

Efecto de los cultivos de cobertura sobre la materia orgánica y la estabilidad estructural de un suelo de sabana bajo sistemas de manejo conservacionista

Zenaida Lozano^{1*}, Carlos Bravo², Carmen Rivero¹, Rosa Hernández³, Rosalba Mora¹
y Linda Aular¹

¹Instituto de Edafología, Laboratorio de Química de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Apdo. 4579, Maracay 2101, Aragua, Venezuela.

²Laboratorio de Suelos, Programa de Gestión y Conservación Ambiental, Dirección de Investigación, Decanato de Ciencias de la Tierra, Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Pastaza, Ecuador, CP 150160.

³Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos, Laboratorio de Biogeoquímica, Universidad Simón Rodríguez, Apdo. 47925, San Antonio de los Altos 1241, Miranda, Venezuela.

RESUMEN

Los sistemas de producción intensivos han provocado problemas de degradación de los suelos, asociados a disminuciones de sus niveles de carbono orgánico y cambios en la estructura. Con el objetivo de evaluar el efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre la materia orgánica y estabilidad estructural del suelo bajo sistemas de manejo conservacionista, se estableció un ensayo de campo en un Ustoxic Quartzipsament localizado en el municipio Santa María de Ipire (Guárico, Venezuela). Se evaluaron tres CC: *Brachiaria dictyoneura* (BD), *Centrosema macrocarpum* (CM) y vegetación espontánea (VE), comparados con el ecosistema de sabana natural (SN), para el sistema maíz en siembra directa y pastoreo con ganado ovino. Se muestreó a tres profundidades (0-5, 5-15 y 15-30 cm), y tres épocas: 0 (inicial), 286 y 1463 días después del establecimiento (dde). Se evaluaron parámetros relacionados con la calidad de la materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo: carbono orgánico total (COT), carbono hidrosoluble (CHS), carbono en ácidos húmicos (CAH), ácidos fúlvicos (CAF), materia orgánica particulada (CMOP), agregados estables al humedecimiento (AEH), C y N en los agregados y diámetro medio ponderado (DMP). Los resultados muestran que el establecimiento de los CC, produjo un efecto de deterioro transitorio sobre la estructura del suelo, la cual recuperó sus condiciones iniciales en un período de cuatro años. Esta recuperación se relacionó con el contenido de CAH. Los AEH mostraron una distribución jerárquica, con la mayor proporción de agregados de tamaños entre 500-250 mm. Se presentaron diferencias estadísticas en los contenidos de C y N en los tamaños de AEH para cada CC. En conclusión, la cobertura BD favoreció el predominio de las fracciones más lábiles (CAF y CHS), y se tendió a formar macroagregados; mientras que bajo VE y CM predominaron las fracciones más recalcitrantes (CAH) y se tendió a formar microagregados.

Palabras clave: Agregados estables al humedecimiento, calidad de la MOS, cultivo de cobertura; siembra directa.

*Autor de correspondencia: Zenaida Lozano

E-mail: zenaidalozano@gmail.com

Cover crops effects on organic matter and structural stability in a savannah soil under conservation system

ABSTRACT

The intensive production systems have caused soil degradation problems, due to the decrease in organic carbon levels and changes in the structure. In order to evaluate the effect of cover crops (CC), on organic matter and soil structural stability in conservation management systems, a field experiment was performed in an Ustoxic Quartzipsament soil located in Guárico state (Venezuela). Three CC treatments were evaluated, for the establishing of maize no-tillage system and grazing with ovine cattle: *Brachiaria dictyoneura* (BD), *Centrosema macrocarpum* (CM), spontaneous vegetation (SV), and its comparison with the natural savannah ecosystem (NS). Samples to three depths: 0-5, 5-15 and 15-30 cm, and at three times: 0 (initial), 286, and 1463 days after the establishment (dae), were taken. Parameters related to the aggregate stability and soil organic matter quality, were evaluated: total organic carbon (TOC), water soluble carbon (WSC), humic acid carbon (HAC), fulvic acid carbon (FAC), particles organic matter carbon (POMC), water stable aggregates (WSA), C and N in the stable aggregates, and weighted mean diameter (WMD). Results showed that the CC establishment (286 dae), produced a transient deterioration effect on the soil structure, which recovered its initial conditions in a period of four years. This recovery was associated with the fraction HAC content. The WSA showed a hierarchical distribution, with the highest proportion in 500-250 mm size. Statistical differences were presented between cover crops treatments within each aggregate size fraction, and similar trends at all depths. Differences in the C and N content in WSA sizes for each CC were found. These differences were attributed to the quantity and quality of supplied residues. In conclusion, BD cover crops favoured the predominance of most labile fractions (FAC and WSC), and tended to form macroaggregates, while under SV and CM the most recalcitrant fractions (HAC) predominated, and tended to form microaggregates

Key words: Water stable aggregates, SOM quality, cover crops, no-tillage.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción característicos de las sabanas bien drenadas venezolanas, como la ganadería extensiva y semi-intensiva, sobre pastos naturales y/o los monocultivos de secano (maíz o sorgo), han provocado serios problemas de degradación de los suelos con la consecuente disminución de su capacidad productiva, este deterioro se puede asociar a disminuciones de los niveles de carbono orgánico (CO) y cambios en la estructura del suelo (Bravo *et al.*, 2004; Lozano *et al.*, 2011).

Se ha evaluado el efecto de sistemas de manejo conservacionistas como la siembra directa a largo plazo, y se ha encontrado que los contenidos de CO y la agregación mejoraron respecto a la labranza convencional (Eiza *et al.*, 2005). Sin embargo, esta práctica, por sí sola, no sería suficiente para evitar la degradación de la estructura de los suelos frágiles

de las sabanas tropicales, y menos aún, cuando predominan cultivos que aportan escaso volumen de rastrojos. Así, prácticas como rotaciones de cultivos, cultivos de cobertura y la utilización de pasturas permanentes, deberían tomarse en cuenta como una herramienta para evitar la degradación y mejorar el funcionamiento de los agroecosistemas (Forján *et al.*, 2010).

