

ASOCIACIÓN ENTRE INDICADORES DE ESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y LA MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS AGRÍCOLAS DE VENEZUELA

ASSOCIATION BETWEEN SOIL STRUCTURE STABILITY INDICATORS AND ORGANIC MATTER IN VENEZUELAN AGRICULTURAL SOILS

Mansonia A. Pulido-Moncada, Deyanira Lobo-Luján, Zenaida Lozano-Pérez

Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Avenida Universidad Vía El Limón, Maracay. Estado de Aragua. Venezuela (pulido@agr.ucv.ve), (lobod@agr.ucv.ve) (lozanoz@agr.ucv.ve)

RESUMEN

La estabilidad estructural de los suelos depende de varios factores y su evaluación se hace con diversos métodos e índices de predicción. Uno de los indicadores es la materia orgánica del suelo (MOS), ya que ayuda a mantener las partículas minerales unidas frente a las fuerzas desestabilizadoras como el humedecimiento e impacto de gotas de lluvia. Sin embargo, los estudios realizados han enfatizado la relación entre estabilidad de agregados y el contenido de MOS, sin considerar su tipo o calidad. Por tanto, en el presente estudio se evaluó la asociación entre la calidad y contenido de MOS y la estabilidad estructural de la capa superficial en cinco suelos agrícolas de Venezuela. Con un muestreo dirigido aleatorio simple se seleccionaron nueve puntos de observación en cada suelo, donde se tomaron muestras para determinar: distribución de tamaños de agregados estables al agua, distribución de tamaño de partículas, contenido y fraccionamiento de la MOS e índices de predicción de sellado y encostrado derivados de estas características. Para determinar el porcentaje de escorrentía se aplicaron lluvias simuladas en campo. Los suelos mostraron baja estabilidad estructural (a excepción del suelo El Salao), validada por los porcentajes de escorrentía superficial obtenidos en campo. Hubo una alta asociación entre los tamaños (entre 4 y 2mm y <0.25mm) de agregados estables al agua y las distintas fracciones de la MOS; la fracción de ácidos fúlvicos (CAF) tuvo una relación negativa con los agregados de menor tamaño ($R = -0.84$). Finalmente, de los índices de predicción de estabilidad estructural evaluados, sólo con el índice de encostramiento FAO se pudo establecer los niveles de estabilidad estructural en los suelos.

Palabras clave: Ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, escorrentía, índices de encostrado, índices de sellado.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) es un factor estabilizador de la estructura del suelo, ya que ayuda a mantener las partículas minerales unidas

ABSTRACT

Soil structure stability depends on several factors and its assessment is conducted using different methods and prediction indices. One of the indicators is soil organic matter (MOS) since it helps to keep mineral particles together against the destabilizing forces such as wetting and raindrop impact. However, the studies carried out have emphasized the relationship between aggregate stability and MOS content, without considering its type or quality. Therefore, the present study assessed the association between quality and MOS content and topsoil structure stability in five Venezuelan agricultural soils. With simple random sampling nine observation points were selected in each soil, where samples were taken in order to determine: stable aggregate size distribution, particle size distribution, content and fractionation of MOS, and prediction indices of surface sealing and crusting derived from these characteristics. In order to determine the runoff percentage, simulated rainfall was used under field conditions. The soils showed low structure stability (except for El Salao soil) validated by the percentage of surface runoff obtained under field conditions. There was high association between the sizes (between 4 and 2 mm and < 0.25 mm) of water-stable aggregates and the different MOS fractions; fulvic acids fraction (CAF) had a negative relationship with aggregates of smaller size ($R = -0.84$). Finally, from the structure stability prediction indices assessed, the level of soil structure stability could be established only with the FAO crusting index.

Key words: Fulvic acids, humic acids, runoff, crusting indices, sealing indices.

INTRODUCTION

Soil organic matter (MOS) is a stabilizing factor of soil structure since it helps to maintain mineral particles close together against the destabilizing forces, such as wetting and raindrop impact (Lado *et al.*, 2004). High correlation has been found between soil organic carbon content (CO) and the aggregation (Hermawan and Bomke, 1997), as well as with the formed aggregate stability (Haynes *et al.*, 1997) due to the linking action of the humic substances and other

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Marzo, 2008. Aprobado: Febrero, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 221-230, 2009.

frente a las fuerzas desestabilizadoras como el humedecimiento e impacto de las gotas de lluvia (Lado *et al.*, 2004). Se ha encontrado una alta correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo (CO) y la agregación (Hermawan y Bomke, 1997), así como con la estabilidad de los agregados formados (Haynes *et al.*, 1997), debido a la acción enlazante de las sustancias húmicas y otros productos generados por la actividad microbiana (Shepherd *et al.*, 2001). Así, al referirse al estado estructural del suelo, además de determinar las partículas minerales que dominan en su superficie, es importante cuantificar la cantidad y el tipo de materia orgánica presente. En general, la MOS promueve la estabilidad de los agregados porque reduce el hinchamiento del agregado, disminuye la permeabilidad del agregado, reduce las fuerzas destructivas del fenómeno de estallido y aumenta la fuerza intrínseca de los agregados (Fortun y Fortun, 1989). La efectividad del CO en formar agregados estables está relacionada con su tasa de descomposición, la cual a su vez está influenciada por su protección física y química de la acción microbiana (Bronick y Lal, 2005).

