum} , donde el ajuste resultó mejor que el caso de usar la relación (17). En el caso de la relación entre los parámetros A y C, calculados usando el formato de la relación (17), muestra patrones esperados (relación 22), pero para la situación donde A y B toma valores positivos y negativos (Figura 13).

Los resultados obtenidos ajustando el modelo de la relación (10) usando técnicas de regresión no lineal utilizan las relaciones entre los parámetros del modelo, situación que no está considerada en la regresión lineal de la relación (17), por lo que es importante considerar el conocimiento de las interrelaciones de los modelos y no usar la estadística ignorando esta situación.

En la Figura 14 se muestran los patrones del exponente n y la tasa k_n con relación a la profundidad de los diferentes tipos de uso del suelo, donde para el caso de k_n estos resultan diferentes a los definidos en la Figura 10. El exponente n tiene patrones similares al de la Figura 10.

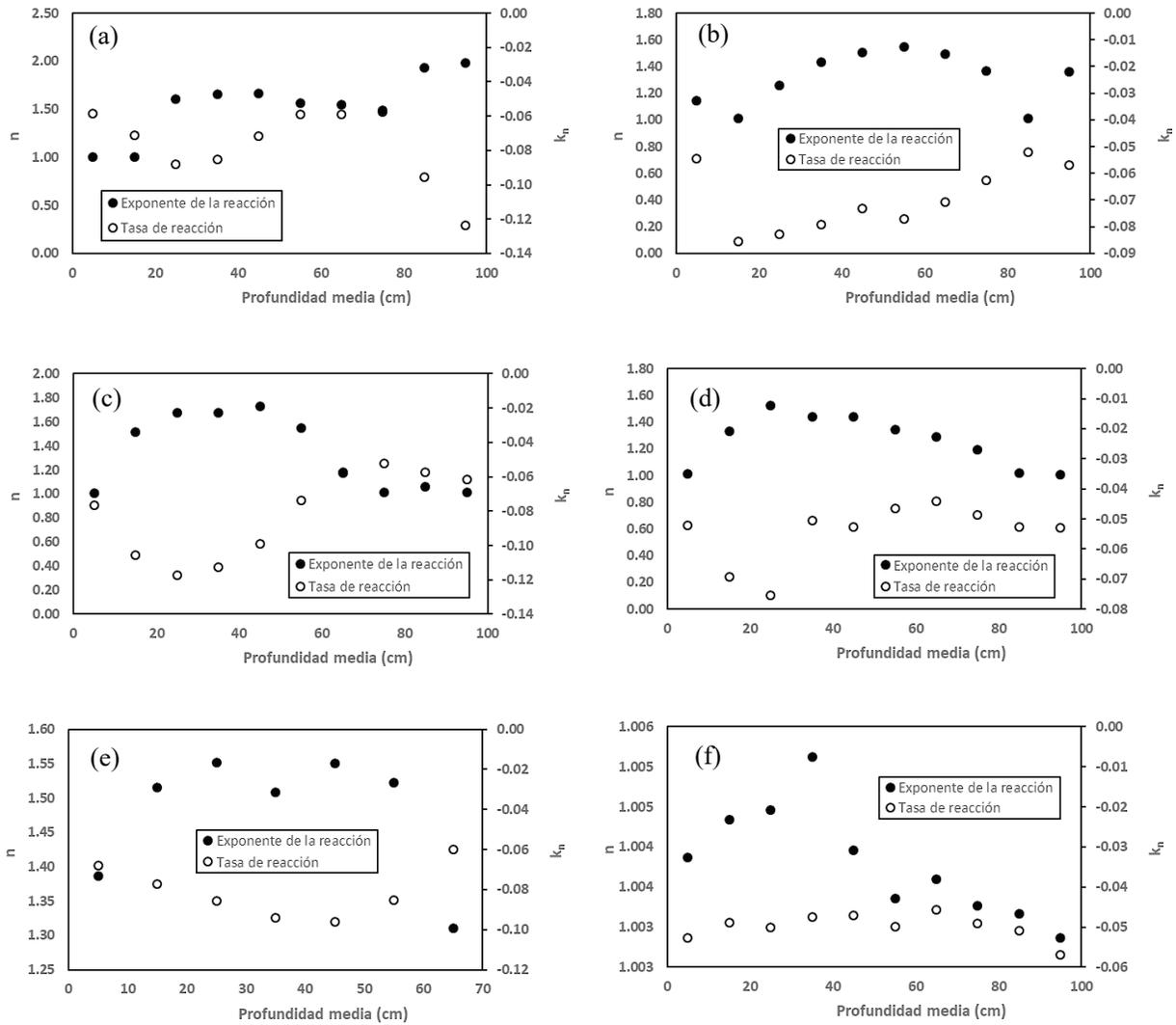


Figura 10. Variación del exponente de la reacción (n) y la tasa de reacción (k_n) de M acum con la profundidad media para distintos tipos de usos de suelo, usando la relación (17): (a) BAR, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt y (f) Agc.

Figure 10. Variation of the exponent of the reaction (n) and the reaction rate (k_n) of M accum with the mean depth for different types of land uses, using the relationship (17): (a) BAR, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt and (f) Agc.

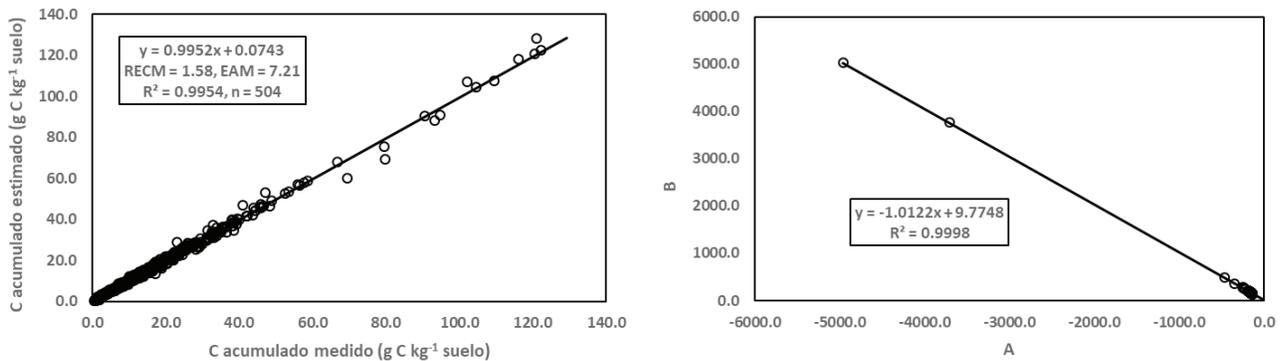


Figura 11. Ajuste por regresión no lineal de la relación (17) para estimar C acum y la relación entre los parámetros A y B.

Figure 11. Nonlinear regression adjustment of the relationship (17) to estimate C accum and the relationship between parameters A and B.