En la búsqueda de alternativas más sustentables para las sabanas venezolanas, se han realizado actividades de investigación/extensión, y a través de la integración del conocimiento local y científico (Hernández-Hernández *et al.*, 2011), se han propuesto sistemas de manejo mejorados, con la introducción de especies forrajeras de mayor o menor calidad bioquímica (gramíneas o leguminosas) como cultivos de cobertura, en la siembra directa del cultivo de maíz y posterior pastoreo con ganado. Este tipo de manejo produce cambios en las propiedades del

suelo, asociados a variaciones en los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS). El contenido y la variación de la MOS han sido usados como indicadores tempranos de los efectos de las prácticas de manejo sobre la calidad del suelo (Eiza *et al.*, 2005), debido a su marcado efecto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas (Hernández y López-Hernández, 1998; Lozano *et al.*, 2010).

La interrelación entre la MOS y la estructura del suelo, medida como proporción de agregados estables al humedecimiento, ha sido ampliamente estudiada (Tisdall y Oades, 1982; Hamza y Anderson, 2005). En muchos suelos la dinámica del desarrollo de la estructura del suelo está estrechamente relacionada con el ciclo de la MOS (Chenu y Stotzky, 2002); sin embargo, los estudios realizados han enfatizado la relación entre estabilidad de agregados y el contenido de MOS, sin considerar su calidad.

Con este trabajo se pretendió evaluar los efectos a corto plazo (menos de 5 años) de la utilización de cultivos de cobertura de diferentes calidades (gramínea y leguminosa) en un sistema mejorado maíz – ganado, sobre la calidad y su relación con la materia orgánica y estabilidad estructural de un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Se estableció un ensayo de campo en un suelo de las sabanas venezolanas clasificado como Ustoxic Quartzipsament, localizado en la Estación Experimental “La Iguana” (8° 25' LN y 65° 25' LO). Esta se encuentra localizada a una altura entre 80-120 msnm, posee un clima marcadamente estacional, con una época de sequía y otra de lluvia (3 a 6 meses húmedos), el relieve es suavemente ondulado, con pendientes de 2%, una precipitación anual promedio de 1369 mm, y una temperatura media mensual de 27,3 °C. El suelo presenta una textura gruesa (a – aF), con alta proporción de arenas muy finas (> 57%), reacción ácida (pH 4,55 – 5,17) y baja fertilidad natural (CIC 1,06 – 2,08 cmol₊.kg⁻¹). La vegetación natural de la zona es el *Trachypogon* sp.

Muestreos y factores experimentales

Se evaluó el efecto del tipo de cobertura, la época y la profundidad de siembra sobre las diferentes

fracciones de la materia orgánica y la estabilidad de los agregados del suelo en un sistema mixto cereal-ganado ovino. Los tipos de cobertura usados fueron: una leguminosa, *Centrosema macrocarpum* (CM); una gramínea, *Brachiaria dictyoneura* (BD); vegetación espontánea (VE), que consistió de una mezcla de gramíneas y leguminosas, que emergieron espontáneamente luego de la preparación del terreno; y se usó la sabana natural (SN) como testigo. Se realizaron 3 muestreos: condiciones iniciales antes de la siembra de los cultivos de cobertura, a los 286 días después del establecimiento (dde) del ensayo y a los 1463 dde. Se colectaron muestras a tres profundidades: 0 a 5 cm, 5 a 15 cm y 15 a 30 cm. En cada parcela de 900 m² se tomaron muestras compuestas para análisis de laboratorio en 12 puntos distribuidos al azar, el diseño de muestreo se seleccionó con base a un estudio previo de variabilidad espacial (Lozano *et al.*, 2004).

Las coberturas se sembraron y dejaron establecer por aproximadamente un año, con una fertilización a base de 350 kg.ha⁻¹ de roca fosfórica. El ensayo se mantuvo por tres ciclos consecutivos maíz – ganado y en el período de lluvias de cada ciclo se sembró maíz sobre los residuos de los cultivos de cobertura, con una fertilización para cubrir las demandas del cultivo en cada ciclo basada en el análisis de suelo. Luego de la cosecha se introdujo ganado ovino a pastorear. La carga animal se estableció basándose en la biomasa disponible a partir de los restos del maíz y el rebrote de los cultivos de cobertura, con la utilización de 5 corderos mestizos tropicales por parcela, de una edad aproximada de dos meses y medio y con un peso inicial entre 10–20 kg, distribuidos equitativamente por peso y sexo en cada parcela, en pastoreo continuo *ad libitum* por un período de 8 semanas.

Determinaciones analíticas

Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron a 2 y a 8 mm; éstas últimas para la determinación de los parámetros de estabilidad estructural. Se determinó la distribución de tamaño de partícula por el método Bouyoucos, descrito por Pla (1983); carbono orgánico total por el método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996); carbono hidrosoluble por el método modificado por Haynes y Francis (1993), en el cual las muestras de suelo se colocaron dentro de tubos de centrifuga en una suspensión suelo:agua 1:5, en agitación orbital a

temperatura ambiente por 30 min a 30 rpm, y luego se centrifugaron por 20 min a 3500 rpm, donde todo el sobrenadante obtenido después del filtrado a través de una membrana de nitrato celulosa de $0,45 \mu\text{m}$, fue recuperado para la determinación inmediata del carbono por el método de Walkley-Black; carbono de la materia orgánica particulada por el método de Cambardella y Elliott (1992), donde muestras de 10 g de suelo seco al aire y pasado por un tamiz de 2 mm se dispersaron con 100 mL de hexametáfosfato de sodio al 0,5%, por 15 h en un agitador de vaivén, todo el material en suspensión se pasó por un tamiz de $53 \mu\text{m}$, posteriormente el material retenido en el tamiz fue secado en estufa a 60°C por 24 horas hasta peso constante y se les determinó carbono orgánico por el método de Walkley-Black.