El contenido de MOS no siempre tiene correlación, o ésta es baja, con la estabilidad de los agregados. Lo anterior sugiere que la cantidad de MOS *per se* no es directamente responsable del número y estabilidad de los agregados. Por tanto, la estabilidad puede depender más del tipo de MOS y su disposición con respecto a las partículas minerales (Fortun y Fortun, 1989; Holeplass *et al.*, 2004).

Los compuestos de la MOS enlazan física y químicamente las partículas primarias en los agregados (Lado *et al.*, 2004). La cantidad y distribución de los agregados estables e inestables en el suelo tienen una asociación estrecha con la dinámica de la MOS y la calidad del suelo. Por ello, los problemas de erosión de un suelo se evalúan estudiando los agregados estables (Márquez *et al.*, 2004). Además, los principales factores que afectan la estabilidad de los agregados están asociados con la distribución del tamaño de partículas y a los niveles de materiales cementantes (Pagliai, 2003; Comerma *et al.*, 1992¹). Por tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar la asociación entre las fracciones de la MOS y algunos métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural en la capa superficial de los suelos, así como establecer indicadores de estabilidad relacionados con la calidad y cantidad de la materia orgánica del suelo.

products generated by microbial activity (Shepherd *et al.*, 2001). Thus, referring to the state of soil structure, besides determining the mineral particles dominating in its surface, it is important to quantify amount and type of organic matter. Generally, MOS promotes aggregate stability because it reduces aggregate swelling, decreases aggregate permeability, reduces the destructive forces of the air, and increases the intrinsic strength of aggregates (Fortun and Fortun, 1989). The effectiveness of CO forming stable aggregates is related to its decomposition rate, which in turn is influenced by physical and chemical protection of microbial action (Bronick and Lal, 2005).

The MOS content not always has correlation with aggregate stability, or this is low. The aforementioned suggests that MOS quantity *per se* is not directly responsible for number and stability of aggregates. Therefore, stability may depend more on the type of MOS and its provisions relating to the mineral particles (Fortun and Fortun, 1989; Holeplass *et al.*, 2004).

The MOS compounds link the primary particles in aggregates physically and chemically (Lado *et al.*, 2004). Amount and distribution of the stable and unstable aggregates in soil have close association with MOS dynamics and soil quality. Therefore, the soil erosion problems are evaluated studying the stable aggregates (Márquez *et al.*, 2004). Furthermore, the main factors affecting aggregate stability are associated to particle size distribution and to the levels of cementing materials (Pagliai, 2003; Comerma *et al.*, 1992¹). Therefore, the objective of the present study was to determine the association between the MOS fractions and some methods and indices to assess topsoil structure stability as well as to establish stability indicators related to quality and quantity of soil organic matter.

MATERIALS AND METHODS

Five sites in Venezuela, located in zones of agricultural importance were selected, which cover four soil orders, classified according to soil taxonomy (Soil Survey Staff, 2006): Alfisol (El Sombrero, 9° 21' 48.45" N; 67° 04' 28.36" W and Danac, 10° 21' 52.38" N; 68° 39' 17.18" W), Vertisol (El Salao, 8° 40' 06.20" N; 65° 15' 47" W), Inceptisol (Turén, 09° 19' 02" N; 69° 05' 05" W), and Entisol (Quíbor, 9° 56' 10.09" N; 69° 38' 59.15" W). Nine samples were taken from the first 5 cm of soil depth. The sampling was simple random. The air-dry samples were sieved with 4 and 2 mm diameter mesh screens in order to determine structure stability and chemicals and the ranges of particle sizes. In the latest, the

¹ Comerma, J., S. Torres, D. Lobo, N. Fernández, R. Delgado, L. Madero. 1992. Aplicación del sistema de evaluación de tierras de la FAO 1985 en la zona de Turén, Venezuela. Cuadernos de Agronomía, año 1 (1). 24 p.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cinco sitios ubicados en zonas de importancia agrícola en Venezuela, los cuales abarcan cuatro órdenes de suelos, clasificados según la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2006): Alfisol (El Sombrero, N 9° 21' 48.45"; O 67° 04' 28.36" y Danac, N 10° 21' 52.38"; O 68° 39' 17.18"), Vertisol (El Salao, N 8° 40' 06.20"; O 65° 15' 47"), Inceptisol (Turén, N 09° 19' 02"; O 69° 05' 05") y Entisol (Quíbor, N 9° 56' 10.09"; O 69° 38' 59.15"). Se tomaron nueve muestras de los primeros 5 cm de profundidad del suelo. El muestreo fue dirigido aleatorio simple. Las muestras secas al aire se tamizaron con mallas de 4 y 2 mm de diámetro, para las determinaciones de estabilidad estructural y para las determinaciones químicas y los rangos de tamaño de partículas. En estas últimas se determinó la distribución de tamaño de partículas (DTP) por el método del hidrómetro modificado (Gee y Bauder, 1986), y el contenido de carbono orgánico (CO), con el cual se determinó la materia orgánica (MOS), con el método de Walkley y Black modificado (Heanes, 1984); el CO en las fracciones de MOS fue obtenido según el método de extracción secuencial de sustancias húmicas de Schnitzer y Schuppli (1989), con la separación del carbono extraíble total (CET) en humina, ácidos húmicos (CAH) y fúlvicos (CAF). Para evaluar el estado estructural superficial de los suelos se usó el método de tamizado en húmedo de los agregados de suelo (Yoder modificado, Pla, 1983) con agregados secos al aire de diámetro equivalente entre 4 y 2 mm, e índices derivados de características de suelo para la predicción de sellado y encostrado:

1) Índice de susceptibilidad a la separación (ISP) (Florentino, 1998²):

$$ISP = \frac{\%A}{\%L + \%af + \%amf}$$

donde, *A* es el porcentaje de arcilla (< 2 μm), *L* es el porcentaje de limo (2-50 μm), *af* es el porcentaje de arena fina (100-250 μm) y *amf* es el porcentaje de arena muy fina (50 - 100 μm); usando las fracciones obtenidas por el método de Gee y Bauder (1986).

