

Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México

Carbon dynamics in soil aggregates with different types of land uses in Monte Tláloc, State of Mexico

Edgar Barrales-Brito¹, Fernando Paz-Pellat^{2,†}, Jorge Dionisio Etchevers-Barra³,
Claudia Hidalgo-Moreno³ y Alma Velázquez-Rodríguez⁴

¹ Doctorado en Edafología. ² GRENASER. ³ Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental. Colegio de Postgraduados. Campus, Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

⁴ Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo. 50200 Piedras Blancas, Toluca de Lerdo, México.

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

RESUMEN

Los cambios de uso de suelo influyen en la dinámica del carbono en ecosistemas porque modifican la estructura del suelo e incrementan las tasas de mineralización de la materia orgánica. En este trabajo se evaluó el efecto que tiene el uso de suelo, la profundidad y el tamaño de agregados en los contenidos de carbono (C) y respiración del suelo (CO₂) emitido por la mineralización del C, en suelos con diferentes usos de suelo (forestal, acahual, pastizal y agrícola) en el monte Tláloc. El C del suelo fue mayor en ecosistemas forestales (más de 100 g C kg⁻¹ de suelo) con respecto a suelos con uso agrícola, acahual y pastizal con 20, 30 y 50 g C kg⁻¹ de suelo, respectivamente. En los sitios con uso de suelo forestal los valores de diámetro medio ponderado fueron mayores a 1.5 mm y los macroagregados mayores a 2 mm, lo que indicó una mejor estructura del suelo en los primeros 30 cm de profundidad, con respecto al sitio con uso de suelo agrícola en el que predominaron los microagregados (< 0.5 mm), más del 50%, en estos se encontró una menor cantidad de C (menor de 10 g C kg⁻¹ de suelo) y una mayor cantidad de CO₂ emitido por la respiración (mayor a 40 g CO₂ kg⁻¹ de suelo). La estabilidad de la estructura del suelo se relacionó con la dinámica del C, a una mejor estructuración se tiene un mayor contenido de C en el suelo y las emisiones de CO₂ del suelo disminuyeron.

Palabras clave: estabilidad, estructura del suelo, profundidad, respiración del suelo.

SUMMARY

Changes in land use influence the carbon dynamics in ecosystems given these modify the soil structure and increase the mineralization rates of organic matter. In this study, we evaluated the effect of soil use, depth and size of aggregates on carbon (C) and soil respiration (CO₂) content emitted by the mineralization of C in soils with different land uses (forestry, acahual, grassland and agricultural) in Mount Tláloc. Soil C was higher in forest ecosystems (over 100 g C kg⁻¹ of soil) than in soils with agricultural, acahual and grassland use with 20, 30 and 50 g C kg⁻¹ of soil, respectively. In sites with forest land use, mean weighted diameter values were larger than 1.5 mm and a greater percentage of macroaggregates (>2 mm; >25%) was found, which indicated a better soil structure in the first 30 cm depth with respect to the site with agricultural use, where microaggregates were predominant (< 0.5 mm) with percentages higher than 50%, and a lower amount of C (less than 10 g C kg⁻¹ of soil) was detected, as well as a higher amount of CO₂ emitted by respiration (greater than 40 g CO₂ kg⁻¹ of soil). The soil structure stability influenced the dynamics of C, given that a better soil structure presented a higher content of C and a decrease of CO₂ emissions of the soil.

Cita recomendada:

Barrales-Brito, E., F. Paz-Pellat, J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno y A. Velázquez-Rodríguez. 2020. Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 38: 275-288.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.680>

Recibido: 12 de noviembre de 2019.

Aceptado: 12 de enero de 2020.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 275-288.

Index words: stability, soil structure, depth, soil respiration.

INTRODUCCIÓN

Los cambios de uso de suelo afectan los contenidos de carbono (C) y la emisión de CO₂, la estructura del suelo y su estabilidad; cambios en la cobertura vegetal y el manejo del suelo, influyen en las entradas de materia orgánica al suelo (MOS) e incrementan su mineralización (Liu *et al.* 2018). Lal (2004) menciona que el cambio de uso de suelo de zonas forestales a parcelas agrícolas, repercute en la disminución entre un 40-75% de C del suelo, por lo que evaluar los cambios de uso de suelo en un tiempo determinado ayuda a predecir los cambios en los reservorios de carbono.

La dinámica del C del suelo cambia con el tipo de uso del mismo, ya que afecta la estructura y grado de estabilidad del suelo y la captura de C (Liu *et al.*, 2018). En usos de suelo donde la cantidad de MO que entra es constante, el suelo tiene una mejor estructura y mayores contenidos de C. Ćirić *et al.* (2013) evaluaron los cambios de la estabilidad de agregados en sistemas de bosque, pastizal y agrícola, encontraron que en los sistemas de bosque y pastizales tienen mejor estabilidad de agregados en comparación con las tierras de cultivo, lo mismo encontraron Yamashita *et al.* (2006) en suelos agrícolas en los que hay una menor agregación del suelo y la capacidad de retención de C se reduce 50% en comparación con suelos forestales y de pastizal.

La profundidad de la toma de muestras de suelo y el tamaño de agregados son factores que también impactan en la dinámica del C en el suelo. La respiración del suelo disminuye con la profundidad (Fang y Moncrieff, 2005) por efecto de una reducción de las tasas de mineralización y la biomasa microbiana (Rey *et al.*, 2008; Schrumpf *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2015). El tamaño de agregados afecta la cantidad de CO₂ emitido por el suelo por la mineralización de la materia orgánica. Reeves *et al.* (2019) analizaron las emisiones de CO₂ en agregados de diferentes tamaños y encontraron que agregados de mayor tamaño (> 4 mm) emiten menor CO₂ en comparación con agregados de menor tamaño (< 2 mm); aunque otros estudios muestran patrones contrarios (Gupta y Germida, 1988).

La estructura del suelo influye en la captura de C y en propiedades como la aireación, la capacidad de

retención de humedad y la actividad biológica del suelo (Zeng *et al.*, 2018). La formación de agregados está en función de la textura, la mineralización y el contenido de materia orgánica (Christensen, 2001). Tisdall y Oades (1982) mencionan que la materia orgánica es el principal agente de agregación del suelo, por ende la estructura del suelo dependerá de ello, sin embargo, solo una parte de la MOS es responsable de la estabilidad de los agregados, además de que existe un límite en el contenido de carbono por encima del cual no existirá una mayor estabilidad del suelo.

La naturaleza, el tamaño y fuerza de los agregados, dependerá de los agentes de formación, los cuales pueden ser temporales, transitorios y persistentes (Tisdall y Oades, 1982). Los tamaños de agregados mayores (> 2 mm) son más susceptibles a las pérdidas de C y en su estabilidad debido a que estos se forman con la presencia de materia orgánica lábil, en comparación con la fracción fina de limo y arcillas que presenta una mayor protección del C del suelo.

