

# Patrones de la distribución del carbono orgánico por fracciones de partículas primarias del suelo

## Patterns of the distribution of organic carbon by fractions of primary soil particles

Fernando Paz<sup>1\*</sup>, Sara Covaleda<sup>2</sup>, Claudia Hidalgo<sup>3</sup>, Francisco Matus<sup>4</sup>, Aurelio Báez<sup>5</sup>, Alma S. Velázquez<sup>6</sup> y Jorge D. Etchevers<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GRENASER, <sup>3</sup> 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)

<sup>2</sup> Kibeltik Clima y Medio Ambiente A.C. Calle Tlaxcala 48, Barrio Tlaxcala. 29210 San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.

<sup>4</sup> Laboratorio de Conservación y Dinámica de Suelos Volcánicos, Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales, Universidad de La Frontera. Avenida Francisco Salazar. 01145 Temuco, Araucanía, Chile.

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CE Bajío. Carretera Celaya San Miguel de Allende km 6.5. 38010 Celaya, Guanajuato, México.

<sup>6</sup> Facultad de Ciencias, Campus El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca km 15.5, Piedras Blancas. 50200 Toluca de Lerdo, Estado de México, México.

Editor invitado: Dr. Fernando Paz Pellat

### RESUMEN

Para analizar la dinámica del carbono orgánico de los suelos (COS) asociada a su cambio de uso, de vegetación y prácticas de manejo, es necesario desarrollar modelos para usarse en forma predictiva. Un enfoque de modelación es la distribución del COS presente en los complejos organominerales primarios (arcillas, limos y arenas) ligado a las fracciones físicas. Para la separación de las fracciones físicas se emplea la dispersión del suelo por ultrasonido, paso que requiere optimizar las energías de sonicación para lograr la completa dispersión del suelo. En este trabajo se discute el modelo COLPOS y su hipótesis, así como sus posibles extensiones que consideran las masas y los enriquecimientos de las fracciones físicas del suelo, adicionalmente al análisis de las relaciones entre esas fracciones. Para analizar los patrones asociados al modelo COLPOS y sus extensiones, se analizan resultados disponibles de fraccionamientos de suelos mexicanos realizados con ultrasonido, además de tres bases de datos de fraccionamientos similares publicados en la literatura. Éstos muestran que el modelo COLPOS puede ser parametrizado en función del tamaño y masa de las partículas del suelo; aunque para el caso de las masas algunos resultados son inconsistentes.

Del análisis de los cocientes del carbono orgánico entre fracciones para dos cinéticas lineales diferentes (organomineral y organomineral más partícula) las relaciones muestran mayor dispersión que para el caso de solo considerar fracciones de una cinética.

**Palabras clave:** complejos organominerales y particulados, energía de dispersión, fraccionamiento físico por ultrasonido, modelo COLPOS, relación entre fracciones físicas, tamaño y masa de partículas del suelo.

### SUMMARY

In order to analyze the dynamics of soil organic carbon (SOC) associated with changes in land use / vegetation and management practices, it is necessary to develop models that can be used predictively. A modeling approach is the distribution of SOC by physical fractions of the primary organomineral complexes (clays, silts and sands), using ultrasound soil dispersion techniques, where it is necessary to optimize the sonication energies to achieve complete soil dispersion. Under this consideration of complete dispersion, the COLPOS model and its hypothesis are discussed, as well as its possible extensions when

#### Cita recomendada:

Paz, F., Covaleda, S., Hidalgo, C., Matus, F., Báez, A., Velázquez, A. S. y Etchevers, J. D. (2022). Patrones de la distribución del carbono orgánico por fracciones de partículas primarias del suelo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-13. e1322. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1322>

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

considering the masses and enrichments of the physical fractions of the soil, in addition to the analysis of the relationships between these fractions. To analyze the patterns associated with the COLPOS model and its extensions, the available Mexican soil fractionations using ultrasound are analyzed, in addition to three databases of similar fractionations published in the literature. The results show that the COLPOS model can be parameterized according to the size and mass of the soil particles; although for the case of the masses some results are inconsistent. From the analysis of the organic carbon ratios between fractions for two different kinetics, the relationships show greater dispersion than for the case of only kinetic fractions.

**Index words:** *organomineral and particulate complexes, dispersion energies, physical fractionation using ultrasound, COLPOS model, relationships between physical fractions, size and mass of soil particles.*

## INTRODUCCIÓN

La dinámica del carbono orgánico de los suelos (COS) determina las emisiones de CO<sub>2</sub> y la captura de carbono. Ambas son consecuencia de los cambios de uso del suelo y prácticas de manejo para su uso. Los cambios pueden ser predichos mediante el empleo de modelos apropiados (Lal, 2009). La gran mayoría de los modelos que tratan la dinámica del COS contienen almacenes “virtuales” con cinéticas asociadas de primer orden (Paustian, Collins y Paul, 1997), que resultan difíciles de caracterizar con técnicas de laboratorio (Buyanosky, Aslam y Wagner, 1994; Zimmermann, Leifeld, Schmidt, Smith y Fuhrer, 2007), por lo que Elliot, Paustian y Frey (1996) propusieron un cambio de paradigma para modelar lo medible. Las técnicas experimentales para caracterizar los almacenes del COS generalmente se han asociadas al fraccionamiento físico de los suelos, porque así se evita perturbar el COS (p. ej. al cambiar el pH que pudiese ocurrir al emplear procedimientos químicos).

El fraccionamiento físico de los suelos produce diferentes productos (Christensen, 2001): materia orgánica particulada (MOP), complejos organominerales primarios (materia orgánica asociada con arcilla, limo y arena) y complejos organominerales secundarios (agregados). Entre los métodos de fraccionamiento físico, el uso del ultrasonido como

medio de dispersión (North, 1976; Christensen, 1992) es ampliamente utilizado. Sin embargo, su efectividad depende de las muestras del suelo y el tratamiento requerido (Oorts, Vanlauwe, Recous y Merckx, 2005), ya que una baja energía del ultrasonido no logra una dispersión completa y una alta produce abrasión de los suelos (Christensen, 1992) con modificaciones en la distribución del carbono.

El proceso de dispersión de los suelos puede generar contaminación de las fracciones físicas de menor tamaño por las de mayor tamaño y enmascarar los patrones de distribución del COS en las fracciones (Balesdent, Pétraud y Feller, 1991; Balesdent, Besnard, Arrouays y Chenu, 1998; Baldock y Skjemstad, 2000; Chenu y Plante, 2006). por lo que es necesario optimizar la energía de dispersión (Báez-Pérez, Hidalgo, Matus, Prat y Etchevers, 2011; Hidalgo, Paz y Etchevers, 2012; Paz, Hidalgo y Etchevers, 2012).

La literatura reporta diferentes protocolos de fraccionamiento físico de los suelos que emplea ultrasonido, los cuales pueden ser clasificados, después de la disgregación inicial del suelo con esferas de cristal y agitación o tamizado en húmedo y agitación, como: a). aplicación directa de ultrasonido a la fracción  $\leq 2000 \mu\text{m}$ , y después la separación de las fracciones físicas y la materia orgánica particulada (MOP) (Anderson, Saggar, Bettany y Stewart, 1981; Christensen, 1985; Covalada *et al.*, 2011); b) aplicación de ultrasonido a solo una parte de las fracciones del suelo ( $< 50 \mu\text{m}$ , Balesdent *et al.*, 1991; Gavinelli *et al.*, 1995, o  $< 250 \mu\text{m}$ , Matus *et al.*, 2011; Báez *et al.*, 2011); y, c) aplicación de baja energía a la fracción  $\geq 50 \mu\text{m}$  y energía suficiente para dispersión completa a la fracción más pequeña (Balesdent *et al.*, 1998). En lo general, las fracciones  $\geq 50 \mu\text{m}$  son separadas (MOS y asociada a mineral) por tamizado en húmedo por agitación mecánica y las  $< 50 \mu\text{m}$  por centrifugación/sedimentación.