2) Índice de sellado-encostrado de los suelos (ISE) (Florentino, 1998²) calculado con base en experimentos realizados por el autor:

$$ISE = \frac{6,7433 \times \%MO}{0,55001 \times (\%L + \%amf + \%af)}$$

donde, *MO* es el porcentaje de materia orgánica, *L* es el porcentaje de limo (2-50 μm), *amf* es el porcentaje de arena muy fina (50-

particle size distribution (DTP) was determined by modified hydrometer method (Gee and Bauder, 1986), and organic carbon content (CO), which was used to determine organic matter (MOS), by means of Walkley and Black's modified method (Heanes 1984); the CO in the MOS fractions was obtained according to the method of sequential extraction of humic substances by Schnitzer and Schuppli (1989), with the separation of total extractable carbon (CET) in humina, humic (CAH) and fulvic acids(CAF). In order to assess surface soil structure the wet sieving method was used (modified Yoder, Pla, 1983) with air-dry aggregates diameter equivalent between 4 and 2 mm and indices derived from soil characteristics for sealing and crusting prediction:

1) Separation susceptibility index (ISP) (Florentino, 1998²):

$$ISP = \frac{\%A}{\%L + \%af + \%amf}$$

where *A* is percentage of clay (< 2 μm), *L* percentage of silt (2-50 μm), *af* percentage of fine sand (100-250 μm), and *amf* percentage of very fine sand (50-100 μm), using the fractions obtained by the Gee and Bauder Method (1986).

2) Soil sealing-crusting index (ISE) (Florentino, 1998²), calculated based on experiments conducted by the author:

$$ISE = \frac{6,7433 \times \%MO}{0,55001 \times (\%L + \%amf + \%af)}$$

where *MO* is percentage of organic matter, *L* percentage of silt (2-50 μm), *amf* percentage of very fine sand (50-100 μm), and *af* percentage of fine sand (100-250 μm), using the fractions obtained by the Gee and Bauder Method (1986).

3) Crusting index (IE), based on the principal factors affecting aggregate stability, particle size distribution, and the levels of cementing materials (FAO, 1980):

$$I.E.(FAO) = \frac{1,5 Lg + 0,75 Lf}{A + 10 M.O.}$$

where *Lg* is percentage of coarse silt (20-50 μm), *Lf* percentage of fine silt (2-20 μm), *A* percentage of clay (< 2 μm), and *MO* percentage of organic matter.

4) Modified FAO crusting index(1980) (Comerma *et al.*, 1992¹):

² Florentino, A. 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos. Valores críticos. *In: Manejo Sostenible de los Suelos, Manual de Prácticas.* Facultad de Agronomía UCV. Maracay-Venezuela. pp: 68-77.

100 μm) y *af* es el porcentaje de arena fina (100-250 μm); usando las fracciones obtenidas por el método de Gee y Bauder (1986).

- 3) Índice de encostramiento (IE), basado en los principales factores que afectan la estabilidad de los agregados, la distribución del tamaño de partículas y a los niveles de materiales cementantes (FAO, 1980):

$$I.E.(FAO) = \frac{1,5 Lg + 0,75 Lf}{A + 10 M.O.}$$

donde, *Lg* es el porcentaje de limo grueso (20-50 μm); *Lf* es el porcentaje de limo fino (2-20 μm); *A* es el porcentaje de arcilla (<2 μm) y *MO* es el porcentaje de materia orgánica.

- 4) Índice de encostramiento de FAO (1980) modificado (Comerma *et al.*, 1992¹):

$$I.E. = \frac{1,1255 L}{A + 10 M.O.}$$

Para validar los resultados se evaluó la escorrentía en parcelas de campo (30 cm largo; 20 cm ancho), aplicando lluvia simulada. Se usó un simulador de lluvia de campo portátil, tipo gotero, según el diseño de Nacci y Pla (1991). La intensidad de la lluvia se controló a 100 mm h^{-1} , en cada punto de observación correspondiente a aquellos donde se tomaron las muestras para las evaluaciones. Luego se calculó el porcentaje de escorrentía:

$$\%E = [(\text{lámina escurrida} / \text{lámina aplicada}) * 100]$$

donde, *E* es la escorrentía expresada en porcentaje.

Finalmente, se hizo un análisis descriptivo de los datos usando SAS (1989). El grado de asociación entre variables y métodos evaluados se calculó con los coeficientes de Spearman.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de tamaño de partículas

Los suelos de los cinco sitios presentaron diferente granulometría (Cuadro 1). En el suelo El Salao (40 %) dominaban las partículas <2 μm en y en los suelos Quíbor, Danac, Turén y El Sombrero las partículas con diámetro entre 2 y 100 μm (73, 78, 84 y 77 %). El predominio de las partículas comprendidas entre 2 a 100 μm es considerado como un factor que le confieren baja estabilidad estructural a los suelos y una alta susceptibilidad a la separación frente al impacto de las gotas de lluvia (Lobo, 1990; Pla, 1983) porque esos tamaños de partículas requieren menor

$$I.E. = \frac{1,1255 L}{A + 10 M.O.}$$

In order to validate the results, runoff in field plots (30 cm long, 20 cm wide) was assessed, applying simulated rainfall. A portable field rainfall simulator, trickling type, was used according to the Nacci and Pla design (1991). Rainfall intensity was controlled at 100 mm h^{-1} at each observation point, corresponding to those where the samples for assessments were taken. Then runoff percentage was calculated:

$$\%E = [(\text{runoff depth} / \text{rainfall depth}) * 100]$$

where *E* is runoff expressed in percentage.

