
Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos

Methods and index for evaluating soil structure stability

Deyanira Lobo L.¹ y Mansonia Pulido M.¹

¹Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología
lobod@agr.ucv.ve; pulidom@agr.ucv.ve

RESUMEN

La estructura es una propiedad del suelo que no tiene una definición universalmente aceptada. De igual manera, hay desacuerdo con relación a los métodos usados para su caracterización y la evaluación de su comportamiento. La caracterización de la estructura puede realizarse mediante apreciaciones cualitativas (tipo, clase y grado de desarrollo de la estructura) y determinaciones cuantitativas (densidad aparente, porosidad, distribución de tamaños de poros). Dado que la estructura del suelo es una condición compleja que está asociada a muchos

ABSTRACT

The soil structure does not have a universally accepted definition. There is also disagreement on the methods applied for its characterization and the evaluation of its behavior. The soil structure can be characterized by qualitative indicators (type, class and grade of development of the structure) and by quantitative determinations (bulk density, total porosity and pore size distribution). Taking into account that soil structure is complex and it is associated to many agronomic and environmental processes, it is of particular importance to evaluate its stability to both external forces (raindrops,

procesos agronómicos y ambientales, es de particular importancia evaluar su estabilidad frente a fuerzas externas (gotas de lluvia, presiones mecánicas) e internas (fragmentación por explosión de aire atrapado como resultado de un rápido humedecimiento e hinchamiento diferencial). La selección de los métodos de evaluación y la interpretación de los resultados depende del propósito de la medición. El método más comúnmente usado para medir la estabilidad de los agregados es el tamizado en húmedo. Otros métodos están basados en la simulación del impacto de las gotas de lluvia, dispersión ultrasónica, rompimiento de los agregados por inmersión en agua, o el tamizado en seco. En este estudio, se describen algunos métodos directos e indirectos e índices que permiten valorar la estabilidad de los agregados y su comportamiento frente a la acción del agua.

Palabras clave: tamizado en húmedo, sellado superficial, índices de estabilidad, tamaño de agregados

mechanical pressures) and internal forces (fragmentation due to entrapped air by quick wetting, and differential swelling). The selection of the methods for the characterization of soil structure and the interpretation of their results depend on the purpose of the measurement. The most common method used for the aggregate stability measurement is the wet sieving. Other methods are based on the simulation of raindrop energy impact, ultrasonic dispersion, or breakdown of aggregates after sudden immersion in water, or dry sieving. In this work, some direct and indirect methods and indexes are described that allow evaluating the soil structure stability and its behavior under the action of water.

Key words: wet sieving, surface sealing, stability indices, stable aggregate sizes

INTRODUCCIÓN

Puede entenderse como estructura del suelo, el ordenamiento de las partículas individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio poroso que llevan asociado, todo como resultado de interacciones físico-químicas entre las arcillas y los grupos funcionales de la materia orgánica (Porta *et al.*, 1999). Por otro lado, se refiere al tamaño, forma y arreglo de partículas sólidas y poros, continuidad de poros y su capacidad para retener y transmitir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas, así como la habilidad para garantizar el crecimiento y desarrollo de raíces (Lal, 1991).

A su vez los agregados son las unidades estructurales del suelo, son grupos de partículas minerales y orgánicas que están ligadas o unidas unas a otras más fuertemente que con partículas adyacentes, y están separadas entre sí por poros o por superficies de debilidad (Porta *et al.*, 1999).

Desde el punto de vista cualitativo la estructura del suelo puede ser estudiada, haciendo énfasis en los aspectos morfológicos, que distingue diferentes tipos de estructura; tales como: la forma (grano simple, granular, laminar, blocosa angular, blocosa subangular, prismática, columnar y masiva), el tamaño (muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa) y el grado de desarrollo de la estructura (sin estructura, débil, medio y fuerte) en función de la fuerza que debe ejercerse para romperla (Soil survey división staff, 1995).

