

Micronutrientes en agregados de un suelo de sabana, bajo un sistema maíz-ganado mejorado^a

Micronutrients in aggregates of a savanna soil, under an improved maize-livestock production system

Deyanira Lobo L.¹; Yohalín O. Peña S.²; Zenaida Lozano P.²; Rosa Mary Hernández H.³

¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología, Maracay, estado Aragua; ² Instituto Nacional de Tierras; ³ Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. Centro de Agroecología Tropical Correos: lobod@agr.ucv.ve, yohalinp@hotmail.com

RESUMEN

El uso y manejo de los suelos influyen en el contenido de micronutrientes y su distribución en el perfil. Con el propósito de evaluar los efectos de diferentes coberturas de un sistema mejorado maíz-ganado sobre el contenido y distribución de micronutrientes en macroagregados y microagregados y su relación con otras características del suelo, se llevó a cabo un ensayo en un Entisol, ubicado en la Estación Experimental La Iguana, estado Guárico, sistema de producción maíz-ganado mejorado. El maíz fue sembrado usando siembra directa sobre diferentes coberturas: Vegetación Natural (VN), *Centrosema macrocarpum* (Cm), *Brachiaria dactylosteuata* (Bdy) y *Brachiaria decumbens* (Bde), las cuales se utilizaron para pastoreo del ganado ovino, después de la cosecha del maíz. Después del pastoreo, en el segundo ciclo maíz-ganado, se tomaron muestras de suelo (12 puntos por unidad experimental) y se determinó: carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los contenidos de hierro, cobre, zinc y manganeso extraídos con Mehlich 1, en macroagregados (diámetro >250 µm) y microagregados (diámetro <250 µm), previamente separados. Los resultados permiten señalar que en este suelo, se encontró una mayor proporción de macroagregados que de microagregados. En todos los tratamientos de coberturas se apreció una disminución con la profundidad del contenido de carbono orgánico y de la capacidad de intercambio catiónico, tanto en macroagregados como en microagregados. El contenido de los micronutrientes medidos fue significativamente diferente en las profundidades evaluadas y en los diferentes tamaños de agregados. El Fe y el Cu aumentaron con la profundidad, mientras que el Zn y el Mn disminuyeron.

Palabras clave: Micronutrientes, microagregados, macroagregados, cultivos de coberturas, siembra directa.

ABSTRACT

The use and management of soils affect the micronutrient content and its distribution in the profile. This study evaluates the effect of different types of soil coverage on the content and distribution of micronutrients in macroaggregates and microaggregates, in a corn-livestock system on a sandy, in La Iguana Experimental Station (Santa Maria de Ipire, Guarico state). The corn was sowed with no tillage on each of the following soil-coverage treatments: natural vegetation (VN), *Centrosema macrocarpum* (Cm), *Brachiaria dactylosteuata* (Bdy) and *Brachiaria decumbens* (Bde). These soil coverages were used for sheep grazing, after the corn harvest. A soil sampling including twelve points for each treatment was conducted in the second maize-cattle cycle, after grazing. The following soil properties were determined in each sample: organic carbon (OC), cation exchange capacity (CEC) and iron content (Fe), copper (Cu), zinc (Zn) and manganese (Mn) extracted with Mehlich 1, macroaggregates (diameter > 250 µm) and microaggregates (diameter <250 µm). According to the results, the proportion of soil macroaggregates is greater than that of microaggregates. Soil organic carbon content and cation exchange capacity diminished with soil depth in both macroaggregates and microaggregates in all treatments. The content of Fe, Cu, Zn and Mn was significantly different in all the evaluated depths and aggregate sizes. The contents of Fe and Cu increased, whereas Zn and Mn decreased with soil depth.

Key words: Micronutrients, microaggregates, macroaggregates, cover crops, zero tillage.

INTRODUCCIÓN

Los micronutrientes del suelo juegan un papel importante en la producción de cultivos, por lo que su disponibilidad puede afectar tanto el crecimiento y desarrollo, como la producción y calidad de los cultivos, ya que estos desempeñan funciones complejas en la nutrición de las plantas y en los sistemas enzimáticos. Tales funciones son muy variadas; por ejemplo, el Fe, Cu y Mo son parte esencial de las reacciones complejas que constituyen la fotosíntesis y muchos otros procesos metabólicos, mientras que el Zn y Mn participan en muchos sistemas enzimáticos en las plantas (Brady y Weil, 2001). Sin embargo, se le ha dedicado poca atención al comportamiento de los micronutrientes en el suelo, así como a la influencia de las características del suelo sobre la disponibilidad de los mismos.

Muchas características o propiedades del suelo, tales como el pH, la materia orgánica, la temperatura, la humedad, la concentración relativa de nutrientes, afectan la disponibilidad de los micronutrientes. Tales efectos varían considerablemente de un micronutriente a otro, así como el grado relativo de efectividad. Las relaciones asociadas con cada uno de las diferentes características o propiedades son complejas, aunque se han conseguido correlaciones que pueden ser explicadas con una certeza relativamente alta (Fageria et al., 2002)