Finally a descriptive analysis of data, using SAS (1989) was carried out. The association degree between variables and assessed methods was calculated with Spearman's coefficients.

RESULTS AND DISCUSSION

Particle size distribution

The soils of the five sites had different granulometry (Table 1). In El Salao soil (40%), the particles <2 μm dominated, and in Quíbor, Danac, Turén, and El Sombrero soils, the particles with diameter between 2 and 100 μm (73, 78, 84, and 77%) were dominant. Predominance of those particles comprised between 2 and 100 μm is considered a factor conferring low structure stability to soils and high susceptibility to separation, against the raindrop impact (Lobo, 1990; Pla, 1983) because these particle sizes require less energy to separate from the aggregates (Poesen, 1986). This favors fast surface sealing (process of topsoil degradation) and its subsequent effects (Table 1), requiring at least 10 % of fine particles (clay and silt) for crust formation (Poesen, 1986; Ambouta *et al.*, 1996).

Content and fractionation of soil organic matter

CO percentage classified according to MOS and the texture types (Gilabert *et al.*, 1990³) was low in Quíbor and Danac, but high in El Salao, Turén, and El Sombrero (Table 2). In these latest, the high CO contents may be attributed to the facts that: El Salao is covered by permanent pasture; in Turén crop residues are added; in El Sombrero the fallow period is long, and the natural vegetation density is high.

In carbon distribution related to organic fractions in all the soils, 50 % of CO corresponded to CET, and of these less than half are humified (fractions CAH and CAF). Huminas dominate the MOS composition, a highly recalcitrant fraction (Lorenz *et al.*, 2007). This is reflected

Cuadro 1. Distribución de tamaño de partículas de la fracción sólida del suelo <2 mm. Valores promedio y desviación estándar.
Table 1. Particle size distribution of solid soil fraction <2 mm. Mean values and standard deviation.

Suelo	Diámetro de partículas (μm)							
	< 2	2-20	20-50	50-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000
	%							
El Salao	40	24	31	21	4	2	1	1
	± 7	± 6	± 3	± 5	± 2	± 1	± 0	± 1
Quíbor	27	44	58	12	2	1	1	0
	± 2	± 4	± 4	± 5	± 0	± 0	± 0	± 0
Danac	18	22	37	36	3	2	3	2
	± 1	± 3	± 2	± 2	± 0	± 0	± 0	± 0
Turén	16	44	66	16	1	0	0	0
	± 3	± 7	± 5	± 5	± 0	± 0	± 0	± 0
El Sombrero	22	21	41	32	4	1	0	0
	± 2	± 2	± 2	± 2	± 0	± 0	± 0	± 0

energía para separarse de los agregados (Poesen, 1986). Esto favorece un rápido sellado superficial (proceso de degradación superficial de los suelos) y sus subsecuentes efectos (Cuadro 1), requiriendo al menos 10 % de partículas finas (arcilla y limo) para la formación de costras (Poesen, 1986; Ambouta *et al.*, 1996).

Contenido y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

El porcentaje de CO clasificado en función de la MOS y los tipos texturales (Gilabert *et al.*, 1990³), fue bajo en Quíbor y Danac, pero alto en El Salao, Turén y El Sombrero (Cuadro 2). En estos últimos los altos contenidos de CO pueden atribuirse a: El Salao se encuentra cubierto con pasto permanente; en Turén se incorporan residuos de cosecha; en El Sombrero los períodos de descanso son largos y posee alta densidad de vegetación natural.

En la distribución del carbono asociado a las fracciones orgánicas, en todos los suelos, 50 % del CO correspondía al CET y de éstos, menos de la mitad está humificado (fracciones CAH y CAF). Las huminas dominan la composición de la MOS, fracción muy recalcitrante (Lorenz *et al.*, 2007). Esto se refleja en

in important relations of CAH/CAF, indicating that the organic matter decomposition is difficult.

In Quíbor and Danac soils, the humina fraction was lesser than in other soils, and the CAH fraction was dominant. Predominance of CAH and humina might indicate that the MOS type present in the assessed soils does not contribute to macro-aggregate stability, since humic materials of less molecular weight (CAF) are associated to the macro-aggregates ($>250 \mu\text{m}$) and those of greater molecular weight (CAH) to micro-aggregates ($<250 \mu\text{m}$) (Fortun and Fortun, 1989; Puget *et al.*, 1995; Six *et al.*, 2000). In other words, in the evaluated soils, the organic matter type is associated to the micro-aggregates ($<250 \mu\text{m}$), and according to Piccolo and Mbagwu (1990), humic acids are the principal contributors to their stability; therefore, it does not considerably contribute to structure stability. However, the difference in aggregate stability is not always directly proportional to the changes in MO content, since this relationship may vary with the methods used to measure stability (Haynes, 1995).