La estructura también se puede valorar desde el punto de vista cuantitativo mediante, índices estructurales tales como: la densidad aparente, la porosidad total, la distribución de tamaños de poros y la consistencia, y a través de la evaluación de la estabilidad de los agregados.

La estabilidad de la estructura influye directa e indirectamente otras propiedades físicas y químicas del suelo y puede ser usada como un indicador de la degradación de los suelos (Cerdeira, 2000). La cuantificación de los cambios que ocurren en la estructura del suelo (desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo) son el punto de partida en el estudio de los procesos de degradación física de los suelos y su control (Pagliari *et al.*, 2004). Uno de los indicadores del estado estructural del suelo es la estabilidad de los agregados (Mbagwu, 2004), debido a que cuando esta sufre una disminución marcada, producto de la aplicación de fuerzas externas como el impacto de gotas de lluvia, la acción de presiones mecánicas externas, o internas como la fragmentación de agregados por explosión de aire atrapado por rápido humedecimiento e hinchamiento diferencial, se incrementa la degradación de los suelos e influye en el movimiento y retención de agua, erosión, sellado y encostrado, reciclaje de nutrientes y penetración de raíces (Bronick y Lal, 2004; Gabriels *et al.*, 1997).

Dentro de los procesos de deterioro físico más ampliamente extendido en las zonas agrícolas de Venezuela se encuentran el sellado y encostrado superficial y la compactación de suelos (Pla, 1993). Estos procesos toman importancia ya que ocasionan principalmente un aumento en la densidad aparente y una disminución de la porosidad, lo cual se traduce en la disminución de la conductividad hidráulica que da origen a problemas de anegamiento, pérdidas de agua y nutrientes por escorrentía y erosión (Le Bissonnais, 1996; Nacci y Pla, 1991), y en un efecto negativo en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo limitando el desarrollo y profundidad radical.

PROCESOS ASOCIADOS AL DETERIORO FÍSICO DE LOS SUELOS

- **Sellado y encostrado del suelo**

El término "**sellado del suelo**" generalmente se refiere al desarrollo de una capa superficial de suelo con una reducción significativa en la porosidad y permeabilidad como resultado de un rápido humedecimiento del suelo seco, del impacto de las gotas de lluvia, depósito del material fino del suelo, dispersión química o alguna combinación de estos procesos (Chartres y Geeves, 1998; Awadhwal y Thierstein, 1985).

El secado posterior del suelo puede resultar en una capa con una alta resistencia mecánica, la cual es comúnmente denominada "encostramiento o costra del suelo". Los sellos y costras del suelo no son otra cosa que una forma de degradación de la estructura del suelo superficial; no obstante, dado que ocurren en la interfase suelo/atmósfera, ellos impactan significativamente el intercambio hídrico y gaseoso entre los dos medios e interfieren en la germinación y desarrollo de las plantas (Chartres y Geeves, 1998).

También la literatura especializada señala que los términos sellado y encostramiento del suelo, algunas veces usados como sinónimos, se refieren a cierto estado de compactación del suelo, ya que denotan una reducción en porosidad y un incremento en densidad. Tal como se comentó anteriormente, muchos investigadores han establecido distinciones asociando el encostramiento con el estado seco del suelo, mientras que el sellado está más relacionado con el estado húmedo del suelo (Gabriels *et al.*, 1997).

Factores internos asociados al sellado y encostrado de los suelos

La formación de sellos y costras en suelos desnudos o con mal manejo dependen de factores internos como granulometría del suelo, mineralogía de las arcillas, contenido de materia orgánica, contenidos de sesquióxidos y otros agentes cementantes, agentes dispersantes como el Na y Mg intercambiables, y contenido de agua en el suelo, además de los factores externos como el clima (Pagliai, 2003; Wakindiki y Ben-Hur, 2002; Martínez-Gamiño y Walthall, 2000).