El pH del suelo influye sobre la solubilidad, concentración en la solución del suelo, forma iónica y movilidad de los micronutrientes, y consecuentemente sobre la absorción de éstos por parte de las plantas (Fageria, et al., 1997). La materia orgánica del suelo ejerce un impacto significativo y directo sobre la disponibilidad de Zn, Fe y Mn, pero tiene poca influencia en la disponibilidad del Cu (Zhang et al., 2001). Asimismo, las interacciones con otros elementos esenciales, y las aplicaciones de dosis apropiadas de N, P y K pueden aumentar la disponibilidad de Cu, Zn y Mn (Zhang et al., 2004); La distribución de micronutrientes en el perfil puede ser afectada por prácticas de manejo como el tipo de labranza (Lavado et al., 1999); por ejemplo, altos niveles de P en la superficie del suelo, en sistemas de siembra directa y labranza mínima, pueden influir en las propiedades del suelo, así como en la redistribución de micronutrientes en las fracciones del suelo y alterar su disponibilidad (Shuman, 1988). Efectos similares sobre los micronutrientes pueden tener la acumulación de materia orgánica y el aumento de la actividad microbiana en sistemas de siembra directa.

El manejo de coberturas vegetales es una de las opciones tecnológicas que se emplea con el propósito de mejorar significativamente la productividad de los suelos porque tienden a favorecer las condiciones químicas, físicas y biológicas del mismo, pues incorporan nutrientes en el suelo, aumentan la capacidad de retención de humedad y lo protegen contra la erosión. (Pound, 1997; Delgado, 2001). No obstante, la disponibilidad de nutrientes para los cultivos sembrados bajo siembra directa sobre los residuos, puede verse alterada, debido a la colocación superficial de los mismos y de los nutrientes aplicados en la fertilización. Franzluebbers y Hons (1996) encontraron pocos cambios en un sistema de siembra directa, en un suelo de textura fina, en el cual la disponibilidad de P, K, Zn, Fe, Mn y Cu aumentó cerca de la superficie del suelo, donde ocurrió la mayor proliferación de raíces.

Desde el punto de vista de la incorporación de nutrientes, el efecto de los cultivos de coberturas sobre los micronutrientes del suelo ha sido poco estudiado. Tal vez porque se requieren en pocas cantidades para las plantas; sin embargo, la deficiencia de alguno de ellos puede disminuir los rendimientos de los cultivos (Rothon, 2000; Rey, 2002).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los efectos de diferentes coberturas de un sistema mejorado maíz-ganado sobre el contenido y distribución de los micronutrientes Cu, Zn, Fe y Mn, en agregados de diferentes tamaños, en un Entisol del estado Guárico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la investigación y características del suelo

La investigación se realizó en un suelo Entisol, clasificado como Ustoxic Quartzipsamment (Lozano et al., 2004), cuyas características se presentan en el cuadro 1, en la Estación Experimental "La Iguana", de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez, ubicada en el eje Espino-Santa María, que corresponde a una amplia zona que se localiza en el sur-este del estado Guárico (Riera y Guerrero, 1984). Representa las llamadas sabanas infértiles o sabanas de *Trachypogon* de los llanos altos de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas, que poseen suelos de baja fertilidad natural, pH ácido, baja capacidad de retención de nutrientes y bajo contenido de materia orgánica (Matheus, 1987). El suelo es

Cuadro 1. Características del suelo bajo estudio

	0 - 5 ¹	5 - 15	15 - 30	
Arcilla (%)	6,83	9,40	10,06	
Limo (%)	10,64	8,64	6,79	
Arena total (%)	82,47	82,5	80,96	
	arena muy fina	3,48	5,43	5,44
	arena fina	51,49	49,21	51,37
Distribución de arenas (%)	arena media	23,40	22,55	19,77
	arena gruesa	3,63	3,88	3,50
	arena muy gruesa	0,57	0,91	0,88
Clase textural	aF	aF	aF	
Reacción del suelo (pH)	5,01	4,81	4,75	
Densidad aparente (Da; Mg.m ⁻³)	1,51	1,59	1,72	
Conductividad hidráulica (Ksat; cm.h ⁻¹)	10,38	6,71	1,16	
Porosidad total (Pt, % v.v ⁻¹)	44,77	39,33	33,20	
Poros con radio >15 µm (Pa; % v.v ⁻¹)	15,70	11,53	5,98	
Poros con radio <15 µm (Pr; % v.v ⁻¹)	29,64	29,06	27,22	

¹: profundidad en cm

de textura areno francosa en todas las profundidades estudiadas, con densidades aparentes no limitantes, según la textura, que incrementan con la profundidad, sin limitaciones para la aireación ni para la penetración y movimiento de agua, de conformidad con sus valores de porosidad total y de aireación y conductividad hidráulica saturada, y con pH fuertemente ácido. En la fracción arena predominan las partículas entre 100 y 250 µm, lo cual le otorga a los agregados una mayor susceptibilidad a la separación, dado que requieren menor cantidad de energía para que estas partículas se separen de los agregados (Poesen, 1992).

Diseño del experimento

El diseño estadístico utilizado fue el diseño de parcelas grandes, de 900 m² (Lozano et al., 2004) con doce puntos de muestreo en cada parcela, lo que permitió realizar los análisis estadísticos de acuerdo a un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial 4 x 3 x 2, con cuatro tipos de cobertura (VN, Cm, Bdy y Bde), tres profundidades (0 - 5, 5 - 15, 15 - 30 cm) y dos tamaños de agregados (macroagregados y microagregados)

Tratamientos y manejo del experimento

Se utilizaron cuatro tratamientos de coberturas, con la finalidad de disminuir la degradación del suelo y contribuir con la sostenibilidad del sistema maíz-ganado. Las coberturas seleccionadas fueron: Barbecho o vegetación natural (VN) como testigo, la cual consistió de una mezcla de gramíneas y leguminosas que emergieron espontáneamente luego de la preparación de suelo, una leguminosa *Centrosema macrocarpum* (Cm), y dos gramíneas *Brachiaria dyctioneura* (Bdy) y *Brachiaria decumbens* (Bde).