La estabilidad de agregados del suelo se mide con métodos en húmedo y en seco, muchos estudios han utilizado el método en húmedo (Yoder, 1936; Le Bissonnais, 1996), sin embargo, son pocos los estudios que han evaluado la estabilidad en seco (Kemper, 1965; Kemper y Resenau, 1986). El análisis de la estabilidad del suelo en seco es utilizado para medir la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica (Ćirić *et al.*, 2012), entre otros factores. El uso del método de estabilidad en seco fue utilizado en este trabajo para evitar introducir factores que pueden alterar la química de los procesos de desagregación (p. ej. pH). Para analizar la estabilidad del suelo, se han desarrollado indicadores para poder medirla. De acuerdo con Lawson (1987), el diámetro medio ponderado (DMP), que es la suma del diámetro medio de un conjunto de clases de tamaño de agregados, plantea que los valores altos indican una alta permeabilidad al agua y aireación del suelo y una menor capacidad de erosión del suelo. El diámetro geométrico medio (DGM) es un indicador del tamaño de los agregados y sirve para evaluar la fracción del suelo que es más fácilmente erosionable por la erosión eólica.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el estado de agregación de suelos con diferentes usos en el monte Tláloc, así como medir los cambios en los contenidos de C y emisión de CO₂ en relación con la profundidad del suelo y el tamaño de los agregados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localizó en el monte Tláloc, ubicado en las cercanías del municipio de Texcoco, el cual cuenta con vegetación forestal de bosque de *Abies*, *Quercus* y *Pinus* con sitios de monitoreo continuo para la medición de C en los cinco principales reservorios de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, material leñoso muerto sobre superficie, mantillo y suelo (Bolaños *et al.*, 2017). Adicionalmente existen otros sitios con uso de suelos agrícola, pastizal, vegetación secundaria (acahual) y bosque perturbado con incendio de hace 15 años.

El clima en la zona de estudio es semifrío subhúmedo en las partes altas, donde se localizan los bosques de *Abies*, *Cupressus* y *Quercus*, pastizal y acahual y templado subhúmedo en las zonas bajas con uso agrícola con prácticas tradicionales (INEGI, 2015).

Se seleccionaron siete sitios con diferentes usos de suelo en el monte Tláloc: bosque de *Abies* (BR-1), bosque de *Cupressus* (BR-2), bosque de *Quercus* (BQr), bosque de *Abies* con incendio forestal (BAq),

vegetación secundaria de Acahual (Ac), pastizal (Pz) y agrícola con labranza tradicional (Ag) (Figura 1 y Cuadro 1).

En cada sitio se hizo un perfil de suelo a 1 m de profundidad, con excepción del BQr y Ag donde el límite del perfil se alcanzó a los 50 y 70 cm de profundidad, respectivamente. Se midió la densidad aparente (DAP) con el método del cilindro, cada 10 cm hasta 1 m de profundidad y se tomaron muestras de suelos por cada horizonte. En laboratorio se determinó el pH con un potenciómetro (Conductronic pH20), la textura con el método de la pipeta (Burt, 2004) y la concentración de C con un analizador de carbono TOC (Shimadzu A5050), en el laboratorio de fertilidad de suelos y química ambiental del Colegio de Postgraduados.

Estabilidad de Agregados

Se determinaron las proporciones de los diferentes tamaños de agregados por el método de tamizado en seco, con un agitador mecánico. Se colocó 1 kg de suelo seco en un juego de tamices de malla 3, 4, 6, 10, 18,

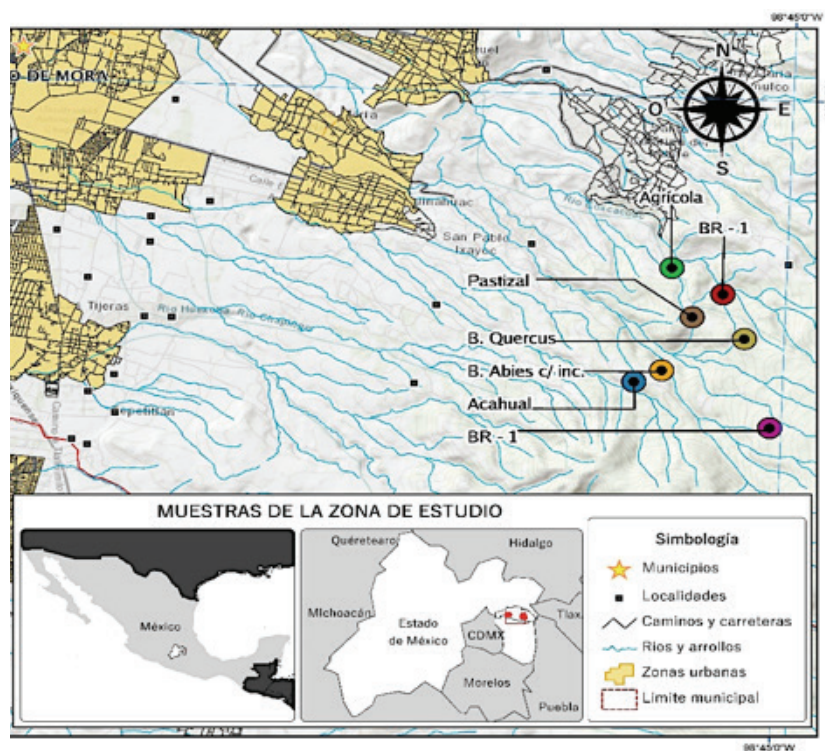


Figura 1. Localización de los sitios con diferente uso de suelo en el monte Tláloc.
Figure 1. Location of sites with different land use on Mount Tláloc.

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de estudio con diferentes usos de suelo.
Table 1. Location of study sites with different land uses.

Sitio	Uso de Suelo	Latitud N	Longitud O	Altitud
				m
1	BR-1 (Abies)	19° 27' 05.3"	98° 45' 06.6"	2931
2	BR-2 (Cupressus)	19° 27' 45.5"	98° 45' 30.9"	3365
3	BQr. (Quercus)	19° 26' 56.9"	98° 46' 17.0"	3192
4	BAq (Abies con incendio)	19° 27' 05.1"	98° 27' 05.1"	2968
5	Ac (Acahual)	19° 26' 47.1"	98° 46' 35.2"	2962
6	Pz (Pastizal)	19° 27' 47.6"	98° 45' 42.2"	3042
7	Ag (Agrícola)	19° 28' 08.8"	98° 46' 10.3"	2857

35, 60, los cuales corresponden a tamaño de agregados de macroagregados grandes (6.36, 4.76 y 3.36 mm), mesoagregados (2 y 1 mm) y microagregados (0.50, 0.25 y < 0.25 mm). Posteriormente se colocaron en el agitador mecánico (Gilson / Modelo: SS-15F) y se agitaron a 210 ciclos min⁻¹ durante 5 minutos. Se pesó la cantidad de suelo en cada tamiz después de la agitación y se determinó el porcentaje en cada tamaño de agregado.

Para analizar los cambios en la estabilidad estructural del suelo con la profundidad, se calculó el diámetro medio ponderado (DMP) con la Ecuación 1.

$$DMP = \sum_{i=1}^n di * wi \quad (1)$$

donde: DMP es el diámetro medio ponderado (mm) de suelo seco tamizado, d el diámetro medio de cada fracción de diferente tamaño i (mm), w es la proporción del peso total de la muestra que se encuentra en la fracción de tamaño i , y n el número de fracciones.

También se calculó el diámetro geométrico medio (DMG) de acuerdo a Kumari *et al.* (2011), con la Ecuación 2.

$$DMG = Exp \left[\frac{\sum (\omega i * \log(\bar{x}))}{\sum \omega i} \right] \quad (2)$$

dónde: \bar{x} es el diámetro medio de cada fracción y ωi es el peso del suelo retenido en cada tamiz.