El carbono en las sustancias húmicas se determinó por una extracción secuencial descrita por Ciavatta y Govi (1993), en la cual a 5 g de suelo se les agregó 100 mL de la solución NaOH/ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0,1 M (relación 1:20) en atmósfera libre de oxígeno haciendo burbujear la solución con N_2 por 1 minuto, se agitaron a temperatura ambiente por 48 horas, posteriormente se centrifugaron a 2700 rpm por 20 minutos y se filtraron; la fracción insoluble se descartó y el filtrado representa la fracción extraíble en álcali (ET). Para la separación de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), el extracto se llevó a pH de 2-3 con H_2SO_4 al 50%, se dejó precipitar por 24 horas y se centrifugó a 2700 rpm por 10 minutos. El precipitado corresponde a los AH y el sobrenadante a los AF más las sustancias no húmicas (SNH). Posteriormente se procedió a la purificación de los AF por cromatografía a través de una columna con la resina Polyvinilpirrolidona (PVP); el material que pasó a través de la resina corresponde a las sustancias NH. El material retenido en la resina (AF) y el precipitado (AH) se re-disolvieron con NaOH 0,5 M y se determinó carbono en todas las fracciones por el método de Walkley-Black.

Para la determinación de agregados estables al humedecimiento se utilizó el método descrito por Kemper y Roseau (1986) a través de una serie de tamices de 2000, 1000, 500, 250, 100 y $53 \mu\text{m}$, colocando sobre el primer tamiz agregados de 8 mm, tal y como sugieren Telmo *et al.* (2001) para suelos arenosos. Los agregados se humedecieron por capilaridad durante 3 minutos y posteriormente se realizó la separación de los agregados con

desplazamientos verticales en una distancia de 1,5 cm, a razón de 30 oscilaciones por minuto, durante 3 minutos, como lo sugieren Ball-Coelho *et al.* (2000) para suelos arenosos. Los agregados permanecieron en inmersión en agua durante toda la prueba. Las fracciones retenidas en cada tamiz se secaron a 50°C y se pesaron. En cada fracción se realizó la corrección por arenas y los resultados se expresaron como porcentaje (%). En todas las fracciones y profundidades se determinó el carbono por el método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996), cuyo valor fue normalizado en función de la proporción de cada agregado. Para la primera profundidad (0 a 5 cm) se determinó en cada fracción el nitrógeno total (Bremner y Mulvaney, 1982). Con las proporciones de agregados estables de los distintos diámetros se calculó la cantidad de macroagregados (2000-250 μm) y microagregados (250-53 μm) y el diámetro medio ponderado (DMP), en la cual se incluyó la fracción que pasa por el tamiz de menor diámetro ($<53 \mu\text{m}$).

Análisis estadísticos

Los resultados fueron sometidos a un análisis exploratorio para la comprobación de los supuestos estadísticos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk), homogeneidad de varianzas (prueba de Barlett) y para la detección y eliminación de valores anómalos (procedimiento de Tukey), para lo cual se utilizó el programa Statistix 8.0. Se realizó el análisis de varianzas y para el cálculo de las diferencias de medias, utilizando como factores el tipo de cobertura, la época y la profundidad. Se utilizó la prueba de mínimas diferencias significativas (MDS) debido a que los tratamientos tenían diferentes tiempos bajo las coberturas (Liebig *et al.*, 2004). Cuando los datos no presentaron distribución normal o las varianzas no eran uniformes, el análisis de varianzas y comparación de medias se realizó a través de métodos no paramétricos (Kruskal-Wallis), en todos los casos a un nivel de confianza del 95%. Se utilizó el paquete estadístico SPSS 11.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agregados estables al humedecimiento en el suelo bajo manejo conservacionista

Luego de 4 años (1463 dde) de establecido el sistema de manejo propuesto, el suelo bajo los distintos tipos de cobertura mostró una distribución

de los agregados estables al humedecimiento (AEH) similar en todos los tipos de cobertura y profundidades (Figura 1), con la mayor proporción en el tamaño de 500-250 mm (7 a 23% del total), con cantidades similares de los agregados entre 2000-1000 y 1000-500 mm ($\approx 5\%$), seguido de los agregados de 250-100 mm ($\approx 2\%$) y por último los agregados entre 100-53 mm ($\approx 0,5\%$). Se observaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre coberturas que dependieron de la fracción de agregado, pero dentro de cada fracción, con una tendencia similar entre tipo de cobertura para todas las profundidades evaluadas.

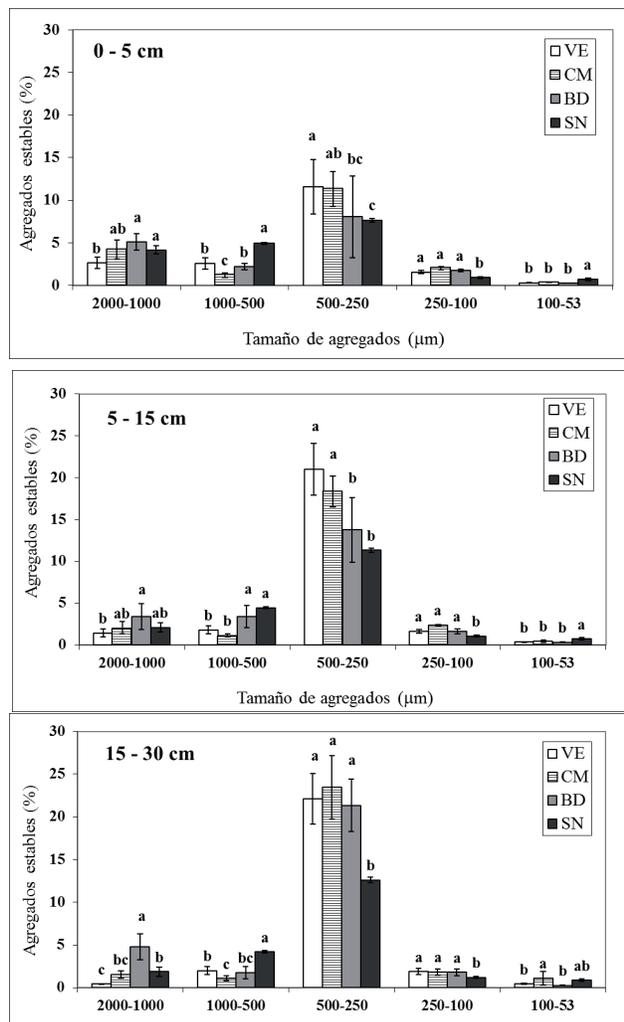


Figura 1. Distribución de agregados estables al humedecimiento, en los tratamientos y profundidades evaluadas, luego de 1463 días de establecidos los cultivos de cobertura, en comparación con la sabana natural. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, MDS) entre tratamientos, para un mismo tamaño de agregado