La preparación del suelo se realizó de manera tradicional con dos pases de rastra antes del establecimiento de las coberturas en las distintas parcelas de 30 m de largo y 30 m de ancho. La siembra de las coberturas se realizó de dos maneras: al voleo para las gramíneas (4 kg ha⁻¹) y en hileras separadas a 0,25 m para la leguminosa (10 semillas por metro lineal). Luego de establecidas las coberturas por un período de 1 año; se realizó el corte de las mismas. Seguidamente, se procedió a la siembra directa del cultivo de maíz sobre las distintas coberturas utilizando semilla de maíz blanco Sefloarca 02, tratada

con Thidicarb a una distancia de 0,90 m entre hileras. Se aplicó un herbicida de contacto Paraquat (4 litros por hectárea). La fertilización se aplicó manualmente y en bandas, utilizando una mezcla de urea perlada + fosfato diamónico y cloruro de potasio a razón de 70-90-90 kg.ha⁻¹ de N - P₂O₅ -K₂O, respectivamente.

A los 30 días después de la siembra, se efectuó el reabono utilizando urea perlada a razón 46 kg.ha⁻¹ de nitrógeno. Luego, se produjo la cosecha del maíz y finalmente se introdujo el ganado ovino, con una carga de 3 ua.ha⁻¹ (5 corderos/ parcela), con la finalidad de que éstos consumieran todos los residuos vegetales (soca de maíz y rebrote de cobertura)

La época de muestreo del suelo para esta investigación se realizó al final del segundo ciclo maíz-ganado después del pastoreo. En cada punto, el muestreo se realizó a tres profundidades: 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm, y cada muestra se colocó en bolsas plásticas para luego ser procesada en el laboratorio.

Separación de agregados y evaluaciones

Los diferentes tamaños de agregados se separaron por tamizado en húmedo (método de Yoder, modificado por Pla, 1983), de conformidad con el modelo descrito por Tisdall y Oades (1982), el cual indica, que los agregados se dividen en microagregados (diámetro equivalente menor de 250 µm) y en macroagregados (diámetro equivalente mayor a 250 µm). Para definir el límite superior de los macroagregados se utilizó un tamiz de 4 mm.

En cada tamaño de agregado (microagregados y macroagregados), se realizaron las siguientes determinaciones: distribución de tamaño de partículas, por el método de Gee y Or (2002); carbono orgánico (CO), por el método de Walkley-Black modificado (Heanes, 1984), capacidad de intercambio catiónico (CIC), por el método de Acetato de Amonio 1N, pH 7, micronutrientes disponibles del suelo: Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Manganese (Mn) por la solución extractora Melich 1, siguiendo los métodos descritos en Guitian (1964) y Page (1982).

Los resultados de las evaluaciones de micronutrientes del suelo, CO y CIC, en macroagregados y microagregados, fueron realizados sin corrección por arenas, debido a las características particulares del suelo, el cual presentó una alta proporción de los diferentes tamaños de arenas; por lo que al establecer una escala numérica o rango de estimación para ser cuantificados, éstos resultan inexplicables, tal como lo señalan Webster y Oliver (1990), quienes recomiendan que en estos casos los datos pueden ser tratados crudos con fines de tratamientos estadísticos y matemáticos.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el paquete STATISTIX (Analytical Software, 2008). Los resultados de cada variable fueron analizados previamente para la detección y eliminación de valores atípicos. Luego fueron sometidos a pruebas de normalidad de Wilk Shapiro y de homogeneidad de la varianza. En el caso de las variables que no presentaron una distribución normal o que presentaron heterogeneidad de las varianzas se utilizaron las pruebas no paramétricas de Kruscall-Wallis (1952).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Separación de los diferentes tamaños de agregados y distribución de tamaño de partículas

Con relación a la proporción de microagregados y macroagregados (Cuadro 2), se puede apreciar que en todos los tratamientos de cobertura existe un mayor predominio de macroagregados que de microagregados, observándose ligeras diferencias entre sus valores, aunque no significativas, en todas las profundidades. Otras investigaciones, como las de Wick *et al.* (2006) y Qiang *et al.* (2007) encontraron mayor proporción de macroagregados en la capa superficial de los suelos, después que se sometieron a diferentes tratamientos de recuperación. En este suelo, los macroagregados muestran una proporción alrededor del 60%, mientras que los microagregados presentan las menores proporciones que giran alrededor de un 40%.

La mayor proporción de macroagregados se debe a que estos se forman más rápido en un suelo bajo siembra directa, pero son más inestables a la fuerza física de rompimiento generada por cambios climáticos (Six *et al.*, 2000), más aun en este caso en que al no hacerse la corrección por arenas, esta proporción resulta sobreestimada.