Para analizar el efecto de las energías de dispersión en los patrones de la distribución del COS por fracciones, en este trabajo se usa el modelo COLPOS (Componentes Organomineral, Lábil-Particulado y de Orden inerte de los Suelos) de Paz, Covalada y Etchevers (2014) y Paz, Covalada, Hidalgo, Etchevers y Matus (2016) como referencia. El modelo COLPOS caracteriza la dinámica de las fracciones del COS en función del tamaño de las partículas del suelo, que analiza los patrones de esta distribución con base en la masa de las fracciones físicas, así como el enriquecimiento de las fracciones

(Christensen, 1992) desde una perspectiva de balances de masa y de la consideración de datos experimentales del fraccionamiento completo de los suelos (Matus, 2021). Finalmente se analizan las relaciones entre las fracciones del suelo con el propósito de estimar datos faltantes de análisis de suelos para parametrizar el modelo COLPOS.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Datos Experimentales del Fraccionamiento Físico del Carbono Orgánico en Suelos Mexicanos

Existen pocos trabajos de fraccionamiento físico de los suelos con ultrasonido. Consideraremos tres ejemplos realizados por miembros de presente grupo de investigación, en los que los niveles de energía de ultrasonido que se aplicaron fueron calibrados calorimétricamente según Roscoe, Buurman y Velthorst (2000) y Oorts *et al.* (2005): (a) Suelos de cultivos agrícolas y sitios pareados de bosques-cultivos, donde se utilizó la técnica de Balesdent *et al.* (1991) y el ultrasonido se aplicó a la fracción  $<250\mu\text{m}$  (Matus *et al.*, 2011). Estos autores seleccionaron el nivel de energía  $910\text{ J ml}^{-1}$ , aunque en trabajos posteriores consideran la energía de  $1365\text{ J ml}^{-1}$  como la requerida para dispersión completa del suelo (Hidalgo *et al.*, 2012; Paz *et al.*,

2012). La concentración de C en cada fracción de tamaño se determinó con un analizador automatizado para carbono total (marca Shimatzu, modelo 5050A). Matus *et al.* (2011) se describe la técnica utilizada, así como los sitios donde se aplicó. (b) En un trabajo complementario empleando la misma técnica, Báez *et al.* (2011) analizaron cultivos agrícolas con labranza convencional y manejo orgánico. La energía de dispersión óptima usada fue también de  $1365\text{ J ml}^{-1}$ . Báez *et al.* (2011) describe la técnica utilizada, así como los sitios donde se aplicó. (c) Suelos con cultivos agrícolas y toposecuencia de degradación forestal. La descripción de los sitios y métodos que se usaron en este grupo de experimentos se describe en Covalada, Pajares, Gallardo y Etchevers (2006) y Covalada *et al.* (2011). El COS se determinó por combustión seca en un analizador LECO. La aplicación de ultrasonido se realizó para la fracción  $<50\mu\text{m}$ . Para determinar la cantidad mínima de energía necesaria para dispersar completamente las muestras, se hicieron pruebas con tres tipos de suelos, aplicando cantidades crecientes de energía a las muestras. Tras este proceso se decidió aplicar  $244\text{ J ml}^{-1}$  a las muestras de Andosoles y Cambisoles y  $354\text{ J ml}^{-1}$  a las muestras de Acrisoles.

En el Cuadro 1 se presentan las características de los sitios y suelos que se consideraron de los trabajos analizados de Matus *et al.* (2011) y Báez *et al.* (2011).

**Cuadro 1. Características de los usos del suelo/vegetación y tipos de suelo de los trabajos de Matus *et al.* (2011) y Báez *et al.* (2011).**  
**Table 1. Characteristics of land uses/vegetation and soil types from the works of Matus *et al.* (2011) and Baez *et al.* (2011).**

Tipo de vegetación / uso del suelo	Tratamiento / Condición	Clase textural	Tipo de suelo
Cultivo	Tradicional de maíz y frijol, con menos de 30 años de establecimiento	Franca	Ferrasol
Bosque de encino	Con 40 años de existencia	Franca	
Cultivo	Tradicional de maíz y frijol, con 60 años de establecimiento	Franco arcillo limosa	Ferrasol
Bosque de liquidambar	Con 40 años de existencia	Franco limosa	
Cultivo	Tradicional de maíz y frijol, 60 años de establecimiento	Franco limosa	Ferrasol
Bosque de pino	Con 40 años de existencia	Franca	
Cultivo	Tradicional Orgánico	Arcillosa	Acrisol
Cultivo	Tradicional Orgánico	Franco limosa	Andosol

En el Cuadro 2 se muestran los usos del suelo/vegetación y tipos de suelo del trabajo de Covalada *et al.* (2011).

Adicionalmente a los trabajos previamente reseñados, se analizaron los datos de tres publicaciones en las que se empleó dispersión completa del suelo *sensu* Matus (2021): (a) Cronosecuencia de bosque a maíz cultivado (7 y 35 años), profundidad de 0 a 30 cm, de Balesdent *et al.* (1998), que empleó dos niveles de sonicación, uno ligero para las fracciones > 50  $\mu\text{m}$  y otro para dispersión completa de las fracciones  $\leq 50 \mu\text{m}$ . (b) Sitios pareados de praderas y cultivos (> 5 años) para distintos tipos de suelo (Gleysoles) a la profundidad de 2 a 8 cm en Quebec, Canadá (Elustondo, Angers, Laverdier y N'Dayegamiye, 1990), en los que el fraccionamiento utilizado fue el Christensen (1985). (c) Secuencia de degradación (> 10 años) de bosque (tipo sabana, vegetación "Cerrado") en Goias, Brasil (Freitas, Blancaneaux, Gavinelli, Larré y Feller, 2000), profundidad de 0 a 10 cm (Latosoles), donde la técnica de Gavinelli *et al.* (1995) fue utilizada para el fraccionamiento.

En los análisis de la sección siguiente se utilizaron los datos muestrales individuales y no valores promedio, ya que esta operación transforma líneas rectas en puntos, en el contexto del modelo COLPOS (Paz *et al.*, 2014 y 2016) utilizadas como referencia.

## Modelo COLPOS y Balances de Masa

El modelo COLPOS fracciona los complejos organominerales y particulados primarios en tres grupos: carbono orgánico particulado ( $C_p$ ), carbono organomineral ( $C_m$ ) y carbono orgánico inerte (COI). Para la división entre solo carbono organomineral y la mezcla particulada y organomineral se utiliza el tamaño de partículas de 50  $\mu\text{m}$ .