Medición del Contenido de C Total y Medición de Respiración (CO₂)

De las muestras de agregados del suelo de cada tamaño se tomaron 5 g y se molieron y tamizaron a malla 100 para homogeneizar la muestra. Posteriormente se midió el porcentaje de C total en un analizador automático de carbono TOC (Shimadzu A5050).

Para la medición de CO₂ de cada tamaño de agregados se utilizó la metodología de Barrales *et al.* (2014) con un respirómetro manométrico (OxiTop OC 110). Se tomaron los tamaños de agregados de 6.36, 1 y < 0.25 mm. Se pesaron 30 g de cada tamaño de agregado y se humedecieron a 25% de humedad, en relación al peso seco de la muestra, y se colocaron dentro de botellas de vidrio de 500 mL cerradas con un cabezal, el cual tiene un sensor que registra la pérdida de presión dentro de la botella, y se colocaron en una incubadora para controlar la temperatura a 25 °C durante 10 días, usando muestras por triplicado.

El equipo OxiTop, reporta datos de la disminución de presión dentro de cada frasco. Para el cálculo de consumo de O₂ que se consumió en 10 días, por la actividad microbiana presente en cada fracción de agregados, se utilizó la ecuación general de los gases (Ecuación 3), que considera el peso molecular de O₂ (PMO_2), la constante universal de los gases (R), la temperatura de incubación (T), la pérdida de presión registrada por el sensor (Δp) y los valores de peso de la muestra (mBt) y el volumen libre de muestra (Vfr). La Ecuación 3 fue usada para el cálculo del consumo de oxígeno a partir de la pérdida de presión dentro del frasco de medición:

$$R = \frac{PMO_2}{R * T} * \frac{Vfr}{mBt} * |\Delta p| \quad (3)$$

El cálculo de la cantidad de CO₂ (Ecuación 4) que se emitió por la muestra de suelo, se hace por estequiometría química, usando los pesos equivalentes de O₂ y CO₂ y la cantidad de O₂ calculada con la ecuación general de los gases:

$$mg \text{ CO}_2 = \left[\frac{O_2 (mg)}{PE(O_2)(eq \text{ g})} \right] / PE(CO_2)(eq \text{ g}) \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades químicas y físicas de los suelos con diferente uso de suelo y con diferentes profundidades de los horizontes de cada perfil se muestran en el Cuadro 2. La textura en todos los sitios se clasificó como textura franca, donde predominan las partículas de limo y arena; con excepción del sitio BR-1, donde en los primeros 20 cm predomina la fracción de arcilla, la cual fue cercana al 50%. Con la profundidad del suelo se observó que los valores de DAP se incrementaron en todos los sitios (Cuadro 2).

Distribución de Agregados

La distribución de agregados por horizontes de los perfiles de suelo de los sitios se presenta en la Figura 2. En los bosques, existió una mayor presencia de macroagregados grandes de 6.36 a 4.76 mm con porcentajes mayores a 10 y macroagregados pequeños de tamaño de 3.36, 2 y 1 mm entre 15 y 20%, y los microagregados más pequeños de 0.5, 0.25 y < 0.25 mm presentaron porcentajes entre 30 y 60. Con la profundidad el porcentaje de microagregados se incrementó (Figura 2).

En el sitio de pastizal, la distribución de agregados es similar en todos los horizontes, la fracción < 0.25 mm fue menor (20-40%) que en los otros sitios estudiados y con mayores porcentajes de macroagregados de mayor tamaño, los cuales resultaron ser más homogéneos, con porcentajes entre 10 y 20%; y, estos porcentajes se mantuvieron con la profundidad.

En el sitio de Ac y Ag, los porcentajes de macroagregados del suelo fueron menores al 5%, lo que se vio reflejado en un incremento de los microagregados

del suelo (< 0.25 mm) mayor al 60%. En estos sitios se presentaron los mayores porcentajes de microagregados del suelo y esto se mantuvo con la profundidad (Figura 2).

Indicadores de Estabilidad de Agregados del Suelo

Los datos de DMP y DGM de los sitios se presentan en la Figura 3, En los sitios de uso de suelo forestal los valores más altos de DMP y DGM se encontraron en los primeros 30 cm del perfil y disminuyen con la profundidad (Figura 3). En los sitios de Pz y Ac, en los primeros 50 cm el valor de estos índices disminuyeron por acción de la reducción de la cantidad de C; sin embargo, a profundidades mayores a 70 cm, los valores se vuelven a incrementar; dicha tendencia coincide con la de la DAP que se incrementa a mayor profundidad. El contenido de arcillas en estas profundidades también fue mayor, lo que influyó en la formación de agregados mayores de 2 mm, lo cual hizo que la distribución de agregados en estas profundidades fuera homogénea y los valores de DMP y DMG se incrementaron.

A medida que se incrementan los valores de DMP y DGM, el grado de estructura del suelo es mayor (Le Bissonnais, 1996; Kumari *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2013). El grado de estructura de los sitios de Pz, BR-1 y BR-2 se clasificaron como muy estables en los primeros 10 cm de profundidad, esto debido a la cantidad de materia orgánica incorporada al suelo. Los sitios de BQr, BAq y Ac, se clasificaron como estables en los primeros 10 cm de profundidad y suelos medianamente estables a mayor profundidad. El sitio Ag con labranza tradicional, presentó un grado de estructuración medianamente estable en los primeros 10 cm, e inestable a mayor profundidad. (Figura 3).

Contenido de Carbono

En la Figura 4 se presentan los cambios en los contenidos de C en la profundidad de 0-10 cm. En los sitios forestales se encontraron los mayores reservorios de C, en el caso de bosque de referencia de Abies (BR-1) y el mismo bosque con incendio forestal (BAq), se observó un incremento del contenido de C de un 40% con respecto al bosque de referencia (Figura 4).

En los sitios de Pz y Ac, la pérdida de C en el suelo en los primeros 10 cm, con respecto a los bosques fue de 50 y 68%, respectivamente, con el cambio de uso

Cuadro 2. Valores de pH, densidad aparente y contenido de partículas elementales del suelo por uso de suelo a diferentes profundidades.
Table 2. Values of pH, bulk density and content of elementary soil particles by soil use at different depths.

Sitio	Horizonte	Profundidad	pH	DAP	Arenas	Limos	Arcillas
		cm		g cm ³	- - - - - % - - - - -		
BR-1	1	10	6.56	0.84	28.38	23.14	48.47
	2	20	6.58	0.87	29.00	22.94	48.05
	3	50	6.77	1.10	46.11	41.75	12.14
	4	90	7.27	1.26	41.25	39.72	19.03
BR-2	1	10	7.58	0.74	14.15	67.30	18.55
	2	30	6.11	0.99	46.42	47.91	5.67
	3	60	6.08	1.01	33.16	47.22	19.62
	4	90	6.18	1.16	47.34	36.81	15.85
BQr	1	15	7.23	0.71	53.21	21.62	25.17
	2	30	6.27	0.85	35.48	54.00	10.52
	3	40	6.22	0.85	39.49	50.24	10.26
	4	50	6.40	0.89	45.46	44.57	9.96
Baq	1	15	7.60	0.70	56.98	15.53	27.48
	2	25	7.57	0.73	64.68	14.01	21.31
	3	65	7.54	0.78	45.26	12.64	42.10
	4	95	7.48	0.81	41.64	4.72	53.63
Pz	1	15	6.17	0.69	39.58	47.96	12.46
	2	35	6.09	0.83	43.32	44.71	11.98
	3	55	6.79	0.91	48.23	33.45	18.31
	4	90	7.29	1.04	40.96	33.76	25.28
Ac	1	15	6.41	0.82	52.43	29.60	17.96
	2	35	6.29	0.88	33.38	48.86	17.77
	3	55	6.06	0.98	43.12	39.07	17.81
	4	75	6.73	1.09	43.56	44.53	11.91
	5	95	6.82	1.14	33.51	39.39	27.10
Ag	1	15	6.64	0.98	33.03	49.02	17.96
	2	45	7.10	1.00	30.63	50.08	19.29
	3	65	7.36	1.08	32.23	48.18	19.59

de suelo. En el caso más extremo, el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola, se registró una pérdida del 80% de carbono en los primeros 10 cm de profundidad (Figura 4).