En los cuadros 3 y 4 se muestra la distribución de tamaño de partículas en los microagregados y macroagregados, respectivamente, para cada tratamiento de cobertura. En los macroagregados, el porcentaje de partículas con diámetro equivalente > 50 µm es mayor a un 90%, mientras que la

proporción de partículas finas (< 50 μm) es menor que 10%. En lo que respecta a los microagregados, la proporción de partículas con diámetro equivalente > 50 μm es mayor que 82 % y las partículas finas se encuentran en mayor proporción que en los macroagregados. Como se observa, los microagregados presentan una mayor proporción de partículas < 2 μm que los macroagregados; lo que pudiera conferirles una mayor estabilidad, tal como lo ha reportado Lal (1987). Sin embargo, se destaca la alta proporción de partículas con radio equivalente entre 2 y 250 μm dentro de los agregados, lo cual le confiere a los agregados una mayor susceptibilidad a la separación, dado que requieren menor cantidad de energía para que estas partículas se separen de los agregados (Poesen, 1992).

Cuadro 2. Proporciones de macroagregados y microagregados (sin corrección por arenas).

Tratamientos	Profundidad (cm)	% Macroagregados (> 250 μm)	% Microagregados (< 250 μm)
Vegetación Natural	0 - 5	56,98	43,02
	5 - 15	59,16	40,84
	15 - 30	59,39	40,61
<i>Centrosema macrocarpum</i>	0 - 5	60,85	39,15
	5 - 15	57,89	42,11
	15 - 30	60,80	39,20
<i>Brachiaria dyctioneura</i>	0 - 5	60,06	39,94
	5 - 15	62,99	37,01
	15 - 30	61,25	38,75
<i>Brachiaria decumbens</i>	0 - 5	60,22	39,78
	5 - 15	59,87	40,13
	15 - 30	58,57	41,43
Promedio		59,84a	40,16b

Cuadro 3. Distribución de tamaño de partículas en los microagregados del suelo bajo las diferentes coberturas.

Tratamiento	Profundidad (cm)	Tamaño de Partículas (μm) (% Peso seco)			
		< 2	2 - 50	50 - 100	100 - 250
Vegetación Natural	0-5	3,04	12,79	21,75	62,42
	5-15	3,83	11,67	20,67	64,33
	15-30	5,33	8,38	21,04	63,58
<i>Centrosema macrocarpum</i>	0-5	5,00	6,25	29,42	59,33
	5-15	4,83	9,75	19,17	66,25
	15-30	5,50	11,92	18,83	63,75
<i>Brachiaria decumbens</i>	0-5	4,67	10,83	24,25	60,25
	5-15	4,00	9,79	32,46	53,75
	15-30	7,46	11,50	23,54	57,50
<i>Brachiaria dyctioneura</i>	0-5	4,08	6,83	20,33	68,75
	5-15	4,25	7,92	19,58	69,17
	15-30	5,21	9,54	15,17	70,08

Cuadro 4. Distribución de tamaño de partículas en los macroagregados del suelo bajo las diferentes coberturas

Tratamiento	Prof, (cm)	Tamaño de Partículas (μm) (% Peso seco)						
		< 2	2 - 50	50 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000	1000 - 2000
Vegetación Natural	0-5	2,13	6,17	8,58	16,29	57,17	8,33	1,33
	5-15	2,63	6,29	9,25	16,50	55,83	8,00	1,50
	15-30	4,08	4,92	9,08	18,92	54,17	7,25	1,58
<i>Centrosema macrocarpum</i>	0-5	3,17	5,63	6,46	7,67	67,42	8,08	1,58
	5-15	3,50	5,58	5,17	4,50	71,83	8,33	1,08
	15-30	3,58	5,83	7,42	14,58	58,83	8,58	1,17
<i>Brachiaria decumbens</i>	0-5	3,17	7,42	6,83	15,58	57,58	8,33	1,08
	5-15	2,79	5,63	10,25	16,67	54,67	8,75	1,25
	15-30	4,92	7,58	10,67	23,58	44,50	7,33	1,42
<i>Brachiaria dyctioneura</i>	0-5	2,29	5,38	8,17	20,33	52,33	9,67	1,83
	5-15	2,88	5,63	6,33	13,75	63,42	6,92	1,08
	15-30	3,67	6,33	6,92	17,83	55,92	8,00	1,33

Características químicas y fisicoquímicas en los diferentes tamaños de agregados

El contenido de carbono orgánico (Cuadro 5), en cada uno de los tratamientos de cobertura, es mayor significativamente en los microagregados que en los macroagregados, y en ambos tipos de agregados es mayor en la capa superficial. Resultados similares fueron obtenidos por Tang *et al.* (2007) en suelos bajo arroz con labranza conservacionista. Dorioz *et al.* (1993), expresan que los polímeros orgánicos son probablemente más importantes en la estabilidad de las partículas de arena y limo que las arcillas en los microagregados.

El carbono orgánico se acumula en la capa superficial en todos los tratamientos de coberturas. Por lo general, en suelos ácidos con pH menor a 5, como en este caso (Cuadro 1), se limita la acción bacteriana y se favorece la producción de hongos, lo que da por resultado una baja eficiencia en la mineralización y humificación con la consecuente acumulación de la materia orgánica en las primeras capas de suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987). Por otro lado, Lal (1997) afirma que la labranza de conservación tiene efectos sobre el carbono orgánico, y el empleo combinado de este tipo de labranza con la presencia de residuos en superficie, favorece la acumulación de carbono orgánico en la parte superficial del suelo, porque al quedar mayores niveles de residuos en superficie, son degradados lentamente, obteniéndose un incremento de carbono orgánico, tal como lo reportan Metay *et al.* (2007) y Olson *et al.* (2005) Los tratamientos con mayor contenido de carbono orgánico resultaron ser la vegetación natural y el *Centrosema macrocarpum*.