El fraccionamiento físico del suelo en compartimentos, se basa en la hipótesis que la accesibilidad al C por la biomasa microbiana es el factor que controla la cinética de las reacciones y no la recalcitrancia del material (Dungait, Hopkins, Gregory y Whitmore, 2012). Las fracciones  $C_p$  y  $C_m$  tienen cinéticas diferentes (Carter, Angers, Gregorich y Bolinder, 2003; Skjemstad, Spouncer, Cowie y Swift, 2004; Lavalley, Soong y Cotrufo, 2019), por lo que pueden diferenciarse entre sí. Adicionalmente, al igual que algunos modelos de cinéticas lineales de primer orden con tres compartimentos o almacenes, donde uno de ellos es de tipo inerte (Verberne, Hassink, de Willigen, Groot y Van Veen, 1990; Hansen, Jensen, Nielsen y Svendsen, 1991), el modelo COLPOS usa el almacén COI, el cual tiene tiempos de residencia de cientos a miles de años. Este almacén ha sido utilizado por modelos más complejos como el RothC (Coleman

**Cuadro 2. Características de los usos del suelo/vegetación y tipos de suelo de los trabajos de Covalada *et al.* (2011).**

**Table 2. Characteristics of land uses/vegetation and soil types from the works of Covalada *et al.* (2011).**

Tipo de vegetación / uso del suelo	Tratamiento / Condición	Clase textural	Tipo de suelo
Pastizal (vegetación secundaria)	Ninguno	Franco arcillo limoso	Andosol
Bosque pino-encino conservado	Ninguno	Franco arcillo limoso y franco limoso	Andosol
Bosque pino-encino degradado	Ninguno	Franco arcillo limoso	Andosol
Bosque pino-encino con extracción de leña	Ninguno	Arcillo limoso	Cambisol
Bosque Pino-Encino degradado	Ninguno	Franco arcillo limosa y arcillo limosa	Cambisol
Cultivo	Recién abandonado	Franco arcilloso y franco arcillo limoso	Andosol
Bosque pino-encino degradado	Ninguno	Arcillo limoso	Andosol
Bosque pino-encino degradado	Ninguno	Franco arcillo limosa	Acrisol
Cultivo	Tradicional, muestreado en 2000	Arcilloso	Acrisol
Cultivo	Tradicional, muestreado en 2002	Arcillosa	Acrisol
Sin uso (sin vegetación aparente)	Ninguno	Arcilloso	Acrisol
Pastizal	Ninguno	Arcilloso	Acrisol

y Jenkinson, 1996) para obtener mejores ajustes a los datos experimentales (Jenkinson, 1990).

La Figura 1a muestra el modelo (tri-lineal) del carbono orgánico total ( $C_t$ ) en función de  $1/T_f$ , donde  $T_f$  es el tamaño de las partículas para la fracción  $f$  y, la Figura 1b el carbono organomineral ( $C_m$ ) contra  $1/T_f$  (bi-lineal). En términos cuantitativos, el modelo COLPOS está definido por (caso de  $C_t$ ):

Fracción  $0 \leq 1/T_f \leq 1/50$ :

$$C_f = C_t - r \left( \frac{1}{T_f} \right) \quad (1)$$

Fracción  $1/50 \leq 1/T_f \leq 1/T_{COI}$ :

$$C_f = C_m - q \left( \frac{1}{T_f} \right) \quad (2)$$

Fracción  $1/T_{COI} \leq 1/T_f$ :

$$C_f = COI \quad (3)$$

donde:  $r$  y  $q$  son las pendientes de las líneas rectas definidas en la Figura 1, las cuales pueden ser estimadas a partir de  $C_{50}$  y  $C_t$  o  $C_m$ . En todos los casos  $1/T_f$  tiene descontado el valor  $1/2000$ , que representa el valor máximo del tamaño de las partículas de  $2000 \mu\text{m}$ .  $C_p (= C_t - C_m)$  es el carbono orgánico particulado y  $C_{50}$  representa el carbono orgánico de la fracción arcilla más limo ( $50 \mu\text{m}$ ).

El valor del COI puede determinarse del cuadro de valores de este almacén para los diferentes usos del suelo y vegetación de México mostrado en Paz y Etchevers (2016). Definido el valor del COI,  $1/T_{COI}$  puede estimarse de (Paz *et al.*, 2016):

$$\frac{1}{T_{COI}} = 0.68 + 0.08COI \quad (4)$$

Usando el COS con referencia a la masa total de suelo ( $\text{g C /kg suelo}$ ), para dos almacenes  $a$  y  $b$  cualesquiera, los balances de masa están dados por:

$$C_t M_t = C_a M_a + C_b M_b \quad (5)$$

$$M_t = M_a + M_b \quad (6)$$

Dado que  $M_t = 1$  (un kilo de suelo, como referencia), con  $M_a$  y  $M_b$  como fracciones, la relación (5) es equivalente a:

$$C_t = C_a + C_b \quad (7)$$

En el caso de considerar al almacén COI, las relaciones permanecen intactas al cambiar  $C_t$  por  $(C_t - COI)$ .

Paz *et al.* (2014) consideraron la relación (7) usando el formato:

$$C_t = \left( \frac{C_t - C_b}{C_a - C_b} \right) C_a + \left( \frac{C_t - C_a}{C_a - C_b} \right) C_b \quad (8)$$

que se simplifica al usar  $C_a = C_t - C_b$  y  $C_b = C_t - C_a$  a:

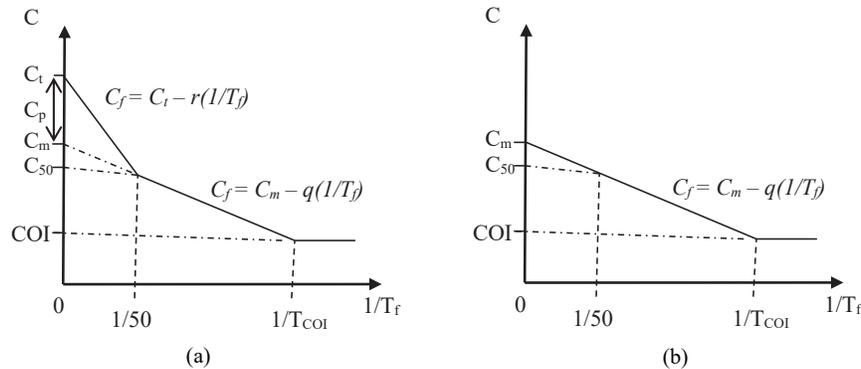


Figura 1. Modelo COLPOS en el espacio: (a)  $1/T_f - C_t$  y (b)  $1/T_f - C_m$ .  
Figure 1. COLPOS model in space: (a)  $1/T_f - C_t$  and (b)  $1/T_f - C_m$ .

$$C_t = \left( \frac{C_a}{C_a - C_b} \right) C_a + \left( \frac{C_b}{C_a - C_b} \right) C_b \quad (9)$$

Usando la hipótesis:

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{C_b}{C_a} \quad (10)$$

La relación (9) puede plantearse como:

$$C_t = \left( \frac{T_a}{T_a - T_b} \right) C_a + \left( \frac{T_b}{T_a - T_b} \right) C_b \quad (11)$$

La cual es equivalente a los modelos lineales por grupos de fracciones del modelo COLPOS (Paz *et al.*, 2014).

En forma similar al uso de  $T_f$  es posible usar las masas de las fracciones ( $M_f$  en %) y la hipótesis:

$$\frac{M_b}{M_a} = \frac{C_b}{C_a} \quad (12)$$

Que al igual que  $1/T_f$  los valores de  $1/M_f$  debe descontarse el valor  $1/100$ , correspondiente a la fracción máxima de la masa (100 %). La relación (12) implica que solo hay que cambiar  $1/T_f$  por  $1/M_f$  en el modelo de la Figura 1 y que hay una relación lineal entre  $1/T_f$  y  $1/M_f$ .