Es importante destacar que para las coberturas introducidas (BD, CM y VE), los contenidos de AEH en el tamaño de 500-250 mm fueron inferiores en un 65 y 103% con relación a las capas de 5 a 15 y 15 a 30 cm, respectivamente. Esto pudiera estar relacionado con la labranza para el establecimiento de las coberturas, la cual limita la protección física y expone la MO lábil a la acción microbiana lo que contribuyó a la inestabilidad de los agregados, tal y como sugieren Espinoza *et al.* (2017) y Wiesmeier *et al.* (2019).

En la fracción de 2000-1000 mm, la mayor proporción de AEH se presentó en BD y la menor en VE, a las tres profundidades consideradas; en la fracción de 1000-500 mm la mayor proporción se presentó en SN y la menor en CM a todas las profundidades; en la fracción de 500-250 mm fue donde se presentaron mayores diferencias entre tipos de cobertura a todas las profundidades, con la mayor proporción de AEH en VE y CM, y la más baja en SN, principalmente en las capas más profundas; en la fracción de 250-100 mm la menor proporción de AEH se presentó en SN, sin diferencias entre las coberturas introducidas. Por el contrario en la fracción de 100-53 mm la mayor proporción de agregados estables fue para SN, sin diferencias entre el resto de los tratamientos de cobertura, en casi todas las profundidades.

Los resultados sugieren que las coberturas evaluadas pudieran proporcionar agentes de unión diferentes, dependiendo del tamaño de los agregados, tal y como lo señalan Six *et al.* (2004). A medida que se profundiza en el perfil hay mayor proporción de agregados de tamaños intermedios. Las diferencias en los AEH entre tipo de cobertura se pueden asociar a un efecto combinado de la composición bioquímica de los residuos vegetales (contenido de fenoles, lignina, proteínas, azúcares monosacáridos, sacáridos), la cantidad de residuos devueltos a los suelos y productos químicos liberados por las plantas en su proceso de descomposición (Bronick y Lal, 2005).

En todas las fracciones la mayor proporción de agregados estables en los diferentes tipos de cobertura se pudo relacionar con el almacenamiento de CO en el suelo de acuerdo con el modelo jerárquico propuesto por Tisdall y Oades (1982), debido a que la naturaleza de la estabilidad de los agregados depende de la cantidad relativa y fuerza de varios

tipos de asociaciones órgano-minerales y agentes de enlace, tal y como lo señalan Jonh *et al.* (2005).

Contenido de carbón en las diferentes fracciones de agregados estables

El contenido de carbono orgánico en los diferentes AEH, normalizado en función de la proporción de cada agregado, se presenta en el Cuadro 1. Se detectaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre tipos de coberturas y profundidades, para un mismo tamaño de fracción. La interacción coberturas por profundidad resultó significativa para las fracciones 1000-500 y 250-100 μm .

En todos los tipos de cobertura los mayores contenidos de C se presentaron en los agregados de mayor diámetro (500-250 μm y de 2000-1000 μm), resultados similares a los presentados por Hernández y López-Hernández (1998), quienes consiguieron mayor proporción de C en los macroagregados (>250 μm). Hubo diferencias en la tendencia del C con la profundidad entre los tamaños de agregados.

En la fracción 2000-1000 μm los valores más altos se presentaron a nivel superficial en todos los tipos de cobertura, con una disminución entre el 47 a 67% a profundidad de 5 a 15 cm y entre 66 a 93% a la profundidad de 15 a 30 cm.

Con relación al tipo de cobertura, el contenido de C fue similar a todas las profundidades dependiendo del tamaño de agregado: el mayor contenido de C en los agregados de 2000-1000 μm se presentó en BD; en los agregados de 1000-500 μm , en SN; en los agregados de 500-250 μm se presentó en las coberturas VE y CM; en los agregados de 250-100 μm fue similar en todas las coberturas y en los agregados menores de 53 μm los mayores contenidos se presentaron en SN. Los contenidos de C en los diferentes tamaños de agregados se presentaron en la mayoría de los casos (67%) en la cobertura VE, con diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) con el resto de las coberturas.

La disminución de los contenidos de C en los AEH de las coberturas introducidas con relación a

Cuadro 1. Contenido de carbono orgánico en diferentes tamaños de agregados a las profundidades consideradas, luego de 1463 días de establecidos los cultivos de cobertura, en comparación con la sabana natural.