Con respecto a la Capacidad de Intercambio Catiónico, se aprecia que en todos los tratamientos de coberturas la CIC es significativamente mayor en la capa superficial del suelo y disminuye con la profundidad (Cuadro 6). Se destaca además que los mayores valores de CIC se presentan en el suelo bajo las coberturas de *Brachiaria dyctioneura* y vegetación natural, en comparación con el resto de las coberturas evaluadas.

La CIC es mayor en la primera capa de suelo bajo sistemas conservacionistas y está muy relacionada con la presencia de residuos, debido a la producción de compuestos que contienen grupos funcionales carboxílicos y fenólicos, capaces de suministrar cargas negativas (Lal, 1997). Por otra parte, la CIC fue mayor en los microagregados que en macroagregados debido a que en los microagregados existe una mayor proporción de arcilla y de materia orgánica. Fassbender y Bornemisza (1987) afirman que la capacidad de intercambio catiónico está en función del contenido de materia orgánica y arcillas presentes en el suelo. Sin embargo, el contenido de arcilla en los dos tamaños de agregados aumenta con la

profundidad (Cuadros 2 y 3), no así la capacidad de intercambio catiónico, lo que pone en evidencia que en estos suelos la CIC depende más del contenido de materia orgánica que de la arcilla.

Cuadro 5. Contenido de Carbono Orgánico (%) en los diferentes tamaños de agregados en las distintas profundidades

<i>Agregados</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Vegetación Natural</i>	<i>Centrosema macrocarpum</i>	<i>Brachiaria dictioneura</i>	<i>Brachiaria decumbens</i>
Microagregados	0 - 5	0,89	0,64	0,55	0,52
	5 - 15	0,58	0,46	0,35	0,38
	15 - 30	0,28	0,47	0,45	0,36
Macroagregados	0 - 5	0,50	0,35	0,33	0,25
	5 - 15	0,33	0,28	0,24	0,29
	15 - 30	0,19	0,27	0,27	0,25

Cuadro 6. Capacidad de intercambio catiónico en los diferentes tamaños de agregados en las distintas profundidades

<i>Agregados</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)* (cmol_c.kg⁻¹)</i>			
		<i>Vegetación Natural</i>	<i>Centrosema macrocarpum</i>	<i>Brachiaria dictioneura</i>	<i>Brachiaria decumbens</i>
Microagregados	0 - 5	1,81	1,51	1,54	1,36
	5 - 15	1,13	0,89	0,92	0,75
	15 - 30	0,53	0,57	1,10	0,46
Macroagregados	0 - 5	1,22	1,10	1,30	1,00
	5 - 15	0,70	0,64	0,65	0,56
	15 - 30	0,32	0,35	0,79	0,33

La disponibilidad de los micronutrientes Cu, Zn, Mn y Fe para las plantas es afectada por una serie de características o propiedades como el pH del suelo, el contenido de materia orgánica, la humedad edáfica, el espacio poroso del suelo, el potencial redox, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de arcilla, la actividad biológica, entre otras (Tisdale *et al.*, 1993; Fageria *et al.*, 2002). A través de los procesos de meteorización, movilización, precipitación, lavado, acumulación y fijación en diferentes componentes del suelo, se produce una gran diferenciación en el contenido de los micronutrientes en los suelos y dentro del perfil (Fassbender y Bornemisza, 1987). La mayor concentración de los micronutrientes se encontró en los microagregados, lo que puede atribuirse al mayor contenido de arcilla, CO y CIC.

En el Cuadro 7, se aprecian variaciones en la cantidad de Fe en todos los tratamientos de cobertura, encontrándose valores que oscilan entre 12 y 55 mg.kg⁻¹. Por lo general, el contenido de Fe es relativamente alto, en comparación con otros elementos, concordando con lo expuesto por Fassbender y Bornemisza (1987). La mayor concentración de Fe se encontró en los microagregados. Se encontraron diferencias significativas al 95% según la prueba Kruskal-Wallis (Cuadro 8), observándose dos grupos estadísticamente diferentes, los cuales son, los suelos bajo los tratamientos Bde y Cm, que alcanzaron los niveles más altos de Fe, y los suelos bajo los tratamientos VN y Bdy con los niveles más bajos.

En todos los tratamientos de coberturas, este micronutriente aumenta con la profundidad, tanto en microagregados como en macroagregados. La marcada estacionalidad climática de la zona contribuye en el movimiento del Fe, ya que al disminuir el contenido de humedad en el suelo, las partículas de arcilla se recubren de agua residual hasta llegar a cristalizarse generando una disminución del pH en la

superficie de las arcillas, esta disminución hace que el Fe pueda solubilizarse y liberarse de la caolinita, precipitando en otras posiciones del perfil (Matheus, 1987).

De manera general, el contenido de Cu en los tratamientos Bde y Bdy presentó los niveles más altos, y los valores más bajos en VN y Cm (Cuadro 7). El análisis estadístico, reflejó que existen diferencias significativas entre tratamientos, profundidad y tamaño de agregados (Cuadro 8). En todos los tratamientos de coberturas, este micronutriente tiende a aumentar con la profundidad al igual que el Fe.