Para considerar en forma explícita las masas de las fracciones físicas del suelo, es necesario utilizar el concepto de enriquecimiento de las fracciones ( $E_f$ ) (Christensen, 1992):

$$E_f = \frac{C_{ff}}{C_t} \quad (13)$$

donde:  $C_{ff}$  es la concentración de la fracción  $f$  con relación a la masa de la fracción (g C / kg fracción). El balance de masas queda entonces como:

$$C_t M_t = C_{af} M_a + C_{bf} M_b \quad (14)$$

que, en función de  $E_f$  puede ponerse como:

$$1 = E_a M_a + E_b M_b \quad (15)$$

que es simplemente la relación (7) dividida entre  $C_t$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Fraccionamientos de Matus *et al.* (2011), Báez *et al.* (2011) y Covalada *et al.* (2011)

Haciendo uso de los datos de Covalada *et al.* (2011) se determinaron los niveles de energía (tiempos de sonicación) óptimos para la dispersión total del suelo. La Figura 2 muestra el efecto de la energía en el modelo COLPOS, Figura 1b, para el caso organomineral  $C_m$ . Cuando se aplican bajos niveles de energía de ultrasonido (tiempos cortos de sonicación), el modelo tiene un comportamiento tipo logarítmico (Paz *et al.*, 2016), y al incrementarse la energía de sonicación cambia a un modelo lineal, variando su pendiente al incrementarse la energía. Así, los parámetros del modelo COLPOS son dependientes del nivel de dispersión de los suelos.

En el modelo COLPOS, la relación  $C_{50}/C_t$  es utilizada para parametrizarlo (Paz *et al.*, 2014 y 2016)

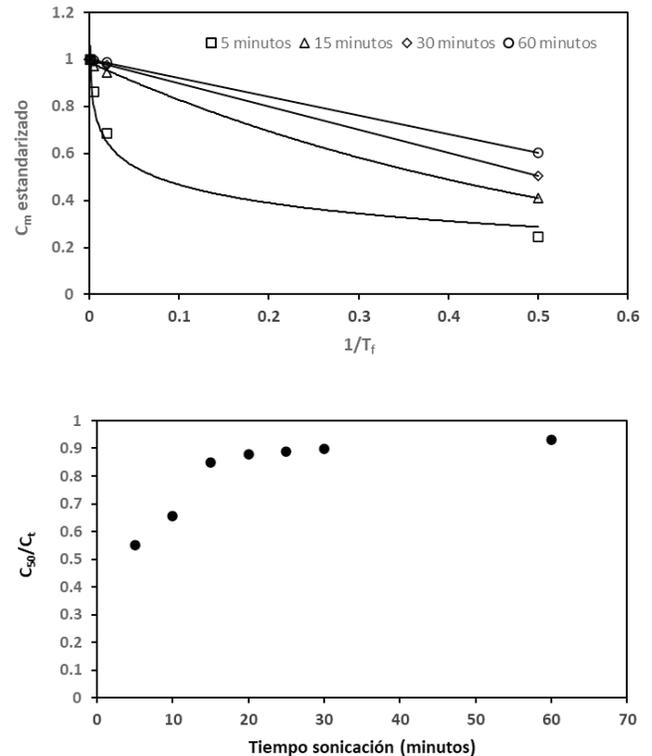


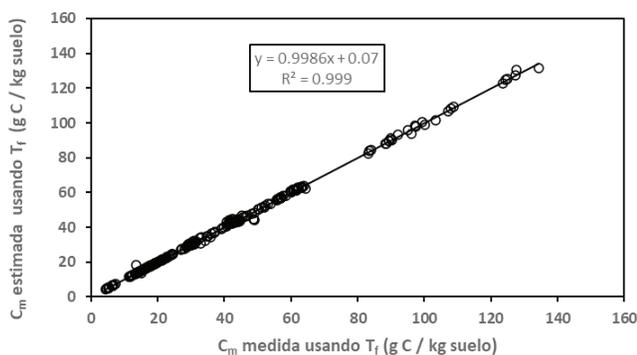
Figura 2. Efecto de la energía de ultrasonido (tiempos de sonicación) aplicada en la dispersión de los suelos en el  $C_m$ .  
Figure 2. Effect of applied ultrasound energy (sonication times) on soil dispersion in  $C_m$ .

plantea una relación universal aplicable a todos los suelos, similar a lo discutido por Matus (2021). En el contexto de la saturación de los almacenes del COS, la fracción  $C_{50}$  contra  $C_t$  (como subrogado del ingreso de carbono orgánico al suelo) se utiliza para revisar su saturación (relación lineal que tiende a una línea recta horizontal) (Hassink, 1997; Carter *et al.*, 2003); aunque también se ha analizado solo la fracción arcilla, la cual puede estar saturada y la fracción limo no (Matus *et al.*, 2016). En la Figura 2 se muestra que  $C_{50}/C_t$  es dependiente del tiempo de sonicación (energía de ultrasonido), por lo que para analizar su patrón es necesario revisar si los suelos han sido dispersados totalmente (Matus, 2021).

Del análisis de los muestreos ( $N = 59$  suelos,  $n = 236$  muestras de fracciones) de trabajos realizados en México, con el uso del modelo COLPOS (Figura 2b) para solo el carbono organomineral  $C_m$ , se obtienen los resultados que muestra la Figura 3, correspondientes al modelo ajustado ( $R^2 > 0.99$ ).

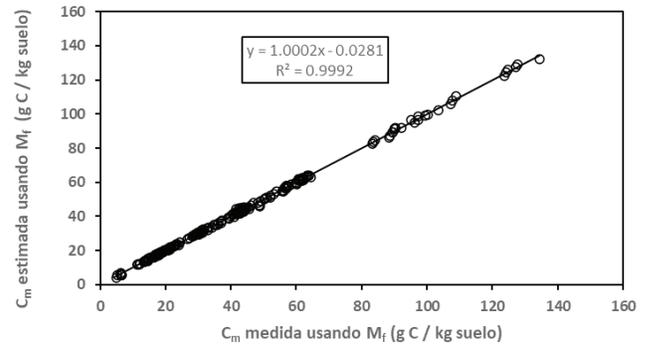
Ahora bien, si se cambia  $1/T_f$  por  $1/M_f$  en el modelo COLPOS, se obtiene como resultados de este ajuste, lo que se muestra en la Figura 4 CON buenos ajustes ( $R^2 > 0.99$ ). Como resultado de estos ajustes, se tiene la relación lineal  $(1/M_f) = a + b(1/T_f)$ . La Figura 5 muestra los resultados obtenidos de estimar  $(1/M_f)$  de  $(1/T_f)$ , donde los ajustes resultaron buenos ( $R^2 > 0.99$ ).

Si se usa la base de datos de Covalada *et al.* (2011), la Figura 6 muestra el resultado de ajustar el modelo COLPOS usando  $1/T_f$  y  $1/M_f$  para usos del suelo con diferentes perturbaciones (degradación de los bosques o cambios de uso del suelo). En el caso de usar  $(1/T_f)$



**Figura 3.** Resultados del ajuste del modelo  $1/T_f$  contra  $C_m$  (Figura 2b) a las fracciones individuales obtenidas de los suelos mexicanos.

**Figure 3.** Results of the adjustment of the  $1/T_f$  versus  $C_m$  model (Figure 2b) to the individual fractions obtained from Mexican soils.



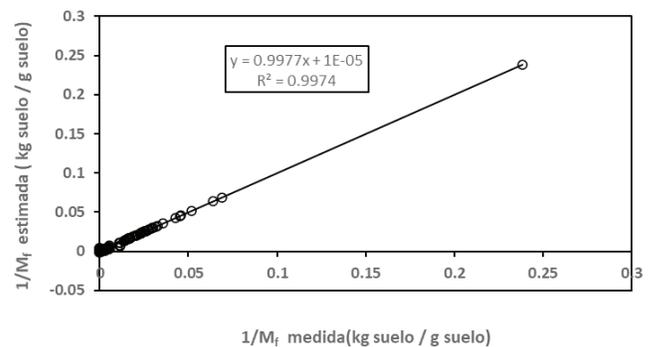
**Figura 4.** Resultados del ajuste del modelo  $1/M_f$  contra  $C_m$  a las muestras individuales del fraccionamiento de los suelos mexicanos.