Surface structural state of soil

El Salao soil showed high structure stability towards wetting, since 78 % of the water-stable aggregates

³ Gilabert de Brito, J., I. López de Rojas, R. Pérez de Roberti. 1990. Manual de métodos y procedimientos de referencia. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Versión preliminar. Maracay. CENIAP. 164 p.

Cuadro 2. Contenido de materia orgánica y su fraccionamiento en cada suelo. Valores promedio y desviación estándar.
Table 2. Organic matter content and its fractionation in each soil. Mean values and standard deviation.

Suelo	CO	CET	CAH	CAF	CSNH	CH	CAH/CAF
	g kg ⁻¹						
El Salao	19.6 ± 0.45	11.0 ± 0.21	2.4 ± 0.09	1.5 ± 0.03	6.1 ± 0.17	8.6 ± 0.31	1.68
Quíbor	9.8 ± 0.04	4.1 ± 0.06	1.4 ± 0.04	0.2 ± 0.00	1.1 ± 0.02	5.8 ± 0.06	6.25
Danac	11.1 ± 0.14	6.1 ± 0.04	2.4 ± 0.01	0.8 ± 0.02	3.4 ± 0.02	5.0 ± 0.14	3.46
Turén	19.0 ± 0.28	6.7 ± 0.12	2.6 ± 0.03	0.5 ± 0.01	2.8 ± 0.08	12.3 ± 0.23	5.26
El Sombrero	19.0 ± 0.3	10.7 ± 0.03	4.0 ± 0.01	3.4 ± 0.07	3.3 ± 0.09	8.3 ± 0.31	1.25

CO: Carbono orgánico total; CET: Carbono extraíble total; CAH: Carbono en ácidos húmicos; CAF: Carbono en ácidos fúlvicos; CSNH: Carbono en sustancias no húmicas; CH: Carbono en huminas ♦ CO: organic carbon; CET: total extractable carbon; CAH: carbon in humic acids; CAF: carbon in fulvic acids; CSNH: carbon in non humic substances; CH: carbon in humina.

las relaciones altas de CAH/CAF, indicando que la materia orgánica es de difícil descomposición.

En los suelos Quíbor y Danac, la fracción humina fue menor que en los otros suelos y la fracción CAH la dominante. El predominio de CAH y humina indicaría que el tipo de MOS presente en los suelos evaluados no contribuye a la estabilidad de los macroagregados, ya que los materiales húmicos de menor peso molecular (CAF) están asociados a los macroagregados (>250 μm) y los de mayor peso molecular (CAH) a los microagregados (<250 μm) (Fortun y Fortun, 1989; Puget *et al.*, 1995; Six *et al.*, 2000). Es decir, en los suelos evaluados, el tipo de materia orgánica presente está asociada con los microagregados (<250 μm) y, según Piccolo y Mbagwu (1990), los ácidos húmicos son los principales contribuyentes a la estabilidad de éstos; por tanto, no contribuye importantemente a la estabilidad estructural. Sin embargo, no siempre las diferencias en la estabilidad de los agregados es directamente proporcional a los cambios en el contenido de MO, ya que esta relación puede variar con los métodos usados para medir la estabilidad (Haynes, 1993).

Estado estructural superficial de los suelos

El suelo El Salao mostró una alta estabilidad estructural al humedecimiento, ya que 78 % de los agregados estables al agua estuvieron concentrados en un rango de 4-2 mm de diámetro, lo cual estuvo asociado ($R=0.41$) al alto contenido de partículas con diámetro < 2 μm . Lo contrario ocurrió en los suelos de Quíbor, Danac y Turén donde la estructuración fue baja; más del 75 % de los agregados estables tenían diámetro <0.25 mm, resaltando Quíbor y Turén donde esos agregados alcanzaron 90 % (Cuadro 3).

La prueba de medias en estas dos clases de tamaños de agregados permitió evidenciar distintos grupos donde se observa la separación entre el suelo más estable (El

were concentrated in a range of 4-2 mm diameter, which was associated ($R= 0.41$) to high particle content of <2 μm diameter. The opposite occurred in Quíbor, Danac, and Turén soils, where structuring was low; more than 75 % of the stable aggregates had diameter <0.25 mm, highlighting Quíbor and Turén where these aggregates reached 90 % (Table 3).

The test of means in these two classes of aggregate sizes allowed showing different groups where separation between more stable (El Salao) and more unstable (Quíbor) soils are observed. This indicated that Quíbor, Danac, and Turén soils had notable structure instability, which corresponded to the behavior of soils under field conditions submitted to simulated rainfall; these soils showed about 50 % surface runoff. The aforesaid indicates that, except El Salao, the assessed soils have very high instability with respect to wetting and raindrop impact, fast surface seal formation, and considerable water loss by runoff.

Indices for sealing and crusting prediction derived from soil characteristics

The FAO crusting index (IE-FAO) in Quíbor and Turén soils was >2 (Table 4), which indicates very high susceptibility to surface crusting, according to the class limits established by FAO (1980); whereas the Danac and El Sombrero soils are highly prone to crust formation, and El Salao is only moderately susceptible. These results agree with soil structure performance under field conditions. The values of the modified crusting index (mod. FAO IE) do not coincide with the stability tests, since the class limits established according to Comerma *et al.* (1992)¹ in El Salao, Danac, and El Sombrero soils prove high aggregate stability (values <1), and Quíbor and Turén soils have moderate structure stability (values of 1 to 1.5).