La distribución de C en agregados del suelo y su variación con la profundidad, en suelos forestales, se muestra en la Figura 5, donde en los sitios BR-1 y BR-2 se observó que en los primeros 30 cm, el mayor contenido de carbono se localizó en agregados menores de 2 mm y la menor concentración en agregados de 4 y 6 mm. Con la profundidad del suelo, la cantidad de C

disminuyó, en todos los tamaños de agregados, el valor más bajo se localizó en la profundidad de 100 cm en donde el mayor valor de C fue menor de 4 g C kg⁻¹ de suelo. En el sitio BQr se tiene una mayor distribución de C en los distintos tamaños de agregados.

Los sitios de BQr y BAq, presentaron un mayor contenido de C, ya que en los microagregados de 0.25 y < 0.25 los contenidos de C fueron mayores de 30 g C kg⁻¹ de suelo; los mayores contenidos de C en estos bosques se deben a que en el bosque de *Quercus* hay una mayor entrada de materia orgánica por el tipo

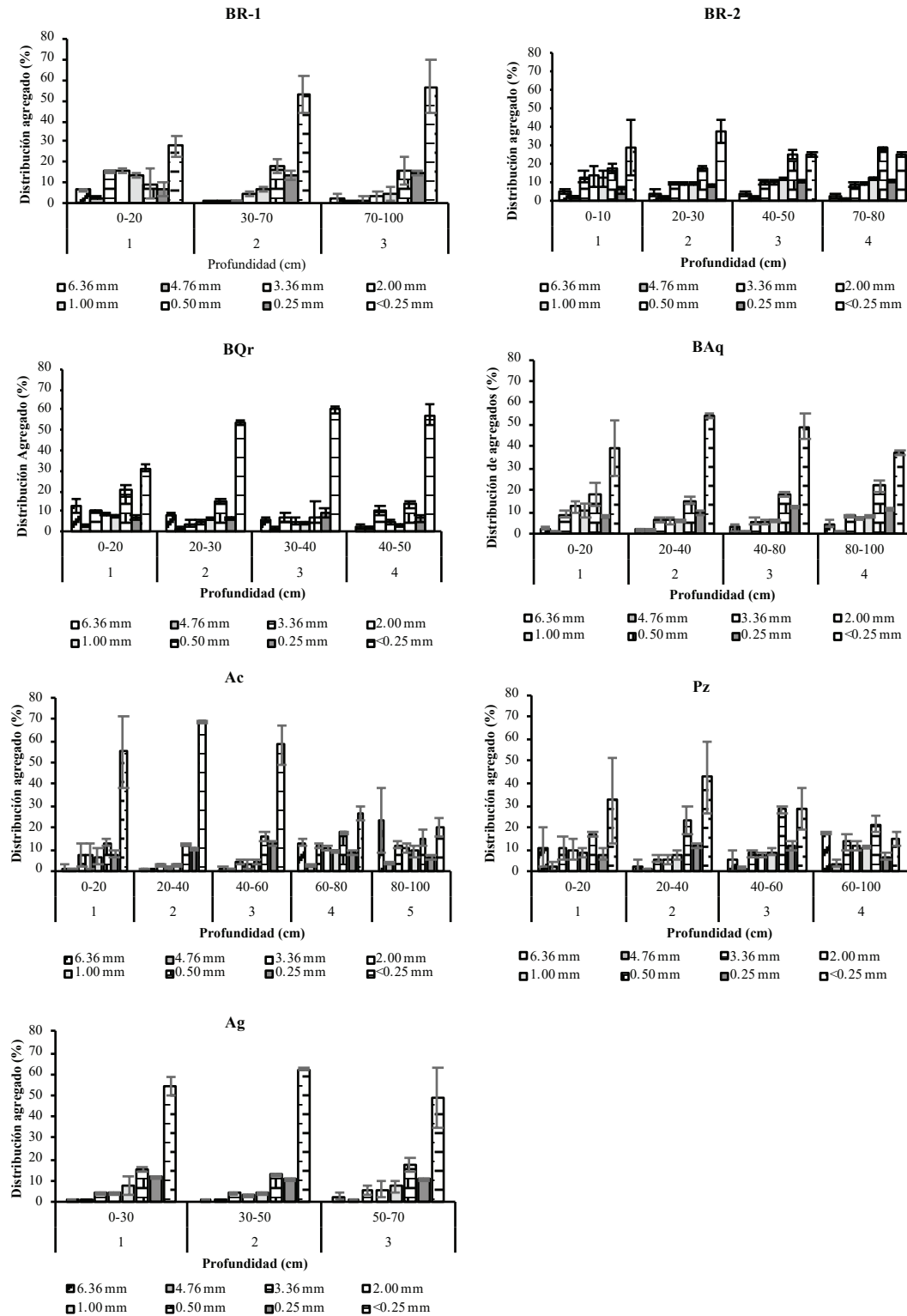


Figura 2. Distribución de agregados de cada sitio y por profundidad del suelo. Las barras representan valores de desviación estándar.

Figure 2. Distribution of aggregates at each site and by soil depth. Bars represent standard deviation values.