**Figure 4.** Results of the adjustment of the model  $1/M_f$  versus  $C_m$  to the individual samples of the fractionation of Mexican soils.

el efecto de la masa de las fracciones no es visible, pudiendo compararse casos de suelos con texturas muy diferentes. Al usar  $1/M_f$ , la masa de las fracciones (p. ej. masa de arcilla más limo y arcilla) define patrones diferentes, tal como se observa en la Figura 6, los cuales definen los parámetros  $r$  y  $q$  (Figura 1a).

### Otros Fraccionamientos

Para el caso de la cronosecuencia de bosque a cultivo de maíz de Balesdent *et al.* (1998), la Figura 7 muestra los patrones del ajuste del modelo COLPOS para  $C_t$  y  $C_m$  usando  $1/T_f$  (Figura 1). En lo general, al ser perturbado el suelo las pendientes  $r$  y  $q$  (Figura 1) reflejan esta degradación del COS (pérdida de  $C_t$  y  $C_m$ ).



**Figura 5.** Resultados del ajuste del modelo lineal  $1/T_f$  contra  $1/M_f$  a las muestras individuales del fraccionamiento de los suelos mexicanos.

**Figure 5.** Results of the adjustment of the linear model  $1/T_f$  versus  $1/M_f$  to the individual samples of the fractionation of Mexican soils.

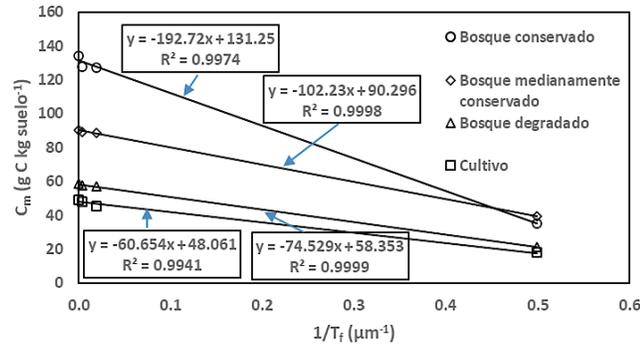
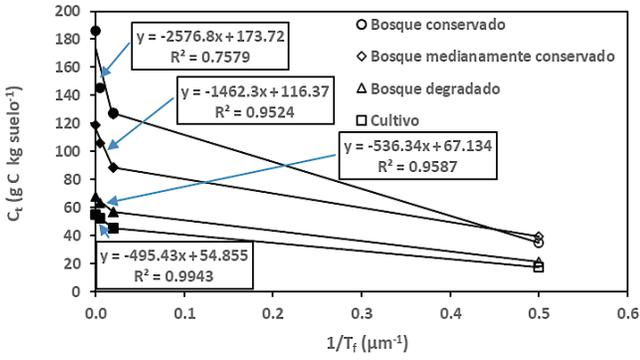


Figura 6. Ajuste del modelo COLPOS ver contra  $1/T_f$  y  $1/M_f$  para una secuencia de perturbación. Fuente: Covaleda *et al.* (2011).

Figure 6. Adjustment of the COLPOS model versus  $1/T_f$  and  $1/M_f$  for a disturbance sequence. Source: Covaleda *et al.* (2011).

El modelo COLPOS usando  $1/M_f$  fue ajustado a la cronosecuencia analizada. La Figura 8 muestra los resultados obtenidos para  $C_m$ , que muestra pendientes similares al caso de  $1/T_f$  (diferentes unidades,  $1/T_f$  en miles y  $1/M_f$  en cientos).

De las Figuras 7 y 8, cuando los suelos analizados tienen la misma textura o ésta es muy similar, el modelo usando  $1/T_f$  asemeja al definido en función de  $1/M_f$ .

El uso del enriquecimiento (E) para  $C_m$  en función de  $1/T_f$  esta mostrado en la Figura 9, donde las pendientes tienen un patrón inverso al mostrado al usar  $C_m$  (Figura 7). Este formato de representación del modelo COLPOS resulta más fácil de interpretar ya que usa fracciones relativas ( $C_f/C_t$ ) que convergen a un punto común (1.0).

Los sitios pareados praderas naturales contra cultivos de Elustondo *et al.* (1990) muestran patrones de  $C_m$  contra  $1/T_f$  del modelo COLPOS (Figura 1b),

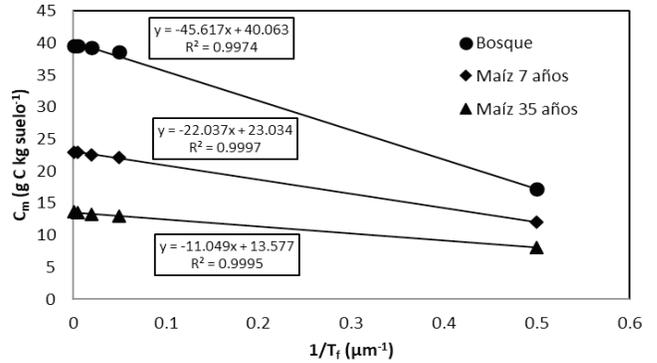
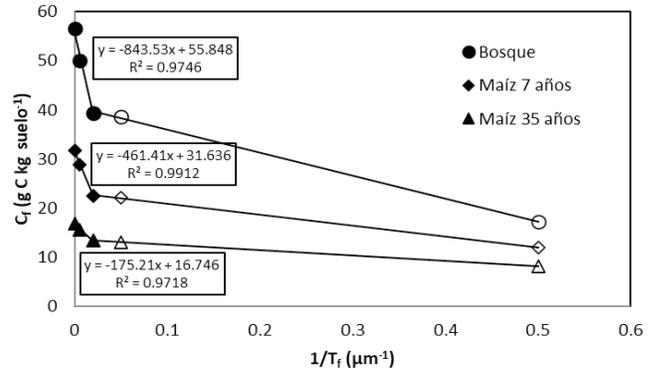


Figura 7. Ajuste del modelo COLPOS para  $C_t$  (arriba) y  $C_m$  (abajo) usando  $1/T_f$  para la cronosecuencia de Balesdent *et al.* (1998).

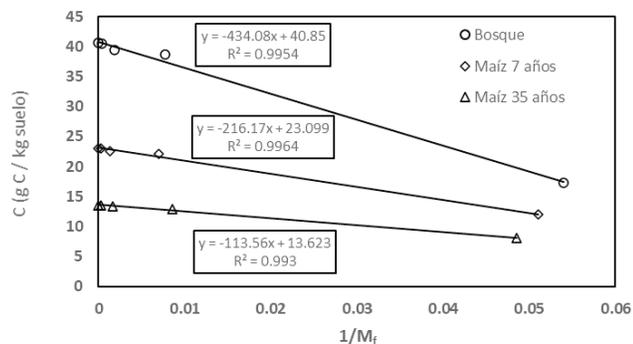
Figure 7. Adjustment of the COLPOS model for  $C_t$  (top) and  $C_m$  (bottom) using  $1/T_f$  for the chronosequence Balesdent *et al.*

pero para el caso de usar  $1/M_f$ , estos patrones difieren de los analizados (Figura 10). Algo similar se presenta para el caso de la secuencia de perturbación de bosque tipo sabana a pasto degradado de largo plazo (Freitas *et al.*, 2000), tal como se muestra en la Figura 11.