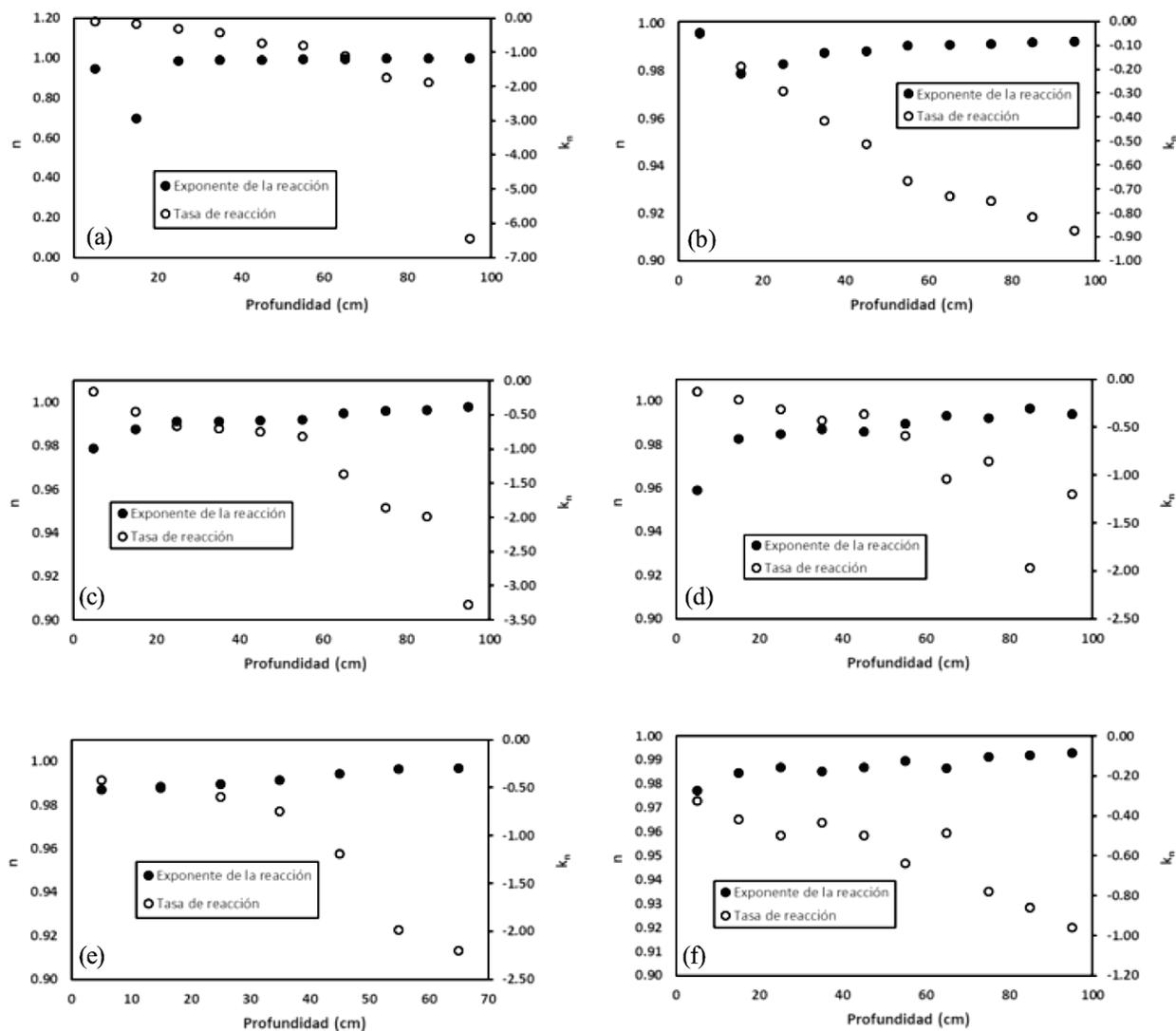


Figura 12. Variación del exponente de la reacción (n) y la tasa de reacción (k_n) de C acum con la profundidad media para distintos tipos de usos de suelo: (a) BAr, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt y (f) Agc.

Figure 12. Variation of the exponent of the reaction (n) and the reaction rate (k_n) of C acum with the mean depth for different types of land uses: (a) BAr, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt and (f) Agc.

Ajustes de C acum Normalizado

Usando el C acum normalizado (0 a 100%, donde 100% representa el C total), que implica líneas rectas que se interceptan en $C_{acum\ norm} = 100\%$, la Figura 15 muestra los ajustes del modelo de la relación (7), donde los parámetros del modelo lineal están relacionados entre sí (Paz-Pellat *et al.*, 2012 y Fuentes *et al.*, 2012).

DISCUSIÓN

El desarrollo metodológico presentado, orientado al análisis de patrones de la distribución de la masa y carbono en los agregados de los suelos asociados a diferentes usos de suelo y profundidades, integra casos particulares de los patrones observados en una perspectiva de modelación de la causa (ecuación diferencial) común de los modelos (soluciones de

la ecuación diferencial) ajustados empíricamente. En esta perspectiva, el modelo de la cinética de reacción de orden n permitió buenos ajustes estadísticos. El uso de modelos más allá de orden $n = 1$, permite mayor flexibilidad en los ajustes experimentales (Whitmore, 1996).