Cada uno de estos factores resulta importante en la formación de sello superficial y más aun la combinación de ellos. En este sentido, la distribución de tamaño de partículas del suelo es uno de los factores claves en la determinación de la estabilidad de agregados, tasa de infiltración, arrastre y erosión. De acuerdo a Bradford y Huang (1992), las partículas predominantes en el suelo se muestran como una de las variables de suelo más importantes en la formación de sellado superficial y salpique. Dicha relación ha sido demostrada de forma directa e indirecta en diversas investigaciones.

Los procesos de sellado comienzan a manifestarse en los suelos de textura franco arenosa, sobre todo en los que poseen alta proporción de arenas finas y muy finas (Pagliai, 2003; Wakindiki y Ben-Hur, 2002; Martínez-Gamiño y Walthall, 2000), siendo los suelos más susceptibles a este proceso de degradación aquellos con altos contenidos de limo, debido a su elevada susceptibilidad a la dispersión y, los suelos con altos contenidos de arcilla (Pagliai, 2003). Aunque es importante considerar la mineralogía de las arcillas presentes.

Factores externos asociados al sellado y encostrado de los suelos

En Venezuela la mayoría de los suelos agrícolas de los Llanos Centrales y Occidentales con predominio de partículas de arena fina, muy fina y limo, presentan estos procesos de degradación (Bravo y Andreu, 1995 y Lozano *et al.*, 2000). Sin embargo, los sellos formados no siempre producen costras lo suficientemente gruesas y resistentes para limitar la emergencia de plántulas, especialmente cuando los contenidos de arcillas son bajos.

Entre las prácticas de manejo del suelo, la labranza tiene una fuerte influencia en la formación del sellado y encostrado. El uso de la labranza convencional y cultivos de ciclo corto a largo plazo dan origen a un descenso en el contenido de materia orgánica, debido a la poca incorporación de residuos vegetales; asociado a esto está un alto descenso en la población de los microorganismos del suelo. Consecuentemente decrece rápidamente la estabilidad de los agregados del suelo e incrementa la susceptibilidad al sellado, siendo suficiente un evento de lluvia para el inicio de la formación del mismo (Pagliai, 2003).

El sellado ocurre principalmente en sistemas de labranza donde el suelo queda desnudo y los agregados están sujetos al impacto de las gotas de lluvia, por ejemplo, después de la preparación de la cama de la semilla y durante la emergencia de la plántula, justo cuando las condiciones del suelo son críticas para el desarrollo del cultivo. Generalmente, bajo condiciones cultivadas, el proceso de sellado lleva a una alteración de la microtopografía lo que genera un mayor potencial de arrastre. En la mayoría de los sistemas de producción mencionados es usual encontrar, en pendientes bajas, costras por deposición asociadas con costras estructurales y en pendientes altas costras por erosión (Chartres y Greeves, 1998).

Las lluvias son el principal agente formador de un sello superficial. Las características de las lluvias que tienen importancia en este proceso son: intensidad, frecuencia, tamaño de gota y energía cinética de las gotas. Sólo lluvias intensas, cuyas gotas son grandes y alcanzan alta energía cinética, tienen potencial para producir sellado y encostramiento, siempre y cuando el suelo también sea susceptible. Cabe destacar que el riego por aspersión también puede causar encostramiento en suelos inestables (Pagliai, 2003).

- **Compactación de suelo**

El término "**compactación de suelo**" se refiere a un aumento en su densidad, o disminución de volumen, debido a fuerzas externas, que se presentan en el suelo superficial (capa arable), o más comúnmente a la profundidad de las repetidas labores de cultivo; es provocada por la combinación del deterioro gradual en los niveles de materia orgánica y de la actividad biológica en suelos cultivados, y por las labores mecánicas de cultivo y tráfico de maquinaria y animales (Pla, 1996).

El mismo autor señala que, el principal efecto de la compactación es la reducción del volumen de poros y la redistribución del tamaño de poros. Estos cambios afectan en mayor o menor medida la capacidad de aireación e intercambio gaseoso, retención de agua, conductividad hidráulica, resistencia mecánica a la penetración, con el consecuente efecto sobre los procesos químicos y biológicos.