Los patrones observados en las Figuras 10 y 11 son difíciles de interpretar ya que pueden ser simplemente errores experimentales o planteamientos que el modelo COLPOS no es generalizable al caso de  $1/M_f$ .

### Patrones entre Razones de Fracciones Físicas del Carbono Orgánico de los Suelos

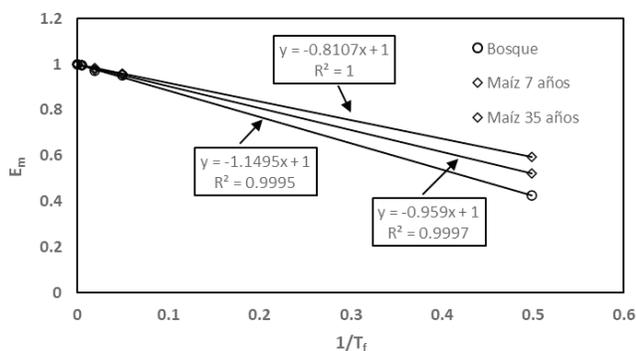
Para el caso de los suelos mexicanos analizados, las relaciones  $C_{50}/C_t$  y  $C_t/C_{50}$  están mostradas en la Figura 12. Las relaciones previas mostradas en Paz *et al.* (2014 y 2016) difieren de las mostradas en la Figura 12 dado que no se consideraron suelos endurecidos (tepetates) y se agregó el valor de la muestra con  $C_t$



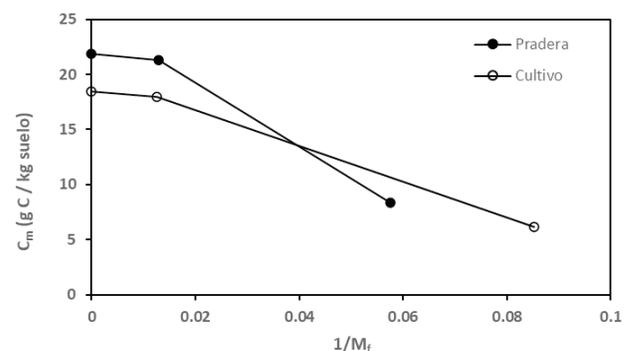
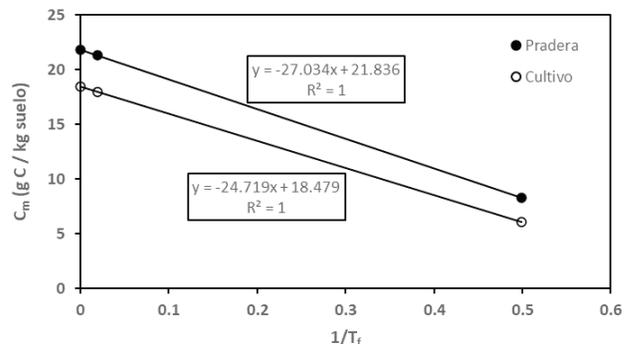
**Figura 8. Ajuste del modelo COLPOS para  $C_m$  usando  $1/M_f$  para la cronosecuencia de Balesdent *et al.* (1998).**  
**Figure 8. Adjustment of the COLPOS model for  $C_m$  using  $1/M_f$  for the chronosequence Balesdent *et al.* (1998).**

máximo, no considerado previamente. Los patrones mostrados en la Figura 12 muestran dispersión, la cual es producto de considerar dos patrones lineales (Figura 1a), donde  $C_i$  corresponde a la mezcla carbono orgánico particulado más organomineral y  $C_{50}$  a solo organomineral, por lo que el valor del almacén de carbono orgánico particulado ( $C_p$ ) influye en la relación. El almacén  $C_p$  varía en función del grado de perturbación del suelo (Figura 7), para una misma textura del suelo.

Con el uso de la consideración de establecer relaciones de razones de las fracciones físicas del COS para cinéticas similares, se analizaron éstas solo para el caso de carbono organomineral ( $C_m$ , Figura 1b). En el caso de los datos de Matus *et al.* (2011) y Báez *et al.* (2011), la fracción entre 50 y 2000  $\mu\text{m}$  (solo organomineral) utilizada fue de 250  $\mu\text{m}$  y para



**Figura 9. Modelo COLPOS en formato de enriquecimientos para  $C_m$ , para la cronosecuencia de Balesdent *et al.* (1998).**  
**Figure 9. COLPOS model in enrichment format for  $C_m$ , for the chronosequence of Balesdent *et al.* (1998).**



**Figura 10. Patrones del modelo COLPOS para  $C_m$  contra  $1/T_f$  y  $1/M_f$  para sitios pareados de praderas naturales y cultivos. Fuente: Elustondo *et al.* (1990).**  
**Figure 10. COLPOS model patterns for  $C_m$  versus  $1/T_f$  and  $1/M_f$  for paired natural grassland and crop sites. Source: Elustondo *et al.* (1990).**

Covaleda *et al.* (2011) fue 200  $\mu\text{m}$ . La Figura 13 muestra las relaciones  $C_{m250} - C_{50}$  y  $C_{m200} - C_{50}$ , además de  $C_m - C_{50}$ , donde  $C_m$  es el total, para los suelos mexicanos analizados. Se observa, en lo general, que la dispersión de las relaciones es menor que en el caso de la Figura 12.

Para tener una perspectiva de las relaciones entre  $C_{50}$  y el  $C_f$  de fracciones menores de 50  $\mu\text{m}$ , se analizaron los datos de Six, Conant, Paul y Paustian (2002) discutidos por Paz *et al.* (2016) para la fracción de C en la fracción 20  $\mu\text{m}$  ( $C_{20}$ ). La Figura 14 muestra la relación entre  $C_{20}$  y  $C_{50}$  obtenida del análisis, donde la dispersión de la relación mostrada es pequeña, similar a los casos mostrados en la Figura 13.

Tal como se muestra en Paz *et al.* (2014), las relaciones entre  $C_{50}$  y la fracción de C de las arcillas muestra alta dispersión, por lo que las relaciones de la fracción arcilla más limo con las fracciones alrededor de 2  $\mu\text{m}$  de las arcillas se espera sea con mayor dispersión al del uso de las fracciones  $\geq 20 \mu\text{m}$ .

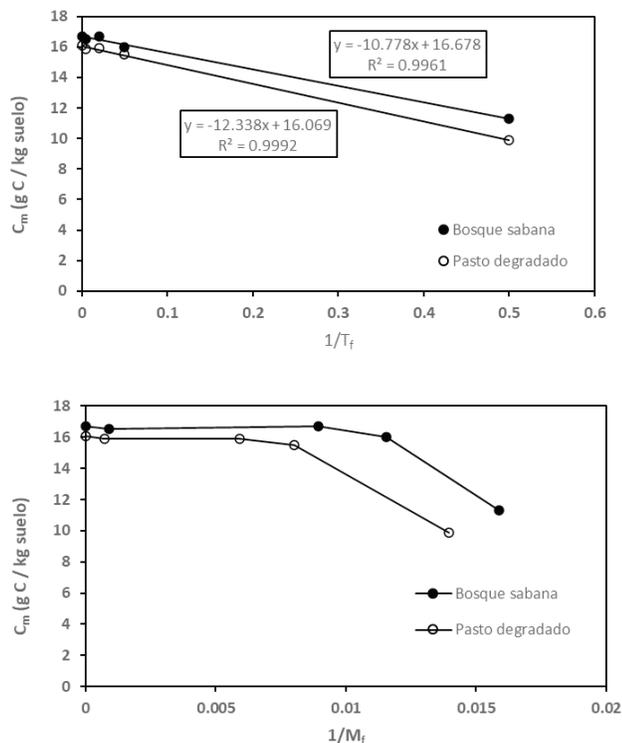


Figura 11. Patrones del modelo COLPOS para  $C_m$  contra  $1/T_f$  y  $1/M_f$  para secuencia de perturbación de bosque tipo sabana a pastos degradados. Fuente: Freitas *et al.* (2000).