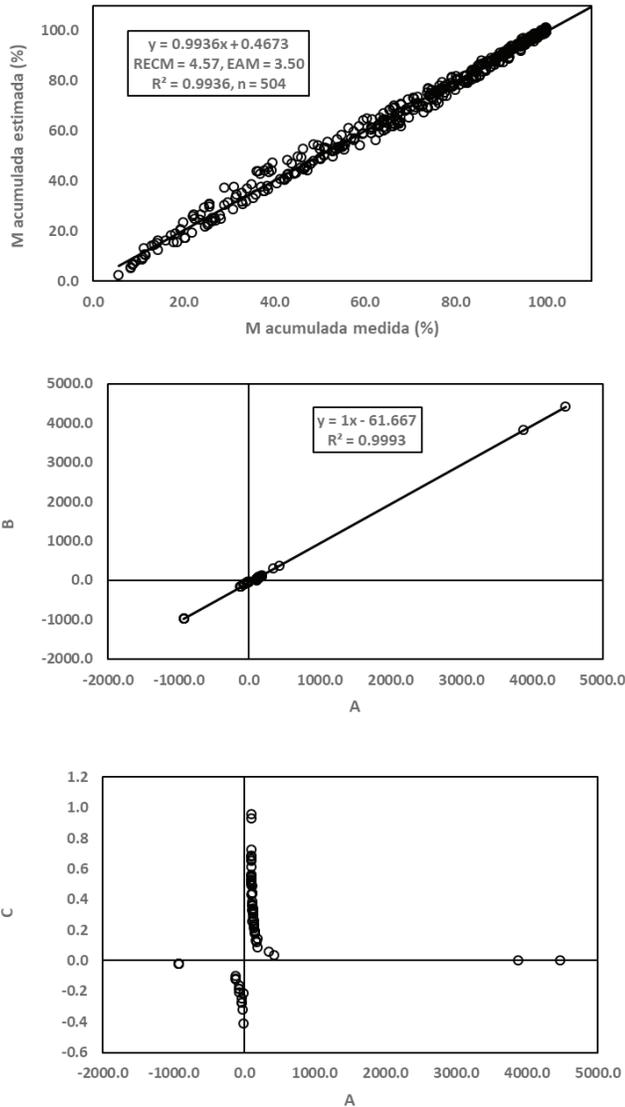


Figura 13. Ajuste por regresión no lineal de la relación (10) para estimar M acum y las relaciones entre sus parámetros usando la relación (17).

Figure 13. Nonlinear regression adjustment of the relationship (10) to estimate M cum and the relationships between its parameters using the relationship (17).

La parametrización del modelo general (orden n , incluido $n = 1$) usando propiedades de conjuntos de líneas rectas que se interceptan en un punto común permite reducir la complejidad (número de parámetros a estimar) del problema, permitiendo que pueda ser completamente definido con un solo dato, adicional al C total. Este enfoque de modelación de “arriba abajo” o Darwiniano (Harte, 2002) hace viable aproximaciones teóricas y experimentales de bajo costo, sin pérdida de la precisión y confiabilidad de las estimaciones.

La orientación del ejercicio de análisis y modelación de la distribución de la masa y carbono de los agregados partió de la consideración de la aplicación de energía constante (ciclos por minuto de agitación de los tamices en seco). La distribución de agregados es función de la energía aplicada en el proceso de agitación; que para el caso de considerar solo un tamaño de los agregados plantea un modelo potencial de la masa retenida en la malla con relación al tiempo de aplicación de la agitación (Black, Baragar y Chanasyk, 1989; Valmis, Kerkides y Aggelides, 1988). Para el caso general de la distribución de agregados en mallas múltiples en función del número de ciclos de agitación, los patrones son de tipo potencial y de otros tipos (Shiel, Adey y Lodder, 1988), por lo que es necesario un replanteamiento más general que tome en cuenta la energía aplicada o ciclos de agitación.

El planteamiento de analizar los patrones (soluciones de ecuaciones diferenciales) de la distribución de agregados puede usarse para ecuaciones integrales (soluciones) más complejas y con modos básicos de las ecuaciones diferenciales (Zeide, 1993).

En una visión teórica de los procesos iterativos (jerarquías de desagregación) asociados a la cinética de orden n , Paz-Pellat *et al.* (2012) planteo que sus bases pueden ser definidas en el marco de procesos multifractales (Paz-Pellat, Balbontín, Etchevers, Martínez, Ortiz, 2008, 2009a, 2010), por lo que es necesario formular un marco teórico que explique el modelo general desarrollado en este trabajo.