El cobre se halla en los suelos principalmente como ion Cu^{+2} , adsorbido por las raíces y como parte ligada a la materia orgánica. Al igual que en todos micronutrientes, la disponibilidad del Cu está condicionada al nivel de carbono orgánico en el suelo y el pH, sin embargo, la cantidad de carbono orgánico en estos suelos (Cuadro 5) disminuye con la profundidad mientras que el Cu aumenta, lo que permite inferir que en este caso, el Cu no está asociado a la materia orgánica como lo afirma Tisdale *et al.* (1993) sino que está relacionado con el contenido de arcilla presente (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Cuadro 7. Contenido de micronutrientes en los diferentes tamaños de agregados en las distintas profundidades

Tratamiento	Agregados	Profundidad (cm)	Fe mg.kg^{-1}	Cu mg.kg^{-1}	Zn mg.kg^{-1}	Mn mg.kg^{-1}
Vegetación Natural	Microagregados	0 - 5	18,32	0,33	2,17	28,32
		5 - 15	26,45	0,47	1,61	17,79
		15 - 30	25,31	0,57	0,67	4,70
	Macroagregados	0 - 5	12,57	0,21	1,35	17,91
		5 - 15	16,81	0,32	1,21	10,72
		15 - 30	16,42	0,36	0,25	2,87
Centrosema macrocarpum	Microagregados	0 - 5	38,97	0,38	1,39	14,20
		5 - 15	45,74	0,45	0,72	7,74
		15 - 30	49,57	0,50	0,52	3,46
	Macroagregados	0 - 5	29,08	0,24	1,07	10,16
		5 - 15	30,08	0,33	0,57	4,71
		15 - 30	35,29	0,38	0,34	2,31
Brachiaria dyctioneura	Microagregados	0 - 5	17,90	0,53	1,69	22,34
		5 - 15	20,53	0,63	1,45	16,56
		15 - 30	18,83	0,68	1,36	9,84
	Macroagregados	0 - 5	14,24	0,40	1,42	17,54
		5 - 15	14,45	0,48	1,05	11,32
		15 - 30	13,54	0,51	0,89	6,96
Brachiaria decumbens	Microagregados	0 - 5	40,94	0,62	1,34	12,52
		5 - 15	54,50	0,80	0,70	6,09
		15 - 30	55,69	1,07	0,47	2,50
	Macroagregados	0 - 5	29,62	0,45	0,97	8,99
		5 - 15	41,63	0,61	0,54	4,26
		15 - 30	43,22	0,81	0,33	1,74

Con respecto al Zn se aprecia que, generalmente presenta valores entre $0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $2,17 \text{ mg.kg}^{-1}$ (Cuadro 7), bajo todos los tratamientos de coberturas y todas las profundidades, los cuales pueden considerarse bajos. Al igual que Fe y el Cu, los valores de este elemento presentaron diferencias significativas tanto en los tratamientos y profundidad como en los tamaños de agregados (Cuadro 8). El Zn bajo los tratamientos VN y Bdy presenta los valores más altos en la parte superficial del suelo y bajo los tratamientos Cm, Bde y VN (macroagregados) presenta los niveles más bajos a la mayor profundidad evaluada. (Cuadro 7).

El Zn es un micronutriente poco móvil en el suelo y su disponibilidad es afectada por el pH, altos contenidos de fósforo en el suelo, contenido de materia orgánica y adsorción por las arcillas (Fassbender y Bornemisza, 1987). Posiblemente el efecto de los tratamientos contribuyó con los niveles más altos de Zn en la capa superficial y su poca cantidad en las capas subsiguientes, debido a su baja movilidad. Otro factor que pudo haber influido en la acumulación de Zn en la primera capa de suelo pudiera ser el empleo de las prácticas de labranza y el mantenimiento de residuos en la superficie, como lo señalan Follet y Peterson (1988) y Santiago *et al.* (2008), aunque Rodríguez (1995), indica que en suelos arenosos, con bajos contenidos de carbono orgánico, es posible que el Zn se pierda por lavado. Sin embargo, Domańska (2009) encontró una disminución del Zn con la profundidad, independientemente del tipo de suelo, señalando que la acumulación del este elemento es más bien biológica o se debe a procesos biogeoquímicos naturales.

Cuadro 8. Significancia obtenida en el análisis de varianza para CIC, CO y micronutrientes

Variables		Hierro (mg.kg ⁻¹)	Cobre (mg.kg ⁻¹)	Zinc (mg.kg ⁻¹)	Manganeso (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol _c .kg ⁻¹)	CO (%)
Agregados	Microagregados	34,40 ^{a1}	0,59 ^a	1,17 ^a	12,17 ^a	1,05 ^a	0,49 ^a
	Macroagregados	24,75 ^b	0,43 ^b	0,84 ^b	8,29 ^b	0,75 ^b	0,30 ^b
Coberturas	Vegetación Natural	19,31 ^b	0,38 ^c	1,22 ^a	13,72 ^a	0,95 ^a	0,46 ^a
	<i>Centrosema macrocarpum</i>	38,12 ^a	0,38 ^c	0,77 ^b	7,10 ^b	0,84 ^b	0,41 ^{ab}
	<i>Brachiaria dyclioneura</i>	16,58 ^b	0,54 ^b	1,31 ^a	14,09 ^a	1,05 ^a	0,36 ^b
	<i>Brachiaria decumbens</i>	44,27 ^a	0,73 ^a	0,73 ^b	6,02 ^b	0,74 ^b	0,34 ^b
	0 - 5	25,21 ^b	0,40 ^b	1,43 ^a	16,50 ^a	1,36 ^a	0,50 ^a
Profundidad (cm)	5 - 15	31,27 ^{ab}	0,51 ^a	0,98 ^b	9,90 ^b	0,78 ^b	0,36 ^b
	15 - 30	32,23 ^a	0,61 ^a	0,60 ^c	4,30 ^c	0,56 ^c	0,31 ^b
	Agregado	*	*	*	*	*	*
Significancia	Coberturas	*	*	*	*	*	*
	Profundidad	*	*	*	*	*	*