Besides, the separation susceptibility index (ISP) according to class limits (Florentino, 1998)² defines El

Cuadro 3. Distribución de agregados estables al humedecimiento con desviaciones estándar, pruebas de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis y porcentaje de escorrentía con lluvia simulada en campo.
Table 3. Water-stable aggregate distribution with standard deviation, Kruskal-Wallis tests of multiple comparisons and runoff percentage with rainfall simulated under field conditions.

Suelo	Distribución de agregados estables al humedecimiento (% p/p)					Escorrentía (%)
	4-2mm	2-1mm	1-0.5mm	0.5-0.25mm	<0.25mm	
El Salao	78 a	4 ab	5 bc	4 bc	9 d	32.45
	±17.5	±4.4	±4.6	±2.8	±5.9	±11.37
Quíbor	0 c	0 c	1 c	1 c	98 a	59.8
	±0.0	±0.0	±0.5	±0.0	±0.5	±15.37
Danac	2 bc	5 ab	7 ab	8 ab	78 bc	45.2
	±1.0	±1.6	±1.7	±1.3	±4.8	±14.62
Turén	1 bc	1 bc	3 bc	3 bc	93 ab	53.3
	±1.0	±0.7	±1.0	±0.9	±1.6	±10.16
El Sombrero	5 ab	15 a	17 a	16 a	46 cd	35.5
	±2.4	±2.1	±2.0	±1.6	±5.4	±15.90

Medias con letra diferente en una columna difieren significativamente ($p \leq 0.01$) ♦ Means with different letter in a column are significantly different ($p \leq 0.01$).

Salao) y el más inestable (Quíbor). Esto indicó que los suelos Quíbor, Danac y Turén presentaron una alta inestabilidad estructural, lo cual correspondió al comportamiento de los suelos en campo sometidos a lluvia simulada; estos mismos suelos presentaron alrededor de 50 % de escorrentía superficial. Lo anterior indica que, excepto El Salao, los suelos evaluados tienen una muy alta inestabilidad frente al humedecimiento e impacto de las gotas de lluvia, una rápida formación de sello superficial y altas pérdidas de agua por escorrentía.

Índices derivados de características de suelo para la predicción de sellado y encostrado

El índice de encostramiento FAO (IE-FAO) en los suelos Quíbor y Turén fue > 2 (Cuadro 4), lo cual indica una muy alta susceptibilidad a la formación de costra superficial, según los límites de clases establecido por FAO (1980); mientras que los suelos Danac y El Sombrero son altamente propensos a formación de costra, y el de El Salao sólo moderadamente susceptible. Estos resultados son congruentes con el comportamiento estructural de los suelos en campo. Los valores del índice de encostramiento de la FAO modificado (IE, FAO mod.) no coinciden con las pruebas de estabilidad, ya que los límites de clase establecidos, según Comerma

Salao soil as stable (values > 0.5) and Quíbor, Danac, Turén, and El Sombrero soils as unstable (values < 0.5). These results agree with the structure stability determined by the modified Yoder Method (Pla, 1983). The soil sealing and crusting index (ISE) does not keep a relationship with the assessed stability, since $ISE > 0.5$

Cuadro 4. Índices derivados de características de suelo como distribución granulométrica y contenido de materia orgánica, promedios y niveles de degradación por sellado y encostrado según límites de clase.

Table 4. Indices derived from soil characteristics such as granulometric distribution and organic matter content, means and levels of degradation by sealing and crusting according to class limits.

Suelo	IE FAO	IE FAO mod.	ISP	ISE
El Salao	0.7 (B)	0.4 (MB)	0.8 (M)	0.9 (M)
Quíbor	2.5 (MA)	1.2 (M)	0.4 (A)	0.3 (A)
Danac	1.8 (A)	0.7 (B)	0.3 (A)	0.4 (A)
Turén	2.4 (MA)	1.0 (B)	0.3 (A)	0.7 (M)
El Sombrero	1.4 (A)	0.4 (MB)	0.4 (A)	0.7 (M)

IE: Índice de encostrado FAO; IE, FAO mod.: Índice de encostrado FAO modificado; ISP: Índice de separabilidad de partículas; ISE: Índice de sellado y encostrado; MB: Muy Baja, B: baja, M: Moderada, A: Alta, MA: Muy alta ♦ IE: FAO crusting index; FAO mod IE: modified FAO crusting index; ISP: separation susceptibility index; ISE: sealing and crusting index; MB: very low; B: low; M: moderate, A: high; MA: very high.

et al. (1992)¹, en los suelos El Salao, Danac y El Sombrero indican alta estabilidad de agregados (valores < 1) y los suelos Quíbor y Turén poseen moderada estabilidad estructural (valores de 1 a 1.5).

Además, el índice de separabilidad de partículas (ISP) según los límites de clases (Florentino, 1998)², ubica al suelo El Salao como estable (valores > 0.5) y a los de Quíbor, Danac, Turén y El Sombrero como inestables (valores < 0.5). Estos resultados concuerdan con la estabilidad estructural determinada por el método de Yoder modificado (Pla, 1983). El índice de sellado y encostrado (ISE) no guarda relación con la estabilidad evaluada ya que el ISE > 0.5 en El Salao, Danac y El Sombrero indica que dichos suelos son estables, mientras que los de Quíbor y Turén son inestables (ISE < 0.5).