Figure 11. COLPOS model patterns for  $C_m$  versus  $1/T_f$  and  $1/M_f$  for disturbance sequence from savanna-type forest to degraded pasture. Source: Freitas *et al.* (2000).

## Discusión de los Resultados

El modelo COLPOS parametrizado en función de  $1/T_f$  para  $C_t$  y  $C_m$  tiene buenos ajustes experimentales ( $R^2 > 0.99$ ) a los datos medidos en fraccionamientos físicos usando ultrasonido. Usando una relación lineal entre  $1/T_f$  y  $1/M_p$ , el modelo COLPOS puede ser parametrizado en función de  $1/M_p$ , que para el caso de los suelos mexicanos analizados mostró buenos ajustes ( $R^2 > 0.99$ ), pero para dos casos publicados en la literatura los patrones encontrados difieren de los esperados. Esto puede ser debido a la recuperación de las masas en las determinaciones de laboratorio u otros errores, por lo que se requiere el análisis de más bases de datos con dispersión completa del suelo, ya que el grado de dispersión incide en los patrones del modelo COLPOS y las razones entre las fracciones físicas del COS.

Para el caso donde la textura es igual o cercana, para distintos usos del suelo o prácticas de manejo,

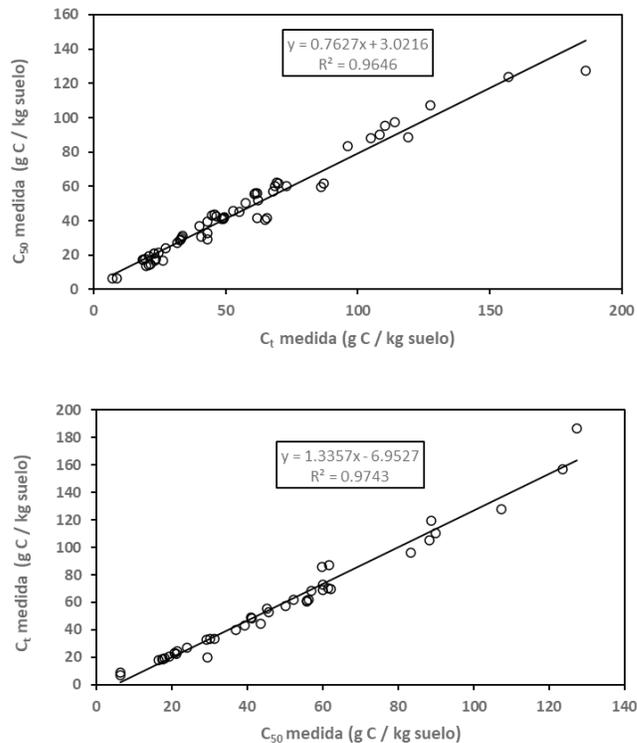


Figura 12. Relaciones  $C_t - C_{50}$  y  $C_{50} - C_t$  para los suelos mexicanos analizados.

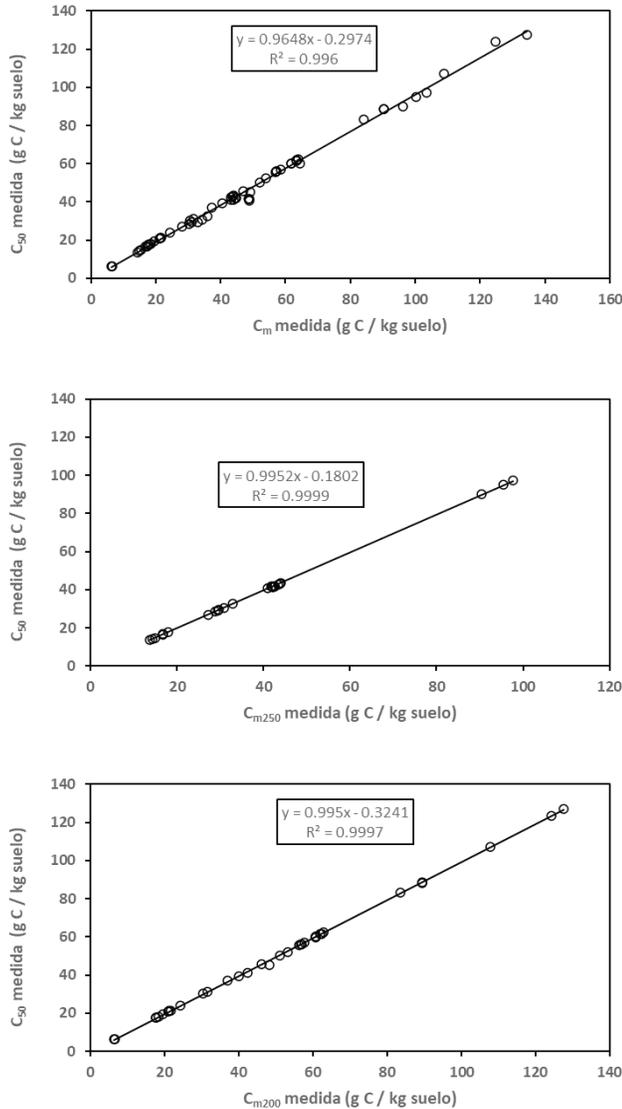
Figure 12.  $C_t - C_{50}$  and  $C_{50} - C_t$  relationships for the Mexican soils analyzed.

el modelo COLPOS para  $1/T_f$  y  $1/M_f$  muestran patrones (pendientes) similares, por lo que puede ser usado para analizar los patrones dinámicos de cambios asociados a perturbaciones, dejando fijo el efecto de la textura del suelo.

El caso del uso del enriquecimiento de las fracciones ( $E_p$ ) es similar al caso de  $1/T_f$  y fracciones de C divididas entre  $C_t$  o  $C_m$ , pero resulta en patrones más fáciles de interpretar (un solo parámetro).

Las relaciones de la Figura 11 difieren en algo de las generales definidas en Paz *et al.* (2016) y Matus (2021), por lo que el concepto de universalidad debe ser revisado para considerar además de la textura al almacén de  $C_p$ .

En lo general, las relaciones de las diferentes fracciones de solo la parte organomineral para estimar  $C_{50}$  muestran poca dispersión y son estables, por lo que es necesario replantear el modelo COLPOS, y otras aproximaciones, al eliminar la parte del carbono orgánico particulado y realizar análisis por tipo de cinética del modelo.

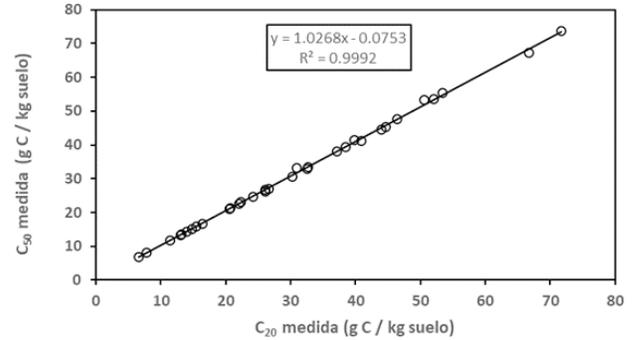


**Figura 13. Relaciones entre  $C_m - C_{50}$ ,  $C_{m250} - C_{50}$  y  $C_{m200} - C_{50}$  para los suelos mexicanos analizados.**

**Figure 13. Relationships between  $C_m - C_{50}$ ,  $C_{m250} - C_{50}$  and  $C_{m200} - C_{50}$  for the Mexican soils analyzed.**

## CONCLUSIONES

El análisis de los patrones del modelo COLPOS para  $1/T_f$  y  $1/M_f$  para los suelos mexicanos analizados mostró resultados buenos ( $R^2 > 0.99$ ), aunque en un par de casos analizados de fraccionamientos publicados en la literatura los patrones no fueron como los esperados, por lo que se requiere de un análisis usando bases de datos con dispersiones totales de los suelos, además de recuperación de masas completas o cercanas a este objetivo.