Cobertura	Contenido normalizado de carbono orgánico (g C.Kg ⁻¹ suelo)				
	2000-1000 mm	1000-500 mm	500-250 mm	250-100 mm	100-53 mm
	0 – 5 cm				
SN	0,52 a ¹ A ²	0,36 a A	0,57 ab A	0,04 b A	0,06 a A
VE	0,29 b A	0,19 b A	0,61 ab A	0,07 a A	0,03 bc A
CM	0,54 a A	0,10 c A	0,71 a A	0,08 a B	0,04 b A
BD	0,50 a A	0,17 b A	0,40 b AB	0,07 a A	0,03 c A
	5 – 15 cm				
SN	0,20 ab B	0,21 a B	0,46 b B	0,04 b A	0,05 a B
VE	0,12 b B	0,08 b B	0,76 a A	0,05 b A	0,02 c B
CM	0,18 ab B	0,08 b A	0,76 a A	0,10 a A	0,04 b A
BD	0,27 a B	0,21 a A	0,65 ab A	0,09 a A	0,03 b A
	15 – 30 cm				
SN	0,11 b C	0,16 a C	0,38 b C	0,03 b B	0,03 a C
VE	0,02 c C	0,04 b B	0,43 b A	0,03 b B	0,01 b B
CM	0,10 b B	0,04 b B	0,76 a A	0,05 a C	0,04 a A
BD	0,17 a B	0,03 b B	0,31 b B	0,03 b B	0,01 b B

SN: Sabana natural; VE: Vegetación Espontánea; CM: *Centrosema macrocarpum*; BD: *Brachiaria dictyoneura*. ¹Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre coberturas para una misma profundidad. ²Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre profundidades para una misma cobertura.

SN, se pudiera atribuir a que la labranza aplicada para el establecimiento del ensayo; la cual presumiblemente rompió los macroagregados y la fracción de la MOS no incorporada y protegida en los agregados, fue rápidamente descompuesta, tal y como señalan algunos autores (Beare *et al.*, 1994). También se pudiera atribuir a que la mayor disponibilidad de nutrientes por la fertilización aplicada para el cultivo de maíz en las parcelas de las coberturas introducidas, estimuló la actividad microbiana (Espinoza, 2004).

Como se mencionó, los mayores contenidos de agregados estables en las diferentes fracciones parecieran estar asociados a los mayores contenidos de carbono orgánico (CO). Se consiguieron relaciones positivas entre la proporción de agregados estables y el contenido de C en los agregados, con $r = 0,728$; $r = 0,943$; $r = 0,695$; $r = 0,788$ y $r = 0,837$, para los agregados de 2000-1000, 1000-500, 500-250, 250-53 y < 53 mm, respectivamente. La relación entre estabilidad de los agregados y el contenido de C se ha atribuido a la hidrofobicidad producida por algunos compuestos orgánicos, que reduce la tasa de penetración de agua a través del agregado durante el proceso de tamizado de agua, tal y como lo sugieren Ashman *et al.* (2009).

Contenido de nitrógeno en las diferentes fracciones de agregados estables

Los agregados separados también variaron en su contenido de N. En la Figura 2 se presentan los contenidos de N en los tipos de cobertura evaluados para la capa superficial del suelo (0 – 5 cm). En SN el contenido de N fue mayor en los AEH más grandes (2000-1000 μm) y disminuyó en los sucesivos tamaños. En VE y CM el mayor contenido de N se consiguió en los AEH de 500-250 μm , por el contrario en BD los mayores contenidos de N se presentaron en los AEH de 2000-1000 μm y 500-250 μm . Dentro de cada fracción se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre los tipos de cobertura. En la mayoría de los AEH los mayores valores de N se presentaron en SN (2000-1000, 1000-500 y 100-53 μm); seguido de CM que presentó los mayores contenidos en los agregados de 500-250 y 250-100 μm .

Los tipos de cobertura en los cuales se presentó mayor proporción de AEH, fueron los que contenían mayor contenido de C y N, por lo que se sugiere que

existe una relación positiva entre la conservación de la MO y la estabilidad estructural, aunque no se descarta que en este tipo de suelo pudieran existir agentes estabilizantes como óxidos de Fe y Al, tal y como lo señalan Deneff *et al.* (2006).

Relación C:N en las diferentes fracciones de agregados estables

El estudio de la relación C:N darían indicios de cambio en la calidad de la MO asociada a los agregados. Estos cambios son producto de las pérdidas diferenciales de estos elementos debido al manejo del suelo. En el Cuadro 2, se presenta la relación C:N de los agregados estables separados en los diferentes tipos de cobertura, para las muestras colectadas en la capa superficial (0 a 5 cm), en comparación con el suelo íntegro.

Como se aprecia en el cuadro, la tendencia de la relación C:N fue diferente en el suelo íntegro (sin separar los agregados) con relación de las fracciones de AEH, con diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre los tipos de cobertura tanto en el suelo íntegro como en cada tamaño de agregado. Se destaca que en los agregados más grandes (2000-1000 y 1000-500 μm) la mayor relación C:N se presentó en la cobertura CM; mientras que en los agregados más pequeños (250-100 y 100-53 μm) la mayor relación C:N se presentó en VE. En la fracción de 500-250 μm no se presentaron diferencias entre tipos de coberturas. Los valores más bajos de C:N se presentaron en SN para las fracciones 1000-500 y 100-53 μm y fue variable para el resto de las fracciones.

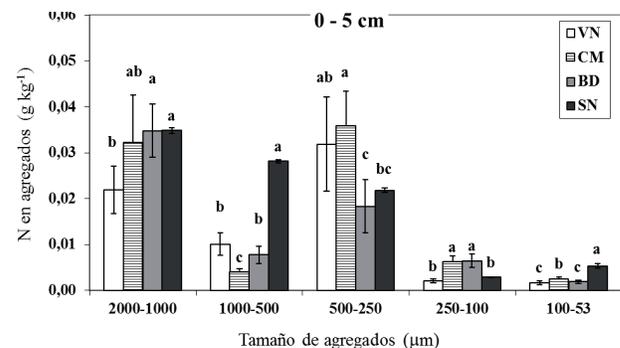


Figura 2. Contenido de nitrógeno en los diferentes tamaños de agregados estables obtenidos en la capa de 0 a 5 cm, luego de 1463 días de establecidos los cultivos de cobertura, en comparación con la sabana natural.