Estos índices incorporan a la MOS *per se*, mas no su calidad, así como también consideran diferentes tamaños de partículas, razones por las cuales se evidencian diferencias en las clasificaciones de los suelos de acuerdo a su estabilidad estructural, determinada por el método de Yoder modificado (Pla, 1983) o por el comportamiento de los suelos frente a lluvia simulada en campo; una excepción es el índice FAO. Según Loch y Foley (1994) y Barthes's *et al.*, (2000) hay inconsistencias en las mediciones del contenido de MOS y estabilidad de agregados y el cálculo del riesgo de degradación por erosión hídrica. Esto se puede deber a que el contenido de CO no es la única propiedad que influencia la estructura del suelo dentro de un tipo de suelo; además, una fracción específica de ésta puede ser el principal agente estabilizante y, por tanto, la medición del CO no discrimina suficientemente (Albrecht *et al.*, 1992; Janzen *et al.*, 1992).

Asociaciones entre algunas de las variables evaluadas en laboratorio

Dado que el tamaño de agregados estables del suelo fue una característica importante para separar el comportamiento de los suelos, se determinó la relación entre éstos y el tipo y contenido de MOS. En el Cuadro 5 se muestra un resumen de las asociaciones entre las variables; en algunos casos el grado de asociación fue bajo (R < 0.5), pero se considera debido a su nivel de significancia (p < 0.01). Se determinó una asociación

in El Salao, Danac, and El Sombrero indicates that those soils are stable while those of Quíbor and Turén are unstable (ISE < 0.5).

These indices include MOS *per se*, but not its quality, as well as they consider different particle sizes, reasons why differences in soil classifications become evident, according to their structure stability, determined by the modified Yoder Method (Pla, 1983) or by soil performance under artificial rainfall conditions in field; the FAO index is an exception. According to Loch and Foley (1994) and Barthes's *et al.* (2000), there are inconsistencies in MOS content measurements and aggregate stability as well as the calculation of degradation risk by water erosion. This may be due to the fact that the CO content is not the only property influencing the soil structure within a soil type; besides, a specific fraction of this structure can be the principal stabilizing agent, and therefore, the CO measurement is not discriminating enough (Albrecht *et al.*, 1992; Janzen *et al.*, 1992).

Associations between some of the variables assessed under laboratory conditions

As the size of soil stable aggregates was an important characteristic for separating soil behavior, the relationship between these and MOS type and content was determined. A summary of the associations among the variables is shown Table 5; in some cases the association degree was low (R < 0.5), but it is considered due to the significance level (p < 0.01). Negative association (R = -0.55; p ≤ 0.001) was determined between MOS and the percentage of water-stable aggregates with diameter < 0.25 mm, but between this and the percentage of water-stable aggregates with diameter 4-2 mm (R = 0.59; p ≤ 0.01) there was a positive association. The high association degree between the humic fractions of MOS (CAF and CAH) and the water-stable aggregates (4-2 mm and < 0.25 mm) is evident. The CAF fraction associated positively with the largest size aggregates (R = 0.81; p ≤ 0.01) and negatively with those of the smallest size (R = -0.84; p ≤ 0.01); however, a negative association was found (R = -0.51; p ≤ 0.01) between CAH and the micro-aggregates, which does not correspond to the facts

Cuadro 5. Coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman (p ≤ 0.01) entre las distintas fracciones de materia orgánica y los agregados superficiales del suelo.

Table 5. Spearman's non-parametric correlation coefficient (p ≤ 0.01), between different fractions of organic matter and topsoil aggregates.

	Materia orgánica	Carbono extraíble total (CET)	Ácidos húmicos (CAH)	Ácidos fúlvicos (CAF)	Sustancias no húmicas (CSNH)
Agregados estables al agua entre 2 - 4mm	0.59	0.85	0.48	0.81	-0.94
Agregados estables al agua < 0.25mm	-0.55	-0.85	-0.51	-0.83	-0.82

negativa ($R = -0.55$; $p \leq 0.001$) entre la MOS y el porcentaje de agregados estables al agua con diámetro < 0.25 mm, pero hubo una asociación positiva entre ésta y el porcentaje de agregados estables al agua con diámetro 4-2 mm ($R = 0.59$; $p \leq 0.01$). Es evidente el alto grado de asociación entre las fracciones húmicas de la MOS (CAF y CAH) con los agregados estables al agua (4-2 mm y < 0.25 mm). La fracción de CAF se asoció positivamente con los agregados de mayor tamaño ($R = 0.81$; $p \leq 0.01$) y negativamente con los de menor tamaño ($R = -0.84$; $p \leq 0.01$); además hubo una asociación negativa ($R = -0.51$; $p \leq 0.01$) entre los CAH y los microagregados, lo cual no corresponde con lo reportado por Fortun y Fortun (1989) y Tisdall y Oades (1982).

El predominio de las fracciones CAH y huminas explica que los suelos presenten una elevada proporción de agregados con diámetro < 0.25 mm, excepto el suelo El Salao, cuya estabilidad se atribuiría al predominio de partículas $< 2 \mu\text{m}$. En los suelos Quíbor, Danac, Turén y El Sombrero los altos contenidos de partículas de 2-100 μm (70-82 %) le confieren una alta susceptibilidad a la desagregación al humedecimiento e impacto de gotas de lluvia, relacionado a su vez con la escasa contribución de los compuestos orgánicos estabilizadores (predominio de CAH) (Cuadro 5).

CONCLUSIONES

Los suelos de cinco sitios de Venezuela mostraron alta variabilidad en la calidad de la MOS, característica altamente asociada con el estado estructural de los suelos, e independiente de la cantidad de MOS *per se*. Por ello, se debe considerar la calidad del compuesto orgánico que se incorpore a un suelo con el objeto de incrementar su estabilidad estructural.