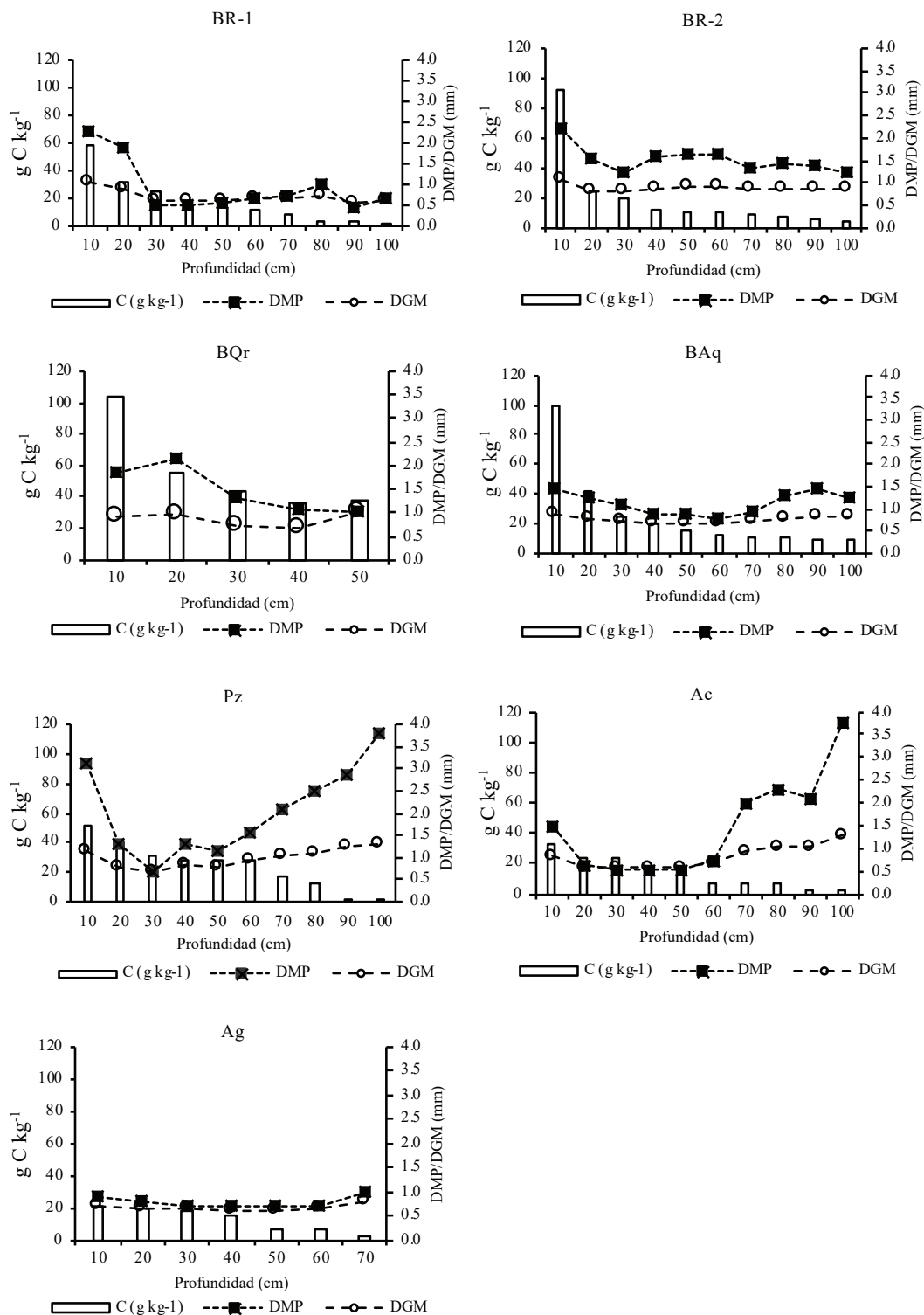


Figura 3. Distribución de C e indicadores de estabilidad (DMP y DGM) con la profundidad en suelos con diferente uso de suelo.

Figure 3. Distribution of C and stability indicators (DMP and DGM) with depth in soils with different land use.

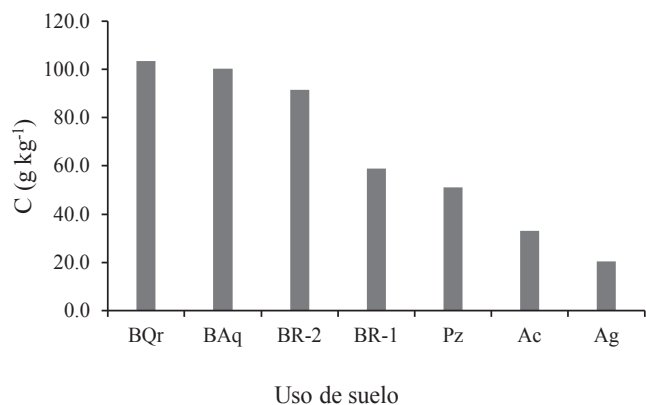


Figura 4. Contenido de C total en agregados de diferentes tamaños en la profundidad de 0-10 cm en suelos con diferente uso de suelo.

Figure 4. Total C content in aggregates of different sizes at 0-10 cm depth in soils with different soil use.

de bosque, y el efecto del incendio forestal después de un determinado tiempo.

En la Figura 6 se presenta la distribución de C con la profundidad en los sitios de Pz, Ac y Ag. En el sitio de Pz, en los tamaños de agregados de 6, 4, 3, 2 y 1 mm hubo mayor presencia de estos agregados, hasta los 30 cm de profundidad, posterior a esta, disminuyó, posiblemente porque existe un mayor número de raíces en el perfil. En los microagregados (0.50, 0.25 y <0.25 mm) existió una mayor diferencia en los contenidos de C, hasta la profundidad de 60 cm; a mayor profundidad del suelo el contenido de C disminuyó.

La distribución de agregados de los sitios con un mayor grado de alteración (Ac y Ag) el contenido de C fue menor en comparación con los suelos forestales, implicando que los cambios de usos del suelo reducen el C original. El contenido de C en los macroagregados

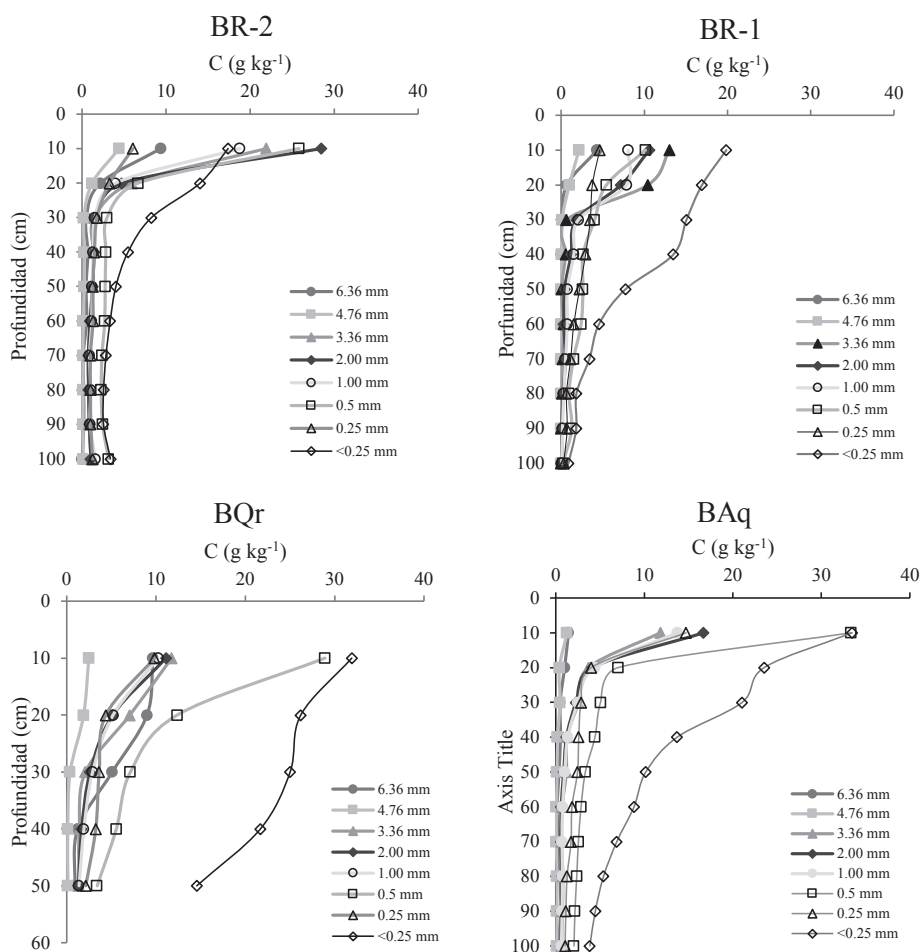


Figura 5. Distribución de C en agregados del suelo con uso forestal a diferentes profundidades de suelo.