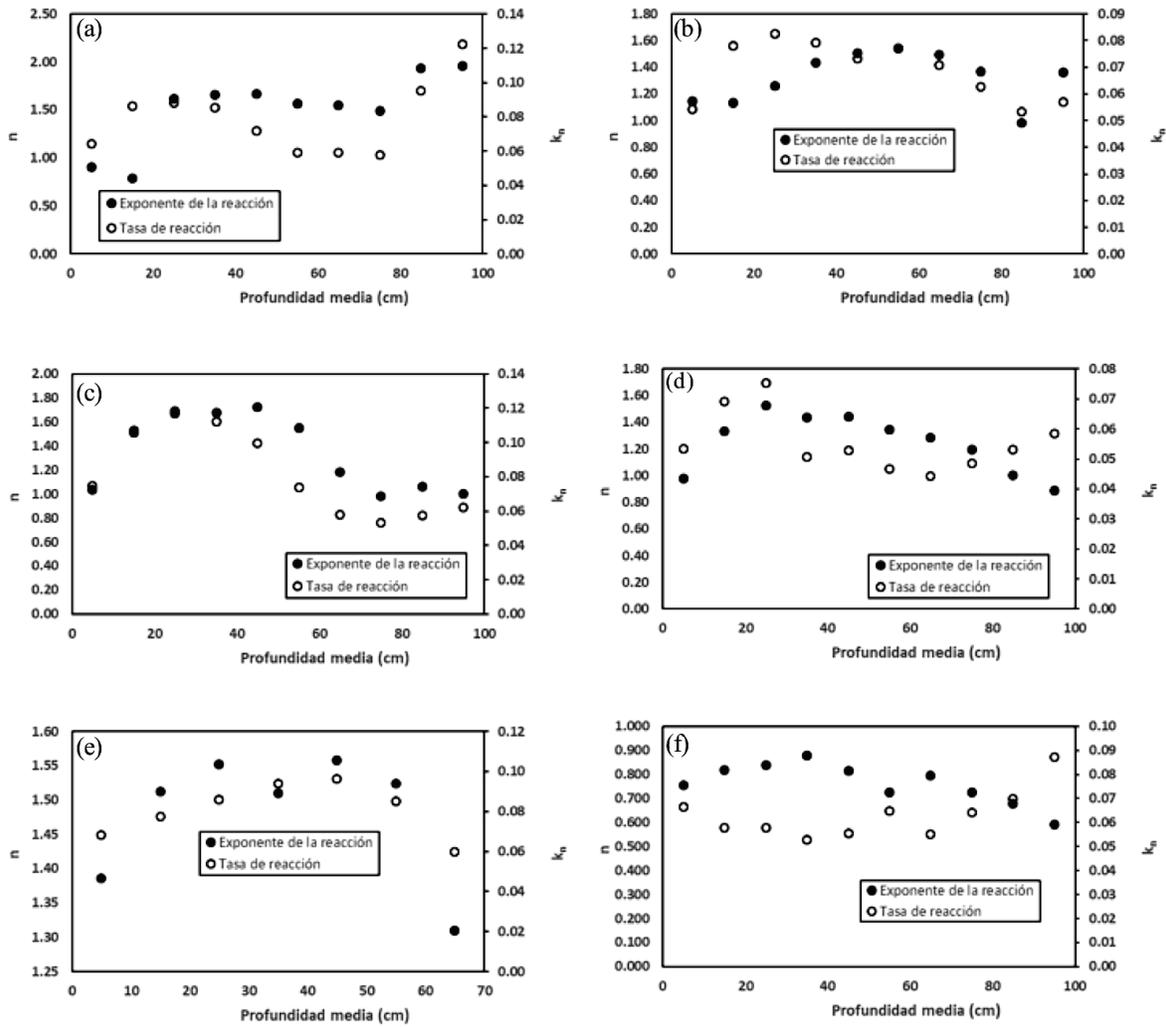


Figura 14. Variación del exponente de la reacción (n) y la tasa de reacción (k_n) de M acum con la profundidad media para distintos tipos de usos de suelo, usando la relación (10): (a) BAR, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt y (f) Agc.
 Figure 14. Variation of the exponent of the reaction (n) and the reaction rate (k_n) of M acum with the mean depth for different types of land uses, using the relationship (10): (a) BAR, (b) BQq, (c) Bs, (d) Pz, (e) Agt and (f) Agc.