¹Las letras minúsculas iguales significan diferencias significativas al 95% de probabilidad según la prueba de Kruskal-Wallis, *Diferencias significativas

Estadísticamente, el Mn se comportó como los anteriores microelementos (Fe, Cu, y Zn), ya que su distribución en los tratamientos de coberturas, en los diferentes tamaños de agregados y en las profundidades estudiadas, presentó diferencias significativas (Cuadro 8). En todos los tratamientos de cobertura el Mn presentó valores que van desde 1,74 hasta 28,32 mg.kg (Cuadro 7), lo que indica que existe alta variabilidad de un tratamiento a otro. En los suelos bajo VN y Bdy se encontraron los mayores contenidos de este micronutriente, mientras que en Bde y Cm se presentaron los valores más bajos, donde se muestran los niveles más altos en Fe. Tisdale *et al.* (1993), indican que altos contenidos de Fe producen un déficit de Mn. Al igual que el Zn, el Mn en todos los tratamientos de coberturas tiende a disminuir con la profundidad, coincidiendo con lo reportado por Santiago *et al.* (2008), tanto en microagregados como en macroagregados (Cuadro 7). Tisdale *et al.* (1993), indican que existe una relación entre el contenido de materia orgánica y este micronutriente. En el Cuadro 4, se observó que el contenido de materia orgánica tiende a disminuir con la profundidad en todos los tratamientos de coberturas al igual que el Mn.

Por otra parte, la acumulación del Mn en la capa superficial del suelo, puede relacionarse con el aporte del elemento por las coberturas y acumulación de los residuos vegetales en superficie, tal como lo señalan Fassbender y Bornemisza (1987). Puede indicarse, que el empleo de labranza conservacionista propicia un aumento del Mn en la superficie del suelo, como lo señalan Follet y Peterson (1988).

CONCLUSIONES

La variación en el contenido de los micronutrientes bajo las diferentes coberturas, puede estar asociado a las diferencias en los aportes de las mismas al suelo y a las diferencias en la extracción de micronutrientes por parte de ellas; y con relación a la mayor cantidad de éstos en los microagregados, se debe a la capacidad de intercambio en retener los micronutrientes catiónicos (cargas positivas) a las arcillas presentes y a la materia orgánica, quienes aportan cargas negativas. De todos los tratamientos de coberturas, el suelo bajo VN presentó la menor disponibilidad de Fe y Cu, mientras que la mayor disponibilidad de estos micronutrientes se produjo en el suelo bajo Bde. El suelo bajo Bde y VN (macroagregados) presentaron los menores contenidos de Zn y Mn, y los mayores contenidos de estos micronutrientes se encontraron en el suelo bajo el tratamiento Bdy.

El mayor contenido de carbono orgánico se presentó en el suelo bajo VN en las capas superficiales, al igual que la CIC. Los mayores valores de estos atributos se encontraron en los microagregados.

Con respecto a la distribución de tamaño de partículas, los microagregados presentaron un predominio de arenas finas, que de manera general, aumentaron con la profundidad en los tratamientos VN, Cm y Bdy. En los macroagregados se presentó un predominio de arenas medias y finas con una tendencia a disminuir con la profundidad en todos los tratamientos de coberturas. Los contenidos de limo y arcilla aumentaron con la profundidad en los suelos bajo los tratamientos Cm, Bde y Bdy. Por el contrario, en el suelo bajo VN los contenidos de limo y arcilla disminuyeron con la profundidad en los dos tamaños de agregados.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación fue financiada por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), a través del proyecto PG 01-00-6542-2006, y por el Fondo Nacional para la Ciencia Tecnología e Innovación (FONACIT), a través del proyecto SI 97007360. Se agradece el apoyo en la fase de campo al personal de la Estación Experimental La Iguana de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez.

LITERATURA CITADA

- Analytical Software.** 2008. Statistix 9. Tallahassee, Florida
- Brady, N. C.; Weil, R. R.** 2001. The nature and properties of soils: twelfth edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 960p.
- Delgado, F.** 2001. Agricultura sostenible y mejoramiento de suelos de Ladera. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida. Universidad de los Andes. 205p.
- Dorioz, J.M; M. Robert ; C. Chenu.** 1993. The role of roots, fungi and bacteria in clay particle organization: An experimental approach. *Geoderma*, 56: 179-194.
- Domańska J.** 2009. Soluble forms of zinc in profiles of selected types of arable soils. *J. Elementol.* 14 (1):55-62
- Fageria, N.K.; V.C. Baligar ; R.B. Clark.** 2002. Micronutrients in crop protection. *Adv. Agron.* 77:185–268.
- Fageria, N.K.; V.C. Baligar; C.A. Jones.** 1997. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. Second Ed. Dekker, New York. 624p.
- Fassbender, H.; E. Bornemisza.** 1987. Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina. San José, IICA. 420 p.
- Follet, R.; G. Peterson.** 1988. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 141- 147.
- Franzluebbbers A.J.; F.M. Hons.** 1996. Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil Till. Res.* 39:229-239.