Los porcentajes de agregados estables al agua > 2 mm y < 0.25 mm, las fracciones químicas de la MOS, y la proporción de partículas de 2-100 μm , guardan relación con las medidas realizadas con lluvia simulada en campo, que fueron buenos indicadores del estado estructural superficial de los suelos. El índice de encostramiento FAO fue el que mejor describió la condición estructural evaluada en campo, por lo que se usa en el ámbito mundial.

LITERATURA CITADA

- Albrecht, A., L. Rangon, et P. Barret. 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cahiers ORSTOM, Série Pédologie 27: 121-133.
- Ambouta, J. M. K., C. Valentin, et M. R. Laverdière. 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. Sécheresse 7: 269-275.
- Barthe's, B., A. Azontonde, B. Z. Boli, C. Prat, and E. Roose. 2000. Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil

reported by Fortun and Fortun (1989) and Tisdall and Oades (1982).

Predominance of the CAH fractions and huminas explains that the soils have a considerable proportion of aggregates with diameter < 0.25 mm, except El Salao soil, whose stability might be attributed to the predominance of particles $< 2 \mu\text{m}$. In Quíbor, Danac, Turén, and EL Sombrero soils the high particle contents of 2-100 μm (70-82 %) confers high susceptibility to disintegration by wetting and raindrop impact, related, in turn, to the scarce contribution of stabilizing organic compounds (CAH predominance) (Table 5).

CONCLUSIONS

The soils of five Venezuelan sites showed high variability in MOS quality, characteristic strongly associated to the state of soil structure and independent of MOS content *per se*. Therefore, the quality of the organic compound, which incorporates to a soil with the purpose of increasing its structure stability, must be considered.

The percentages of water-stable aggregates > 2 mm and < 0.25 mm, the chemical MOS fractions, and the proportion of 2-100 μm particles keep the relation with the measurements carried out with rainfall simulated under field conditions, which were good indicators of the state of topsoil structure. The FAO crusting index was the one that best described the structure condition assessed under field conditions; that is why it is used worldwide.

—End of the English version—



- aggregate stability in three tropical regions, Benin, Cameroon, Mexico. Eur. J. Soil Sci. 51: 485-495.
- Bronick C. J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma 124: 3-22.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- Fortun, C., y A. Fortun. 1989. Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización de los agregados del suelo. Edafol. Agrobiol. 48: 185-204.
- Gee G. W., and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods (second ed.). American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI. pp: 383-411.
- Haynes, R. J. 1993. Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. J. Soil Sci. 44: 261-270.
- Haynes, R. J., R. S. Swift, and K. C. Stephen. 1997. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter, water stable and clod porosity in a group of soils. Soil Till. Res. 19: 77-81.
- Heanes, D. 1984. Determination of total organic- C in soil by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. Comm. Soil Sci. Plant. Anal. 15: 1191-1213.

- Hermawan, B. and A. Bomke. 1997. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. *Soil Till. Res.* 44: 109-120
- Holeplass, H., B. R. Singh, and R. Lal. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotation and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70: 167-177.
- Lado, M., A. Paz, and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 935-942.
- Lobo, D. 1990. Pérdidas de agua, suelo y nutrientes en un Alfisol de Chaguaramas, Estado Guárico, bajo diferentes coberturas. *Agron. Trop. Serie Edafológica* 40 (1-3): 79-89.
- Lorenz K., R. Lal, C. M. Preston, and K. G. J. Nierop. 2007. Strengthening the soil organic carbon pool by increasing contributions from recalcitrant aliphatic bio (macro) molecules. *Geoderma* 142: 1-10
- Janzen, H. H., C. A. Campbell, S. A. Brandt, G. P. Lafond, and L. Townley-Smith. 1992. Light fraction organic matter in soils from long term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1799-1806.
- Loch, R. J., and J. L. Foley. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: comparison with tests of water stability and relationship with field measurements and infiltration. *Aust. J. Soil Sci.* 32: 701-720.
- Márquez, C. O., V. J. García, C. A. Cambardella, R. C. Schultz, and T. M. Isenhardt. 2004. Aggregate size stability distribution and soil stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 725-735.
- Nacci, S., y I. Pla. 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. SerieB, N° 17. Maracay (Venezuela). 40 p.
- Pagliai, M. 2003. Soil surface sealing and crusting-soil compaction. *In: College on Soil Physics. International Centre for Theoretical Physics. Trieste, Italy.* 24 p.
- Piccolo, A., and J. S. C. Mbagwu. 1990. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregate stability and molecular sizes of humic substances. *Plant and Soil* 123: 27-37.
- 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. Universidad Central de Venezuela. 91 p.
- Poesen, J. 1986. Surface sealing on loose sediments: the role of texture, slope and position of stones in the top layer. *In: Callebaut F. D. Gabriels, and M. De Boodt (eds). Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting. Proc. of Symposium, Gent, Belgium.* pp: 354-362.
- Puget, P., C. Chenu, and J. Balesdent. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils, *Eur. J. Soil Sci.* 46: 449-459
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/ATAT® User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc. 846 p.
- Schnitzer, M., and P. Schuppli. 1989. Methods for sequential extraction of organic matter from soils and soil fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1418-1424.
- Shepherd, T. G., S. Saggar, R. H. Newman, C. W. Ross, and J. L. Dando. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fraction in New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.* 39: 465-489.
- Six, J., K. Paustian, and E. T. Elliott, C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys of soil taxonomy. Tenth Edition. United States Department of Agriculture (USDA). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Washington, D. C. 332 p.