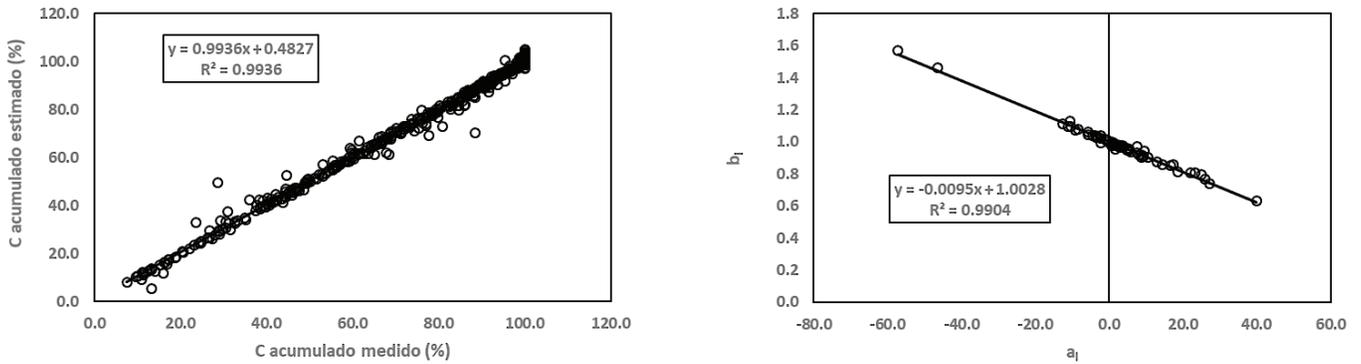


Figura 15. Ajuste del modelo de la relación (7) para estimar C acum normalizado y la relación entre sus parámetros.
 Figure 15. Fitting of the relationship model (7) to estimate normalized cumulative C and the relationship between its parameters.

CONCLUSIONES

El planteamiento de este trabajo de desarrollar un modelo que pueda ser parametrizado con un solo dato (adicional al C total), fundamentado en explicación de los múltiples patrones de la distribución de agregados de los suelos bajo diferentes usos de suelo y diferentes profundidades, fue cumplido con el uso de un paradigma alternativo de desarrollar ciencia con base al análisis de patrones y después proponer mecanismos y procesos.

El modelo general desarrollado, estadísticamente sólido ($R^2 > 0.99$, en lo general), requiere de la consideración de energías de aplicación o ciclos de agitación múltiples, de tal forma que puedan ser interoperables distintas metodologías de laboratorio, además de poder relacionar estas energías con perturbaciones al suelo (Hadas, 1987), tales como las prácticas culturales de la labranza, los cambios de uso del suelo, las cargas vehiculares, etc.

Un punto que requiere un enfoque alternativo de modelación es la distribución de la masa y carbono en los agregados del suelo en función de su profundidad, ya que los patrones observados muestran tendencias cíclicas difícil de modelar en forma directa.

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

- Álvarez, S., & Rubio, A. (2012). Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 125-137. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.005>
- Amézketa, E. (1999). Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- 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, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.014>
- Baldock, J. A., & Kay, B. D. (1987). Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 67, 501-511. <https://doi.org/10.4141/cjss87-047>
- Balesdent, J., Basile, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Derrien, D., Fekiacova, Z., & Hatte, C. (2018). Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*, 559, 599-602. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>
- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53(3-4), 215-230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1-4), 11-29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00421-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00421-8)
- Black, J. M. W., Baragar, F. A., & Chanasyk, D. S. (1989). A mathematical model to estimate aggregate breakdown during soil sieving in a modified rapD3 rotary sieve. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(4), 817-824. <https://doi.org/10.4141/cjss89-082>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2004). Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6), 481-504. <https://doi.org/10.1080/07352680490886842>
- Bolaños, Y., Bolaños, M. A., Paz, F., & Ponce, J. I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Burt, R. (Ed.). (2004). *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- Christensen, B. T. (2001). Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52(3), 345-353. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>