Figure 5. Distribution of C in soil aggregates with forest use at different soil depths.

de 6 y 4 mm fue de 1 g C kg⁻¹ de suelo. El mayor contenido de C se presentó en microagregados del suelo (0.50, 0.25 y < 0.25 mm). El caso de Ag es un comportamiento típico, debido a la disminución de la MO que entra al suelo y por las labores de cultivo que no permiten la formación de agregados de mayor tamaño. El contenido de C no cambió en los primeros 30 cm de profundidad, posterior a ésta disminuyó hasta los 70 cm, que es el límite del perfil.

Respiración de Suelo (CO₂)

En la Figura 7 se muestran los valores de C y CO₂ al final de la incubación de los sitios evaluados, los valores se presentan por cada horizonte y por tamaño de agregado en que se midió la respiración. En los primeros 10 cm del perfil del suelo se encontraron los valores más altos de C y CO₂ para todos los usos del suelo analizados; en los bosques de BR-1 y BQr se

detectaron los mayores contenidos de carbono en los agregados.

En los suelos forestales, en macroagregados de 6.36 mm los valores de C variaron entre 5 y 10 g C kg⁻¹ de suelo y el C se incrementó conforme el tamaño de agregado disminuyó, los agregados de 0.5 mm presentaron valores entre 10 y 30 g C kg⁻¹ de suelo. En los horizontes con mayor profundidad, la respiración fue menor, por lo que los primeros 30 cm de profundidad fue la capa más activa para la dinámica de carbono en el suelo.

La cantidad de CO₂ registrada al final de la incubación fue congruente con la cantidad de C, a mayor contenido de C existe una mayor cantidad de CO₂ emitido. Con el tamaño de agregados se observó que, a mayor tamaño de los agregados, fue menor la cantidad de CO₂ emitida a causa de la descomposición de la materia orgánica. Una mayor respiración en agregados de menor tamaño se puede explicar porque

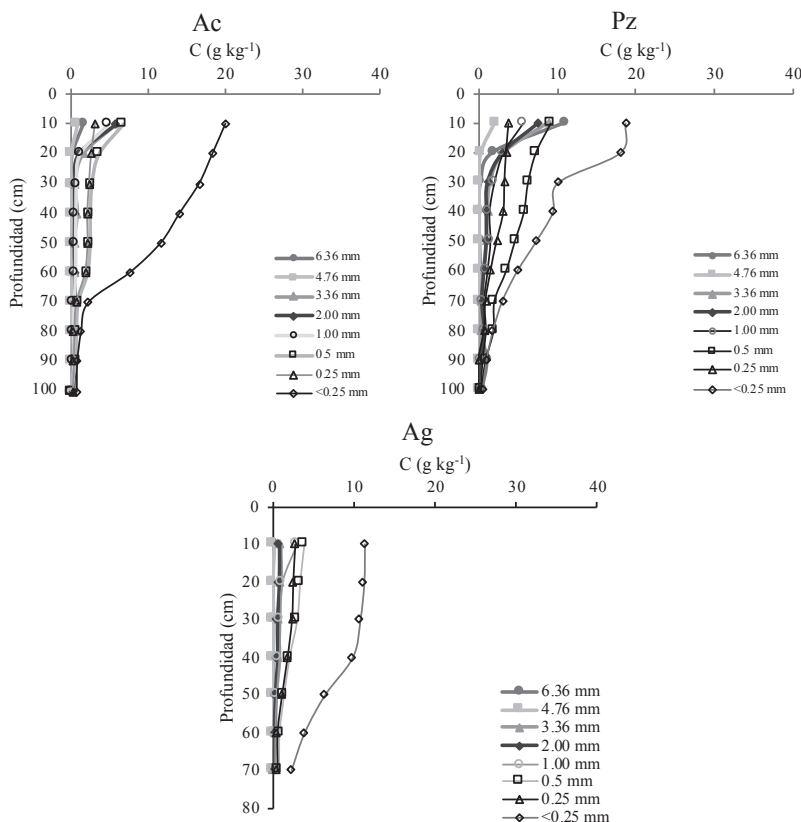


Figura 6. Distribución de C en agregados del suelo con uso agrícola, pastizal y acahual a diferentes profundidades del suelo.

Figure 6. Distribution of C in soil aggregates with agricultural, grassland and acahual use at different soil depths.

hay una mayor área específica, que mejora la aireación, la retención de humedad del suelo y la actividad microbiana que facilita la mineralización de carbono (Martínez *et al.*, 2015). Los datos indican que con

una mejor estabilidad del suelo, existe una cantidad de carbono no disponible para el ataque microbiano y reduce la cantidad de CO₂ que se emite por el proceso de mineralización.

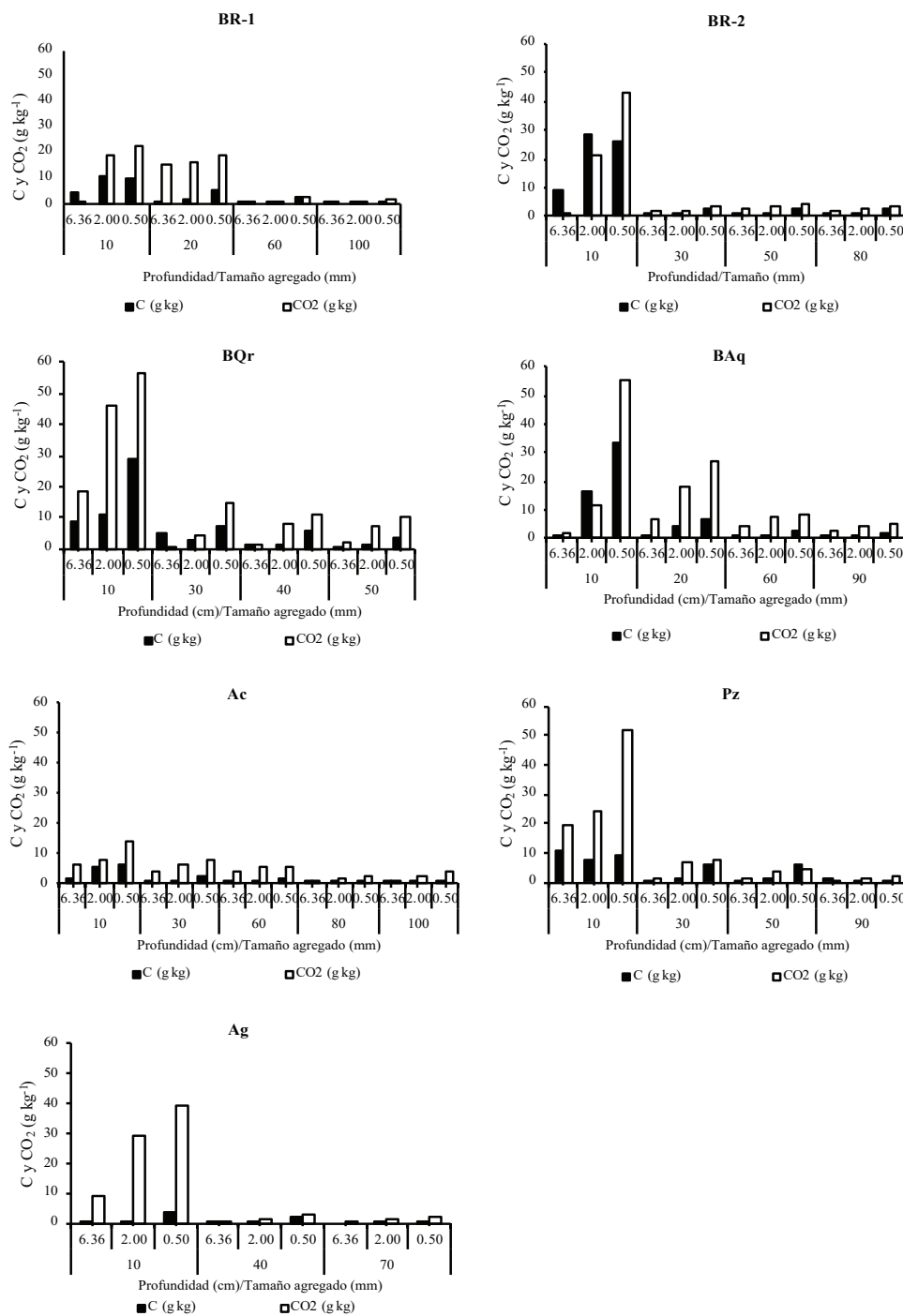


Figura 7. Contenidos de C y CO₂ (g kg⁻¹ de suelo) y valores de DMP por tamaño de agregado y sistema estudiado.