- Gee, G.W.; D. Or.** 2002. Particle-size analysis. En: J.H. Dane y G.C. Topp (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 4. SSSA. Book series N° 5, SSSA, Madison, WI. pp. 255-293.
- Guitian, F.** 1964. *Técnicas de análisis de suelos*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid. 65p.
- Heanes, D.** 1984. Determination of total organic C in soils by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15 (10):1191-1213.
- Kruskal W. H.; W. A. Wallis.** 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583–621.
- Lal, R.** 1987. *Tropical Ecology and Physical Edaphology*. John Wiley and Sons. 732 p.
- Lal, R.** 1997. Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in Western Nigeria. Soil chemical properties. *Soil Till. Res.* 42:161-174.
- Lavado R. S.; C. A. Porcelli; R. Alvarez.** 1999. Concentration and distribution of extractable elements in soil as affected by tillage systems and fertilization. *Sci. Tot. Environ.* 232: 185-191.
- 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.
- Matheus, R.** 1987. *Los suelos de la Estación Experimental "La Iguana" Sureste del estado Guárico*. Trabajo de Grado. Post-grado en Ciencia del Suelo. Maracay. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 199 p.
- Metay A.; J. A. Alves M.; M. Bernoux; T. Boyer; Jean-Marie Douzet; B. Feigl; C. Feller; F. Ma-raux; R. Oliver; E. Scopel.** 2007. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil Till. Res.* 94 (1):122-132.
- Olson K.R.; J.M. Lang; S.A. Ebelhar.** 2005. Soil organic carbon changes after 12 years of no-tillage and tillage of Grantsburg soils in southern Illinois. *Soil Till. Res.* 81(2):217-225
- Page, A.** 1982. *Methods of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of America, INC. Publisher. Wisconsin, USA. 1159 p.
- Pla, I.** 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía*, Alcance N° 32. 91p.
- Poesen, J. W.** 1992. Mechanics of overland-flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. In: A. J. Persons and Abrahams (eds), *Overland Flow: hydraulics and erosion mechanics*. London, UCL Press. pp 275-305.
- Pound, B.** 1997. Cultivos de Cobertura para la Agricultura Sostenible en América Latina. II Conferencia electrónica de la FAO sobre "Agroforestería para la Producción Animal en América Latina. p 97-120
- Qiang M.A.; W.T. Yu; Shao-Hua Zhao; L. Zhang.** 2007. Relationship between water-stable aggregates and nutrients in black soils after reclamation. *Pedosphere*, 17(4): 538-544
- Rey, J. C.** 2002. Efecto de la labranza e incorporación de residuos de cultivos en una rotación maíz-soya: Propiedades químicas del suelo. Trabajo de Ascenso. Maracay. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 84 p.
- Riera, J.; I. Guerrero.** 1984. *Caracterización Agroecológica de la región Oriental del estado Guárico*. Sub-Estación Experimental Valle de la Pascua. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, FONAIAP. Mecanografiado. 159 p.
- Rodriguez, T.** 1995. Estatus nutricional y comportamiento del Zinc en relación a las aplicaciones de cal y de fósforo (P), en suelos cultivados con maíz en el sector oeste del estado Monagas. Tesis Doctoral. Post-grado en Ciencia del Suelo. Maracay. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 138 p.
- Rothon, F.** 2000. Influence of term of soil response to no-till practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 700-709.
- Santiago A. de, Quintero J.M., Delgado A.** 2008. Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in Spanish Vertisol. *Soil Till. Res.* 98: 200-207.
- Shuman L.M.** 1988. Effect of Phosphorus level on Extractable micronutrients and their distribution among soil fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:136-141.
- Six, J; K. Paustian; E.T. Elliot y C. Combrink.** 2000. Soil structure and Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (2): 681.

- Tang X.H.; J.A. Shao; M. Gao; C.F. Wei ; D.T. Xie ; G.X. Pan.** 2007. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 18(5):1027-32
- Tisdale S.L., W. Nelson, J. Beaton y J. Havlin.** 1993. Soil fertility and fertilizers. Fifth Edition. Mac-Millan Pub. Co. New York (E.U.A.). 634p.
- Tisdall, J.M y M.J. Oades.** 1982. Organic matter and water-stables-aggregation in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Webster, R. y M. Oliver.** 1990. Statistical methods in soil and land Resource Survey. Oxford University Press. 307 p.
- Wick A.F.; P. D. Stahl; L. J. Ingram; G. E. Schuman; G. F. Vance.** 2006. Aggregate size distribution and stability under a cool season grass community chronosequence on reclaimed coal mine lands in Wyoming. En: Reclamation: Supporting Future Generations. Proceedings of the 10th Billings Land Reclamation Symposium. Richard I. Barnhisel, (Ed). Billings Land Reclamations Symposium and American Society of Mining and Reclamation. Montavesta Rd., Lexington, KY. pp 806 - 815
- Zhang, S.X.; X.B. Wang; K. Jin.** 2001. Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions, *Plant Nutr. Fert. Sci.* 7:391–396
- Zhang, R.; Y.X. Guo; C.Q. Nan.** 2004. Study of trace elements of wheat grain in different fertilizer treatments. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin.* 24:125–129.