- Ciric, V., Manojlovic, M., Nestic, L., & Belic, M. (2012). Soil dry aggregate size distribution: effect of soil type and land use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4), 689-703. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000025>
- Coleman, K., & Jenkinson, S. D. (1996). RothC-26.3: A model of the turnover of carbon in soil. In D. S. Powlson, P. Smith, & J. U. Smith (Eds.). *Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets (NATO ASI Series I, Vol. 38)* (pp. 237-246). Berlin: Springer.
- El Seoud, O. A., Baader, W. J., & Bastos, E. L. (2017). Practical chemical kinetics in solution. In Z. Wang (Ed). *Encyclopedia of Physical Organic Chemistry* (pp. 1-68). Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons.
- Etchevers, J. D. (2013). Estado actual de la investigación de los almacenes de carbono en México. En F. Paz-Pellat, M. Bazan, Cuevas, R. M., & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012* (pp. 27-31). Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Zacatecas, Zacatecas, México: PMC.
- Fuentes, M., Paz, F., Hidalgo, C., & Etchevers, J. (2012). Modelación y síntesis de la dinámica del carbono en agregados asociado a prácticas de conservación en cultivos agrícolas. En F. Paz-Pellat, M. Bazan, Cuevas, R. M., & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012* (pp. 51-57). Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Zacatecas, Zacatecas, México: PMC.
- Gajic, B., Dugalic, G., & Djurovic, N. (2006). Comparison of soil organic matter content, aggregate composition and water stability of gleyic fluvisol from adjacent forest and cultivation areas. *Agronomy Research*, 4(2), 499-508.
- González Molina, L., Etchevers, J. D., Paz, F., Díaz, H., Fuentes, M., Covalada, S., & Pando, M. (2011). Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *The Journal of Agricultural Science*, 149(4), 415-425. <https://doi.org/10.1017/S0021859611000232>
- González Molina, L., Etchevers, J. D., Paz, F., Carrillo, F., Acosta, M., & Báez, A. (2016). Desempeño del modelo Rothc-26.3 a nivel de parcela en México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 357-366.
- Greacen, E.L. (1958). The soil structure profile under pastures. *Australian Journal of Agricultural Research*, 9(1), 129-137. <https://doi.org/10.1071/AR9580129>
- Grimm, V. (1994). Mathematical models and understanding in ecology. *Ecological Modelling*, 75/76, 641-651. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90056-6)
- Grimm, V., Frank, K., Jeltsch, F., Brandl, R., Uchmanski, J., & Wissel, C. (1996). Pattern-oriented modelling in population ecology. *Science of the Total Environment*, 183(1-2), 151-166.
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (2012). Pattern-oriented modelling: a 'multi-scope' for predictive systems ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 367(1586), 298-310. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0180>
- Hadas, A. (1987). Long-term tillage practice effects on soil aggregation modes and strength. *Soil Science Society of America Journal*, 51(1), 191-197. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100010040x>
- Harte, J. (2002). Towards a synthesis of the Newtonian and Darwinian worldviews. *Physics Today*, 55, 29-34. <https://doi.org/10.1063/1.1522164>
- 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)
- Hutchinson, G. E. (1953). The concept of pattern in ecology. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 105, 1-12.
- 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>.
- Keddy, P. (2005). Putting the plants back into plant ecology: six pragmatic models for understanding and conserving plant diversity. *Annals of Botany*, 96(2), 177-189. <https://doi.org/10.1093/aob/mci166>
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods 5.1* (pp. 425-442). Madison, WI, USA: ASA-SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- 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, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2005WR004362>
- Kumar, R., Rawat, K. S., Singh, J., Singh, A., & Rai, A. (2013). Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. *Journal of Applied and Natural Science*, 5(1), 250-267.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Lawton, J. H. (1999). Are there general laws in ecology? *Oikos*, 84(2), 177-192.
- Levin, S. A. (1992). The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73(6), 1943-1967. <https://doi.org/10.2307/1941447>
- Lumer, H. (1936). The relation between b and k in systems of relative growth functions of the form $Y = bX^k$. *The American Naturalist*, 70, 188-191.
- Márquez, C. O., Garcia, V. J., Cambardella, C. A., Schultz, R. C., & Isenhardt, T. M. (2004). Aggregate-size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 725-735.
- Masera, O. R., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., ... Mohren, G. M. J. (2003). Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164, 177-199. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00419-2)
- Nichols, K. A., & Toro, M. (2011). A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.014>
- Niewczas, J., & Witkowska-Walczak, B. (2005). The soil aggregate stability index (ASI) and its extreme values. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.023>
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319-337. <https://doi.org/10.1007/BF02205590>