Cuadro 2. Relación C:N en diferentes tamaños de agregados obtenidos en la capa de 0 a 5 cm, luego de 1463 días de establecidos los cultivos de cobertura, en comparación con la sabana natural

Cobertura	Relación C:N / Diámetro de agregados (mm)					
	Suelo íntegro	2000-1000	1000-500	500-250	250-100	100-53
SN	25,7 a ¹	14,99 ab	12,97 c	26,33 a	14,63 b	11,87 b
VE	18,9 a	13,48 b	19,62 b	20,96 ab	39,91 a	21,14 a
CM	8,7 b	18,01 a	24,82 a	20,58 b	14,50 b	16,21 ab
BD	19,5 a	16,27 ab	24,04 ab	25,00 ab	11,84 b	15,28 ab

SN: Sabana natural, VE: Vegetación Espontánea CM: *Centrosema macrocarpum*, BD: *Brachiaria dictyoneura*; ¹Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre coberturas para el suelo completo y dentro de cada tamaño de agregado ($p < 0,05$).

Ashman *et al.* (2009) consiguieron diferencias en la relación C:N en las diferentes fracciones de tamaño de agregados y lo asociaron a la calidad de la MOS en cada tamaño de agregado, producto de la actividad microbiana en el suelo.

Es importante destacar que a pesar de que CM es una planta leguminosa, las relaciones C:N en todos los tamaños de agregados fueron altas, similares a las de BD que es una gramínea. Si se compara la relación C:N del suelo íntegro con las diferentes fracciones, se aprecia que en los tipos de cobertura donde predominan las gramíneas (SN y BD), la relación C:N fue mayor en el suelo íntegro que en la mayoría de las fracciones; mientras que en los tipos de cobertura donde predominan las leguminosas (VE y CM), la relación C:N fue mayor en el suelo fraccionado

Estos resultados son similares a los de Hernández y López-Hernández (1998), quienes consiguieron bajas relaciones C:N en suelos no cultivados (como SN) y sugieren que una baja relación C:N indica un posible predominio de materiales altamente recalcitrantes, y que se favorecería la mineralización de N total de reciente adición. De igual forma Ashagrie *et al.* (2006), señalan que bajas relaciones C:N sugieren que muchos de los compuestos realmente degradables se han perdido y que quedan solo los más viejos y humificados. Por otro lado, Hontoria *et al.* (2016) encontraron que en los tratamientos donde no se había labrado el suelo, se redujeron las relaciones C:N en la mayoría de las clases de agregados en la capa de 0–5 cm.

Variación en la estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico durante el periodo de evaluación

La variación en el tiempo de la distribución de AEH se presenta en el Cuadro 3. Se observa que la introducción de los cultivos de cobertura produjo, el primer año (286 dde), una disminución de la proporción de macroagregados (2000-250 mm) y un aumento de la proporción de los microagregados (250-53 mm).

Esta tendencia inducida por el cambio de uso de la tierra, de condiciones de sabana natural a cultivo, ha sido bastante reseñada en la literatura (Elliott, 1986; Cambardella y Elliott, 1993; Freibauer *et al.*, 1999), y la atribuyen a la disminución en la cantidad de CO del suelo, o al aumento en la porosidad en la zona cercana a las raíces.

La protección física de la MOS por agregados se considera un mecanismo importante para la estabilización del C. Además de la formación abiótica de agregados, la biota del suelo y el material que producen juegan un papel importante en la formación y estabilización de la estructura del suelo y están fuertemente involucrados en el proceso de oclusión de MO por agregación. La capacidad protectora de los agregados se relaciona principalmente con una separación espacial de sustrato y los microorganismos, así como con una menor actividad microbiana, debido a una difusión reducida de oxígeno en los agregados.

Luego de 4 años de establecido el ensayo (1463 dde), la proporción de macroagregados aumentó a valores similares a los iniciales, y los

Cuadro 3. Variación en la proporción y contenido de carbono en macroagregados y microagregados, y diámetro medio ponderado en muestras de suelo superficial (0 a 5 cm) en los diferentes tipos de cobertura y épocas evaluadas.

Parámetro	Cobertura	Inicial (SN)	Días del establecimiento		MDS (p<0,05)
			286	1463	
% AE macroagregados (2000-250 μm)	VE	16,7 (0,26)	14,8 a	16,8 a	4,73
	CM		11,5 a	16,7 a	
	BD		11,7 a	17,8 a	
% AE microagregados (250-53 μm)	VE	1,6 (0,05)	2,4 b	2,0 ab	0,38
	CM		4,2 a	2,3 a	
	BD		4,0 a	1,8 b	
COT (g C.Kg ⁻¹ suelo) macroagregados (2000- 250 μm)	VE	0,49 (0,04)	0,69 a	0,37 a	0,08
	CM		0,55 b	0,45 a	
	BD		0,63 a	0,40 a	
COT (g C.kg ⁻¹ suelo) microagregados (250-53 μm)	VE	0,05 (0,01)	0,06 a	0,05 a	0,03
	CM		0,04 b	0,08 a	
	BD		0,05 ab	0,05 a	

SN: Sabana natural; VE: Vegetación Espontánea; CM: *Centrosema macrocarpum*; BD: *Brachiaria dictyoneura*; %AE: Porcentaje de agregados estables; DMP: Diámetro medio ponderado; COT: Carbono orgánico total. ¹⁾ Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre coberturas para una misma época; MDS: Nivel crítico de comparación por la prueba de mínimas diferencias significativas. Desviación estándar entre paréntesis.

microagregados disminuyeron en todos los tipos de cobertura, principalmente en BD. Las variaciones entre tipos de cobertura se pueden atribuir a las diferencias en la arquitectura de las raíces del cultivo introducido (grado de ramificación y grosor), según lo señalado por Carter *et al.* (1994), y al tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa). Haynes y Beare (1997), encontraron que en plantas no leguminosas, la mayor biomasa de raíces produjo una mejora en la estabilización de los agregados, debido a un aumento en la rizodeposición de C, lo que favoreció el incremento de la actividad microbiana. En cultivos de leguminosa, Haynes (2000) sugiere que las hifas de los hongos, pudiesen ser el factor crítico en la formación de agregados.