Figure 7. C and CO₂ contents (g kg⁻¹ of soil) and DMP values per aggregate size and system studied.

En los suelos con mayor perturbación (Ac, Pz y Ag), la cantidad de CO₂ registrada fue menor en comparación con los sitios forestales. En el sitio de Ac, se observó que el valor de CO₂ se incrementó con menor tamaño de agregados y los valores de DMP y DAP se incrementaron con la profundidad. lo que indica una mayor compactación y bajo contenido de C. En el sitio agrícola (Ag), los agregados de menor tamaño (< 0.25 mm) registraron valores cercanos a 40 g CO₂ kg⁻¹ de suelo, por lo que en las parcelas agrícolas hay pérdidas significativas de carbono de los suelos. Fuentes *et al.* (2012) estudiaron las diferencias en los contenidos de C en agregados con diferentes tipos de labranza, y encontraron que en la labranza tradicional existe una mayor perturbación del suelo, lo que no permite que la agregación del suelo tenga una mayor estabilidad y, por consiguiente, presentan valores más altos en la emisión de CO₂ del suelo.

Distribución de Agregados y sus Patrones

El grado de desarrollo de la estructura del suelo es condicionado por el factor biológico, de plantas, microorganismos del suelo y cantidad de materia orgánica que entra en el suelo por residuos vegetales y las raíces de las plantas (Porta *et al.*, 2003; Ortiz y Ortiz, 2010). En los sitios forestales y pastizales, en la profundidad de 0-10 cm, existe una mayor proporción de macroagregados, debido a una mayor entrada de materia orgánica por efecto de la vegetación, lo que se refleja en mayores contenidos de C, que a su vez promueve la formación de macroagregados (Voroney, 2007).

En los sitios de Ac y Pz, a mayores profundidades (> 70 cm) se observó que hay agregados de diferentes tamaños en proporciones similares, lo cual es debido posiblemente a que en estos horizontes tienen valores más altos en la densidad aparente, donde existe una mayor compactación, además de que el contenido de arcilla a mayores profundidades del suelo puede actuar como otro factor de agregación del suelo (Christensen, 2001). Una mejor distribución de agregado se puede atribuir a que en este perfil existió un mayor número de raíces a lo largo del mismo, lo que se reflejó en mayores contenidos de C a mayores profundidades en comparación con los sitios forestales, donde los contenidos de C fueron menores a profundidades mayores de 30 cm.

Algunos estudios indican que, en suelos con pastizal, las entradas de materia orgánica en capas profundas se deben al mayor número de raíces (Carvalho *et al.*, 2012). Torres *et al.* (2013) mencionan que la estructura de los sistemas radicales influyen en la estabilidad del suelo. En el sitio con agricultura tradicional, se observó que predominan los microagregados (< 0.25 mm), los cuales representan el 50%, no existen los agregados de mayor tamaño debido a la labranza y menores entradas de materia orgánica, lo cual no permite que se formen agregados de mayor tamaño y con mejor estabilidad.

El DMP resultó en un mejor índice de estabilidad de los agregados. Baldock y Kay (1987) plantean que el DMP está sesgado hacia valores de los agregados grandes (resulta en un mejor índice para esta situación) y el DGM sesgado hacia los menores. Considerando la distribución de agregados mostrada en la Figura 2 (sesgo hacia agregados grandes), el uso del DMP es mejor que DGM.

Relación entre el Contenido de C y Respiración de CO₂

La respiración del suelo en los diferentes usos fue acorde a los contenidos de C, se observó en la profundidad de 0-10 cm, la mayor dinámica de C en el suelo y ésta disminuyó con la profundidad; esto coincide con otros estudios, en donde evalúan los cambios de los contenidos de C en diferentes tipos de labranza, un menor laboreo del suelo y el incremento de los residuos vegetales de la cosecha, incrementan la estabilidad y carbono del suelo a través del tiempo (Kumari *et al.*, 2011; Fuentes *et al.*, 2012), y en diferentes usos de suelo (Keidel *et al.*, 2018; Reeves *et al.*, 2019).

La diferencia en los contenidos de C en los bosques de BR-1 y BAq, bosques con misma especie arbórea, se debe a la cantidad de residuos orgánicos que se incorporan al suelo, después de un evento de incendio, Hobley *et al.* (2017) mencionan que existe una pérdida de C después de un incendio forestal, pero existe un incremento de C con el tiempo por una elevada producción primaria de la vegetación y por mayores entradas de materia orgánica al suelo (Dai *et al.*, 2005).

En los bosques sin perturbación (BR-1 y BR-2), las cantidades de CO₂ fue menor en comparación con los bosques con incendio (mayor en la profundidad de 0-10 cm). En el bosque con incendio (BAq), la respiración de CO₂ aumentó con la profundidad, en

comparación con los otros sitios forestales; sin embargo, esto se debe a la translocación del carbono a mayores profundidades por la acción del incendio forestal. Hobbey *et al.* (2017), encontraron un incremento de los contenidos de C hasta 1 m de profundidad por el movimiento del carbón a través del perfil por la acción de la infiltración de agua a través del suelo.

En el uso de suelo de Pz, se observó que el contenido de C y CO₂ a mayor profundidad se mantuvo; se puede asumir que no existen emisiones de CO₂ en este tipo de uso de suelo. La cantidad de C presente a mayor profundidad, se debe al mayor número de raíces por parte del pastizal, lo que influye en la captura de carbono, Puget y Drinkwater (2001) mencionan que la captura del carbono por efecto de las raíces se debe a MO recalcitrante de las mismas, lo que disminuye su descomposición, además de que las raíces interactúan con los agregados del suelo, brindándole una protección física al carbono en el suelo.

Para el efecto del tamaño de los agregados del suelo con la emisión de CO₂, se observó que, a mayor tamaño de agregados, la respiración fue menor, en contraste con los agregados de menor tamaño, donde la cantidad de CO₂ se incrementó: esto se debe a los contenidos de C que hay en cada tamaño de agregados. Estos datos son acordes con Reeves *et al.* (2019) donde encontraron esta misma tendencia, en donde los agregados de mayor tamaño tienen una menor respiración de CO₂, y esto lo explican debido a que dimensiones de agregados de menor tamaño tienen una mayor disponibilidad y accesibilidad del C para su mineralización.