- Paz-Pellat, 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), 183-19
- Paz-Pellat, F., Balbontín, C., Etchevers, J., Martínez, M., & Ortiz, C. (2009a). Análisis multifractal del carbono en los suelos 2. Divergencia de momentos estadísticos. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 257-264.
- Paz-Pellat, F., Odi-Lara, M., Cano-González, A., Bolaños-González, M. A., & Zarco-Hidalgo, A. (2009b). Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia*, 43(6), 635-648.
- Paz-Pellat, 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-Pellat, F., Hidalgo, C., Etchevers, J., & Fuentes, M. (2012). Equivalencia ambiental y modelación de la dinámica del carbono en los agregados de los suelos. En F. Paz-Pellat, M. Bazan, Cuevas, R. M., & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012* (pp. 100-107). Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Zacatecas, Zacatecas, México: PMC.
- Paz-Pellat, F., Covalada, S., & Etchevers, J. (2014). Distribución del carbono orgánico en los diferentes tamaños de partículas del suelo: modelo simple de cinética lineal. *Terra Latinoamericana*, 32(2), 127-142.
- Paz-Pellat, F., & Etchevers, J. D. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Paz-Pellat, F., Covalada, S., Hidalgo, C., Etchevers, J., & Matus, F. (2016). Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 321-337.
- Paz-Pellat, F., Velázquez-Rodríguez, A. S., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C. I., Bolaños-González, M., de Jong, B., ... Vargas, R. (2019). Suelos. En F. Paz-Pellat, J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos, & A. S. Velázquez-Rodríguez (Eds.). *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Primer Reporte* (pp. 436-468). Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México: PMC.
- Perfect, E., & Kay, B. D. (1994). Statistical characterization of dry aggregate strength using rupture energy. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1804-1809. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060032x>
- Perfect, E., Kay, B. D., Ferguson, J. A., da Silva, A. P., & Denholm, K. A. (1993). Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil and Tillage Research*, 28(2), 123-139. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90022-H](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90022-H)
- Reiners, W. A. (1986). Complementary models for ecosystems. *The American Naturalist*, 127(1), 59-73.
- Schutter, M. E., & Dick, R. P. (2002). Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 142-153. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1420>
- Shiel, R. S., Adey, M. A., & Lodder, M. (1988). The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil. *Journal of Soil Science*, 39, 71-80.
- Six, J., Elliot, E. T., & Paustian, K. (2000a). Soil structure and soil organic matter: II. Normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1042-1049. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>
- Six, J., Paustian, K., Elliot, E.T., & Combrink, C. (2000b). Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 681-689. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sollins, P., Homman, 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)
- Tirgarsoltani, M. T., Gorji, M., Mohammadi, M. H., & Millan, H. (2014). Evaluation of models for description of wet aggregate size distribution from soils of different land uses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(2), 123-133. <https://doi.org/10.1080/0380768.2013.878642>
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., ... Kögel-Knabner, I. (2018). Microaggregates in soils. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 181, 104-136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Tyler, S. W., & Wheatcraft, S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distribution: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 362-369. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1992.03615995005600020005X>
- Valmis, S., Kerkides, P., & Aggelides, S. (1988). Soil aggregate instability index and statistical determination of oscillation time in water. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4), 1188-1191. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040054x>
- Velázquez-Rodríguez, A., Paz-Pellat, F., Hidalgo, C., & Etchevers, J. (2012). Síntesis de los patrones asociados a la formación de agregados de suelos a partir de tepetates. En F. Paz-Pellat, M. Bazan, Cuevas, R. M., & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012* (pp. 145-153). Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones. Zacatecas, Zacatecas, México: PMC.
- Wang, B., Gao, L., Yu, W., Wei, X., Li, J., Li, S., ... Wu, X. (2019). Distribution of soil aggregates and organic carbon in deep soil under long-term conservation tillage with residual retention in dryland. *Journal of Arid Land*, 11, 241-254. <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0094-6>
- Whitmore, A. P. (1996). Alternative kinetic laws to describe the turnover of microbial biomass. *Plant and Soil*, 181, 169-173
- Zeide, B. (1993). Analysis of growth equations. *Forest Science*, 39(3), 594-616.