En el Cuadro 3 también se presentan los valores del diámetro medio ponderado (DMP) de los diferentes tipos de cobertura en las épocas evaluadas. Dichos valores evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$) entre tipos de cobertura para una misma época y entre las épocas evaluadas, con relación a las condiciones iniciales (SN).

A los 286 dde se produjo una disminución del DMP en los tratamientos CM y BD por efecto del aumento en la proporción de microagregados (250-53 μm), mientras que en VE fue similar al inicial; lo contrario se produjo para los 1463 dde, en VE se produjo una disminución estadísticamente significativa ($P \leq 0,05$) del DMP con respecto a las condiciones iniciales, mientras que en CM y BD aumentó hasta valores cercanos a los iniciales, principalmente en BD.

Fracciones de la materia orgánica en diferentes épocas

Las fracciones carbono hidrosoluble (CHS), carbono en ácidos húmicos (CAH), carbono en ácidos fúlvicos y carbono de la materia orgánica particulada (CMOP), en la primera capa del suelo íntegro se presenta en el Cuadro 4. En general, a los 286 dde se produjo una disminución de la mayoría de las fracciones de la MOS en las coberturas introducidas CM y BD; mientras que en VE solo se redujo la fracción CMOP. La fracción carbono en ácidos húmicos (CAH) presentó incrementos en ambos

Cuadro 4. Variación en las fracciones de la materia orgánica en muestras de suelo íntegro de la capa superficial (0 a 5 cm) en los diferentes tipos de cobertura y épocas evaluadas.

Parámetro	Cobertura	Inicial (SN)	Días del establecimiento		MDS (p<0,05)
			286	1463	
CHS (g.kg ⁻¹)	VE	0,42	0,35 a ¹	0,27 b	0,08
	CM	(0,05)	0,38 a	0,38 ab	
	BD		0,42 a	0,46 a	
CAH (g.kg ⁻¹)	VE	2,5	2,8 a	3,3 a	0,61
	CM	(0,02)	2,4 ab	3,6 a	
	BD		1,8 b	2,5 b	
CAF (g.kg ⁻¹)	VE	2,0	2,0 a	1,8 b	0,12
	CM	(0,04)	1,8 b	1,7 b	
	BD		1,7 b	2,2 a	
CMOP (g.kg ⁻¹)	VE	1,5	0,8 b	1,1 a	0,32
	CM	(0,36)	1,2 a	1,3 a	
	BD		1,2 a	1,2 a	

SN: Sabana natural; VE: Vegetación Espontánea, CM: *Centrosema macrocarpum*; BD: *Brachiaria dictyoneura*; COT: Carbono orgánico total; CHS: Carbono hidrosoluble; Nt: Nitrógeno total; CAH: Carbono en ácidos húmicos; CAF: Carbono en ácidos fúlvicos; CMOP: Carbono en la materia orgánica particulada. ¹Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre coberturas para una misma época; MDS: Nivel crítico de comparación por la prueba de mínimas diferencias significativas. Desviación estándar entre paréntesis.

ciclos evaluados, entre el 4 y 40%. Estos resultados son comparables con los de Novotny *et al.* (1999), quienes señalan que la mecanización favorece la ruptura de las grandes moléculas húmicas, por lo que en ausencia de laboreo se favorece la formación de ácidos húmicos. La diferencia entre tipos de cobertura en ambas evaluaciones, con menores valores de CAH en BD, está en concordancia con los resultados de Galantini y Rosell (2006), quienes señalan que en los cultivos donde el aporte de biomasa de residuos es mayor (a los 286 dde: BD = 1327, CM = 763, VE = 562 g·m⁻²; a los 1463 dde: BD = 812, CM = 422 y VE = 129 g·m⁻²), se favorece el contenido de las fracciones lábiles de la MOS (CAF), y disminuye el contenido de CAH.

En resumen, en BD hay un predominio de CAF y CHS, y se tiende a formar macroagregados; mientras que en VE y CM hay un predominio de CAH, y se tiende a formar microagregados. Los resultados muestran que en estos suelos de sabana, las operaciones de labranza producen un cambio en la mayoría de las fracciones de la materia orgánica, una disminución de la macroagregación y aumento de la microagregación, en consecuencia, una menor probabilidad de almacenaje de C en el suelo.

CONCLUSIONES

Luego de la intervención con labranza, el uso de cultivos de cobertura y siembra directa en un suelo de sabana, se produjo un efecto transitorio sobre la estructura del suelo, la cual se recuperó a sus condiciones iniciales en un corto plazo (alrededor de 4 años), lo que pudiera ser indicio de su alta resiliencia. Se presentaron diferencias entre coberturas y con la profundidad en la proporción de agregados estables al humedecimiento (AEH), y en los contenidos de C y N en los diferentes tamaños de agregados.

Esta recuperación de la estructura del suelo se pudo relacionar con el efecto de los tipos de cobertura (cantidad y calidad de residuos aportados) sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo, especialmente el carbono en los ácidos húmicos (CAH). En general, la *Brachiaria dictyoneura* (BD) favorece el predominio de las fracciones más lábiles (CAF y CHS), y la formación de macroagregados; mientras que bajo vegetación espontánea (VE) y *Centrosema macrocarpum* (CM) se estimula el predominio de las fracciones más recalcitrantes (CAH) y se favorece la formación de microagregados.