**Figura 14. Relación entre  $C_{20}$  y  $C_{50}$  para los datos analizados en Six *et al.* (2002) y revisados en Paz *et al.* (2016).**

**Figure 14. Relationship between  $C_{20}$  and  $C_{50}$  for data analyzed in Six *et al.* (2002) and reviewed in Paz *et al.* (2016).**

Del análisis de las razones entre el C de las fracciones físicas del suelo se puede concluir que la dispersión encontrada entre  $C_{50}$  y  $C_t$  es producto, dejando fija la textura, de dos cinéticas diferentes, por lo que es necesario considerar al carbono orgánico particulado en estos análisis.

Para una cinética dada (organomineral), las razones entre las fracciones muestran poca dispersión, a excepción de las fracciones alrededor de  $2 \mu\text{m}$  (arcillas); aunque no está claro si esto es debido a dispersión incompletas del suelo, por lo que requiere de su revisión.

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

## LITERATURA CITADA

- Anderson, D. W., Saggari, S., Bettany, J. R., & Stewart, J. W. B. (1981). Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. *Soil Science Society of America Journal*, 45(4), 767-772. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500040018x>
- Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C. I., Matus-Baeza, F., Prat, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2011) Fraccionamiento y acumulación de carbono orgánico en tres suelos volcánicos degradados de México. En J. F. Gallardo-Lancho (Coord.). *Materia orgánica edáfica y captura de carbono en sistemas iberoamericanos* (pp. 61-79). Salamanca, España: Red POCAIBA, SiFyQA.
- Baldock, J. A., & Skjemstad, J. O. (2000). Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31(7-8), 697-710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Balesdent, J., Besnard, E., Arrouays, D., & Chenu, C. (1998). The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and Soil*, 201(1), 49-57. <https://doi.org/10.1023/A:1004337314970>
- Balesdent, J., J. P. Pétraud, J. P., & Feller, C. (1991). Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique et matières organiques des sols. *Science du Sol*, 29(2), 95-106.
- Buyanosky, G. A., Aslam, M., & Wagner, G. H. (1994). Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society of American Journal*, 58(4), 1167-1173. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x>
- Carter, M. R., Angers, D. A., Gregorich, E. G., & Bolinder, M. A. (2003). Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, 83(1), 11-23. <https://doi.org/10.4141/S01-087>
- Chenu, C., & Plante, A. F. (2006). Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex'. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 596-607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00834.x>
- Christensen, B. T. (1985). Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity-sedimentation. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 35(2), 175-187. <https://doi.org/10.1080/00015128509435773>
- Christensen, B. T. (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In B. A. Stewart (Eds.). *Advances in Soil Science*, vol. 20 (pp. 1-90). New York, NY, USA: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1)
- 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>
- Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (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* (pp. 237-246). Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17)
- Covaleda, S., Pajares, S., Gallardo, J. F., & Etchevers, J. D. (2006). Short-term changes in C and N distribution in soil particle size fractions induced by agricultural practices in a cultivated volcanic soil from Mexico. *Organic Geochemistry*, 37(12), 1943-1948. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.09.001>
- Covaleda, S., Gallardo, J. F., García-Oliva, F., Kirchmann, H., Prat, C., Bravo, M., & Etchevers, J. D. (2011). Land use effects on the distribution of soil organic carbon within particle size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil Use and Management*, 27(2), 186-194. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00341.x>
- Freitas, P. L., Blancaneaux, P., Gavinelli, E., Larré-Larrouy, M. C., & Feller, C. (2000). Nível e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 157-170.
- Dungait, J. A. J., Hopkins, D. W., Gregory, A. S., & Whitmore, A. P. (2012) Soil organic turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 18(6), 1781-1796. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>
- Elliot, E. T., Paustian, K., & Frey, S. D. (1996). Modeling the measurable or measuring the modelable: a hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations. In D. S. Powlson, P. Smith, & J. U. Smith (Eds.). *Evaluation of soil organic matter models* (pp. 161-179). Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_12)
- Elustondo, J., Angers, D. A., Laverdier, M. R., & N'Dayegamiye, A. (1990). Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Canadian Journal of Soil Science*, 70(3), 395-402. <https://doi.org/10.4141/cjss90-039>
- Gavinelli, E., Feller, C., Larré-Larrouy, M. C., Bacye, B., Djegui, N., & Nzila, J. D. (1995). A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26(11-12), 1749-1760. <https://doi.org/10.1080/00103629509369406>
- Hansen, S., Jensen, H. E., Nielsen, N. E., & Svendsen, H. (1991). Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in Winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer Research*, 27(2), 245-259. <https://doi.org/10.1007/BF01051131>
- Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191(1), 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- Hidalgo, C., Paz, F., & Etchevers, J. (2012). Efecto de las energías de dispersión en la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas del suelo. En F. Paz, M. Bazan, R. M. Cuevas, & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012* (pp. 66-72). Texcoco, Estado de México, México: PMC-SMCS.

- Jenkinson, D. S. (1990). The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 329(1255), 361-368. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0177>
- 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>
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2019). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261-273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Matus, F. (2021). Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulation in soils: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 11, 6438. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>
- Matus, F., Hidalgo, C., Monreal, C., Estrada, I., Fuentes, M., & Etchevers, J. (2011). Land use impacts on physical-based soil organic matter fractions on three hillside ferrasols in Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(2), 283-292.
- Matus, F., Garrido, E., Hidalgo, C., Paz, F., Etchevers, J., Merino, C., & Báez, A. (2016). Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 311-319.
- North, P. F. (1976). Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. *European Journal of Soil Science*, 27(4), 451-459. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1976.tb02014.x>
- Oorts, K., Vanlauwe, B., Recous, S., & Merckx, R. (2005). Redistribution of particulate organic matter during ultrasonic dispersion of highly weathered soils. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 77-91. <https://doi.org/10.1111/j.1351-0754.2004.00654.x>
- Paz, F., Hidalgo, C., & Etchevers, J. (2012). Análisis y modelación de las energías de dispersión en la distribución del carbono orgánico en los suelos por fracciones físicas. En F. Paz, & R. Cuevas (Eds.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011* (pp. 240-247). Serie síntesis nacionales. Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN 978-607-715-085-5
- Paz, F., & Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Paz, 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, 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.
- 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.
- Roscoe, R., Buurman, P., & Velthorst, E. J. (2000). Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and  $\delta^{13}\text{C}$  distribution in particle-size fractions. *European Journal of Soil Science*, 51(3), 445-454. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00321.x>
- 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(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Skjemstad, J. O., Spouncer, L. R., Cowie, B., & Swift, S. (2004). Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Australian Journal of Soil Research*, 42(1), 79-88.
- Verberne, E. L. J., Hassink, J., de Willigen, P., Groot, J. J. R., & Van Veen, J. A. (1990). Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 38(3A), 221-238. <https://doi.org/10.18174/njas.v38i3A.16585>
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, W. W. I., Smith, P., & Fuhrer, J. (2007). Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Sciences*, 58(3), 658-667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x>