CONCLUSIONES

- El uso del suelo tiene un efecto positivo en la captura de carbono, donde los bosques (vegetación nativa) tienen mayores contenidos de carbono que los cambios de uso del suelo a partir de éstos. En suelos con menor perturbación, como son los forestales, donde las entradas de materia orgánica son constantes, la estructura del suelo tiene una mejor estabilidad y esta es constante con la profundidad. En sitios donde existe una mayor perturbación en el suelo, existirá una estabilidad menor de la estructura del suelo.
- El efecto de la agregación del suelo indicó que a una mejor estructuración del suelo existe una mayor captura de carbono. El tamaño de agregados influyó en la respiración del suelo, la cantidad de CO₂ en macroagregados es menor que en los microagregados

del suelo en donde hay una mayor respiración, lo que indica que una mayor presencia de macroagregados disminuirá la cantidad de CO₂ que es emitida por la descomposición.

LITERATURA CITADA

- Baldock, J. A. and B. D. Kay. 1987. Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 67: 501-511.
- Barrales-Brito, E., J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno, F. Paz-Pellat y V. Saynes-Santillán. 2014. Determinación *in vitro* de la emisión de CO₂ en muestras de mantillo. *Agrociencia* 48: 679-690.
- Bolaños, Y., M. A. Bolaños, F. Paz y J. I. Ponce. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.
- Burt, R. 2004. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Carvalho-dos Santos, D., C. L. Rodrigues-de Lima, C. Naito-Pillon, J. Ma. Filippini-Alba, C. Machado-da Rosa y M. de Oliveira-Farias. 2012. Distribución de la materia orgánica en clases de agregados en un latosol arcilloso rojo bajo forestación y pastizal. *Agrociencia* 46: 231-241.
- Christensen, B. T. 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 345-353. doi: 10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x.
- Ćirić, V., M. Manojlović, Lj. Nešić, and M. Belić. 2012. Soil dry aggregate size distribution: Effects of soil type and land use. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 689-703. doi: 10.4067/S0718-95162012005000025.
- Ćirić, V., M. Manojlović, M. Belić, L. Nešić, and S. Šeremešić. 2013. Effects of land use conversion on soil aggregate stability and organic carbon in different soils. *Agrociencia* 47: 539-552.
- Dai, X., T. W. Boutton, B. Glaser, R. J. Ansley, and W. Zech. 2005. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna. *Soil Biol. Biochem.* 37: 1879-1881. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.02.021.
- Fang, C. and J. B. Moncrieff. 2005. The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition. *Plant Soil* 268: 243-253. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0278-4>.
- Fang, X. M., F. S. Chen, S. Z. Wan, Q. P. Yan, and J. M. Shi. 2015. Topsoil and deep soil organic carbon concentration and stability vary with aggregate size and vegetation type in subtropical China. *PLoS One* 10: e0139380. doi: 10.1371/journal.pone.0139380.
- Fuentes, M., C. Hidalgo, J. Etchevers, F. De León, A. Guerrero, L. Dendooven, N. Verhulst, and B. Govaerts. 2012. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant Soil* 355: 183-197. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1092-4>.
- Gupta, V. V. S. R. and J. J. Germida. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 20: 777-786. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90082-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90082-X).

- Hobley, E. U., A. J. Le Gay Brereton, and B. Wilson. 2017. Forest burning affects quality and quantity of soil organic matter. *Sci. Total Environ.* 575: 41-49. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.231.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Temas: climatología y uso del suelo y vegetación. <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150> (Consulta: septiembre 19, 2019).
- Keidel, L., K. Lenhart, G. Moser, and C. Müller. 2018. Depth-dependent response of soil aggregates and soil organic carbon content to long-term elevated CO₂ in a temperate grassland soil. *Soil Biol. Biochem.* 123: 145-154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.005>.
- Kemper, W. D. 1965. Aggregate stability. pp. 511-519. In: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part I.* ASA, Madison, WI, USA.
- Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442. In: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph no. 9.* Madison, WI, USA.
- Kumar, R., K. S. Rawat, J. Singh, A. Singh, and A. Rai. 2013. Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. *J. Appl. Nat. Sci.* 5: 250-267. doi: <https://doi.org/10.31018/jans.v5i1.314>.
- Kumari, F. M., D. Chackraborty, M. K. Gathala, H. Pathak, B. S. Dwivedi, R. K. Tomar, R. N. Garg, R. Singh, and J. K. Ladha. 2011. Soil aggregation and associated organic carbon fractions as affected by tillage in a rice-wheat rotation in North India. *Soil Biol. Biochem.* 75: 560-567. doi:10.2136/sssaj2010.0185.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627. doi: 10.1126/science.1097396.
- Lal, R. 2013. Soil carbon management and climate change. *Carbon Manage.* 4: 439-462.
- Lawson, F. 1987. Physical aspects. *Tour. Manage.* 8: 143-146. doi: [https://doi.org/10.1016/0261-5177\(87\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0261-5177(87)90021-5).
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-431. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>.
- Liu, Y., W. Liu, L. Wu, C. Liu, L. Wang, F. Chen, and Z. Li. 2018. Soil aggregate-associated organic carbon dynamics subjected to different types of land use: Evidence from ¹³C natural abundance. *Ecol. Engin.* 122: 295-302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.018>.
- Martínez, F. S. J., F. J. Muñoz Ortega, F. J. Caniego Monreal, A. N. Kravchenko, and W. Wang. 2015. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology. *Geoderma* 237-238: 36-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003>.
- Ortiz V., B. y C. A. Ortiz Solorio. 2010. *Edafología.* Universidad autónoma Chapingo. Texcoco, México.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* Mundi-Prensa, Madrid, España. ISBN: 9788484761488.
- Puget, P. and L. E. Drinkwater. 2001. Short-term dynamics of root and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 771-779. doi: 10.2136/sssaj2001.653771x.
- Reeves, S. H., J. Somasundarama, W. J. Wanga, M. A. Heenan, D. Finna, and R. C. Dalala. 2019. Effect of soil aggregate size and long-term contrasting tillage, stubble and nitrogen management regimes on CO₂ fluxes from a Vertisol. *Geoderma* 337: 1086-1096. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.022>.
- Rey, A., E. Pegoraro, and P. G. Jarvis. 2008. Carbon mineralization rates at different soil depths across a network of European forest sites (FORCAST). *Eur. J. Soil Sci.* 59: 1049-1062. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01065.x>.
- Schrumpf, M., K. Kaiser, G. Guggenberger, T. Persson, I. Kögel-Knabner, and E. D. Schulze. 2013. Storage and stability of organic carbon in soils as related to Depth, occlusion within aggregates, and attachment to minerals. *Biogeosciences* 10: 1675-1691. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-10-1675-2013>.
- Tisdall, J. M and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.
- Torres-Guerrero, C. A., J. D. Etchevers B., M. H. Fuentes-Ponce, B. Govaerts, F. De León-González y J. M. Herrera. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana* 31: 71-84.
- Voroney, R. P. 2007. The soil habitat. pp. 25-49. In: A. P. Eldor (ed.). *Soil microbiology, ecology, and biochemistry.* Academic Press. New York, NY, USA. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50006-8>.
- Yamashita, T., H. Flessa, B. John, M. Helfrich, and B. Ludwig. 2006. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: effect of land use. *Soil Biol. Biochem.* 38: 3222-3234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.013>.
- Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>.
- Zeng, Q., F. Darboux, C. Man, Z. Zhu, and S. An. 2018. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *Catena* 167: 276-283. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.009>.