AGRADECIMIENTO

Se reconoce el apoyo financiero del Fondo Nacional de Investigaciones Científicas (Fonacit) y el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashagrie, Y.; W. Zech; G. Guggenberger; T. Mamo. 2006. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia Soil Till. Res. 94: 101-108.
- Ashman, M.R.; P.D. Hallett; P.C. Brookes; J. Allen. 2009. Evaluating soil stabilisation by biological processes using step-wise aggregate fractionation. Soil Till. Res. 102 (2): 209-215.
- Ball-Coelho, B.R.; R.C. Roy; C.J. Swanton. 2000. Tillage and cover crops impact on aggregation of sandy soil. Canadian J. Soil Sci. 80: 363-365.
- Beare, M.H.; P.F. Hendrix; D.C. Coleman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 777-786.
- Bravo, C. ; Z. Lozano; R. M. Hernández; L. Piñango; B. Moreno. 2004. Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa. Bioagro 16: 163-172.
- Bremner, J. ; C. Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In: Page A.L. *et al.* (eds.), Agronomy Monograph Number 9. Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and biological properties. 2nd ed. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin (USA). pp. 595-642.
- Bronick, C.J. ; R. Lal. 2005. Manure and rotation effect on soil organic carbon concentrations for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. Soil Till. Res. 81: 239-252.
- Cambardella, C.; E. Elliott. 1992. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 777-783.
- Cambardella, C.; E. Elliott. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 1071-1076.
- Carter, M.R. ; D.A. Angers; H.T. Kunelius. 1994. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1194-1199.
- Chenu C.; G. Stotzky. 2002. Interactions between microorganisms and soil particles: an overview. In: Huang PM, Bollag JM, Senesi N (eds). Interactions between soil particles and microorganisms. Impact on the terrestrial ecosystem, John Wiley & Sons, New York, NY, pp. 3-40.
- Ciavatta, C.; M. Govi. 1993. Use of insoluble polyvinylpyrrolidone and isoelectric focusin in the study of humic substances in soils and organic wastes. J. Chrom. 643: 261-270.
- Denef, K.; L. Zotarelli; R.M. Boddey; J. Six. 2006. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. Soil Biol. Biochem. 39: 1165-1172.
- Eiza, M.J.; N. Fioriti; G.A. Studdert; H.E. Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. Ciencia del Suelo (Argentina) 23:59-67.
- Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 627-633.
- Espinoza, Y. 2004. Calidad de la materia orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. Rev. Fac. Agron (LUZ) 21: 126-141.
- Espinoza, Y.; Z. Lozano; L. Malpica. 2017. Efecto del sistema labranza sobre la estructura y fracciones de carbono y nitrógeno del suelo y su impacto en el desarrollo del cultivo de maíz. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 34: 448-476.
- Forjan, H; M. Zamora; M.L. Manso. 2010. Modificación en los niveles de materia orgánica por efecto de la secuencia agrícola. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Argentina. 6 p.

- Freibauer, A. ; R. Westerhof; M. Ayarza; J.E. Da Silva; W. Zech. 1999. Short term variation in aggregation and particulate organic matter under crops and pastures. *In*: Tomas R. y M.A. Ayarza (eds.). Sustainable land management for the Oxisols of the Latin Americas savannas. CIAT. Cali, Colombia. pp. 77-88.
- Galantini, J.; R. Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamic under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Hamza, M.A.; W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Haynes, R.; G. Francis. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.* 44: 665-675.
- Haynes, R.J. ; M.H. Beare. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29: 1647-1653.
- Hernández, R.M.; D. López-Hernández. 1998. Efecto de la intensidad de labranza sobre diversas fracciones de la materia orgánica y la estabilidad estructural de un suelo de sabana. *Ecotrópicos* 11: 69-80.
- Haynes, R.J. 2000. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pre-treatment and their effects on measured aggregate stability. *Biol. Fert. Soils* 30: 270-275.
- Hernández-Hernández, R.M.; M.E. Morros; C. Bravo; Z. Lozano; P. Herrera; A. Ojeda; J. Morales; B. Birbe. 2011. La integración del conocimiento local y científico en el manejo sostenible de suelos en agroecosistemas de sabana. *Interciencia* 36: 104-109.
- Hontoria, C.; C. Gómez-Paccard; I. Mariscal-Sancho; M. Benito; J. Pérez; R. Espejo. 2016. Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol. *Soil Till. Res.* 160: 42-52.
- John, B.; T. Yamashita; B. Ludwig; H. Flessa. 2005. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma* 128: 63-79.
- Kemper, W.D.; R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In*: Klute A. et al. (eds). *Agronomy Monograph Number 9. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical properties.* 2nd ed. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin (USA). pp. 425-442.
- Liebig, M.A.; D.L. Tanaka; B.J. Wienhold. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in northern Great Plains. *Soil Till. Res.* 78: 131-141.
- Lozano, Z.; C. Bravo; F. Ovalles; R.M. Hernández; B. Moreno; L. Piñango; J.G. Villanueva. 2004. Selección del diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16: 61-72.
- Lozano, Z.; H. Romero; C. Bravo. 2010. Influencia de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana. *Agrociencia* 44: 135-146.
- Lozano, Z.; R.M. Hernández; C. Bravo; M. Delgado. 2011. Cultivos de cobertura y fertilización fosfórica y su efecto sobre algunas propiedades químicas del suelo en un sistema mixto maíz-ganado. *Venesuelos* 19: 45-54.
- Nelson, D.W. ; L.E. Sommers. 1996. Total carbon, total organic carbon and organic matter. pp. 961-1010. *In*: Sparks, D.L. (ed.). *Agronomy Monograph Number 9. Methods of soil analysis, Part 3. Chemical properties.* 2nd ed. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin (USA).
- Novotny, E.; H.W.H. Blum; M.H. Herzabek; A.S. Mangrich. 1999. Soil management systems on size fractioned humic substances. *Geoderma* 92: 87-109.
- Pla, I. 1983. Metodologías para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Fac. Agron. (Maracay), Alcance* 32. 91 p.

- Six, J.; H. Bossuyt; S. Degryze; K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31.
- Telmo, J.C.; R. Dalvan; J.M. Reichert. 2001. Soil quality of very fragile sandy soils from Southern Brazil. *In: Sustaining the Global Farm.* Scott, D.E. *et al.* (eds.). pp. 564-568.
- Tisdall, J.M.; J.J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European J. Soil Sc.* 33: 141-163.
- Wiesmeier, M.; L. Urbanski; E. Hobbey; B. Lang; M. von Lützow; E. Marin-Spiotta; B. van Wesemaele; E. Rabot; M. Ließ; N. Garcia-Franco; U. Wollschläger; H. Vogel; I. Kögel-Knabner. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333: 149-162.