La compactación del subsuelo favorece también la erosión en cárcavas, y los deslizamientos y movimientos en masa de suelo en zonas de alta pendiente y clima húmedo o con lluvias concentradas, al restringir la percolación profunda del exceso de agua infiltrada, que puede así llegar a saturar el suelo por encima de la capa compactada.

Por otra parte, la compactación del suelo puede ser caracterizada evaluando varias propiedades físicas del suelo como: densidad aparente (Mg m^{-3}), espacio poroso total (%), distribución de tamaños de poros (%), conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}), resistencia mecánica a la penetración (kPa). Los parámetros más directamente relacionados con el proceso son: la densidad aparente y la porosidad total, sin embargo, su uso como indicadores de compactación no permite comparar diferentes suelos, ni hacer las mismas interpretaciones para todos los suelos.

En Venezuela, la compactación de los suelos bajo cultivos intensivos, es una de las formas más generalizadas de degradación de suelo, la cual está en franco crecimiento, principalmente en áreas de los Llanos Occidentales y Orientales, por el uso excesivo de maquinarias agrícolas.

Muchas prácticas son propuesta para la recuperación y mantenimiento de las propiedades del suelo, basadas en una labranza conservacionista que contempla incrementar el contenido superficial de la materia orgánica del suelo, mayor eficiencia en el control de las pérdidas de suelo, conservación de la humedad, menores costos de producción, y rápida adopción, por lo que es potencialmente transferible y socialmente aceptable.

Finalmente, una descripción correcta de las características y propiedades de un suelo y su relación con los factores de entorno, se hace factor necesario para la designación de un uso eficiente de cada suelo, con el manejo de la relación suelo – clima – planta. En este sentido, la evaluación de la estructura y su estabilidad constituye un punto de partida importante para poder identificar las causas del deterioro, tales como, las provenientes de la acción de fuerzas externas sobre la capa superficial, o aquellas

asociadas a procesos químicos como la disolución de sales y cementos, o a la ineficacia de los agentes orgánicos debilitados, entre otras.

MÉTODOS E ÍNDICES PARA EVALUAR LA ESTRUCTURA DEL SUELO Y SU ESTABILIDAD

Los métodos pueden clasificarse en métodos directos y métodos indirectos. Dentro de los métodos directos se mencionan aquellos relacionados con el estudio y evaluación de los cambios morfológicos de la estructura del suelo (tamaño y forma de los agregados, arreglo espacial y morfología de los poros, continuidad de los poros, etc.), los cuales no se abordarán en este artículo. Los métodos indirectos pueden clasificarse en: los que se relacionan con el decrecimiento en la capacidad de infiltración, los que tienen que ver con el incremento de la resistencia superficial y los derivados de características y propiedades de suelo.

Es importante destacar que no existe un método único para evaluar la estructura y su estabilidad, tampoco un índice único que represente el estado o la estabilidad estructural; no obstante, se presentan a continuación una serie de métodos e índices útiles para describir las condiciones estructurales de los suelos

Métodos directos.

Métodos basados en el tamizado en húmedo de los agregados

1. Método de Yoder (1936)

Uno de los métodos más ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad estructural de los suelos, es el tamizado en húmedo, mediante el cual se determina el porcentaje de agregados estables al agua, al someter muestras de agregados entre 6 y 8mm de diámetro equivalente, secos al aire, a movimientos ascendentes y descendentes en un agitador mecánico, utilizando un juego de tamices con apertura de malla de 6,3; 4,00; 2,00; 1,00; 0,5 y 0,25mm.

Existen diferentes aspectos que pueden crear confusión en la interpretación de los resultados: los pretratamientos que se aplican a las muestras de agregados, el contenido de humedad antecedente y las correcciones por el contenido de arena (Six *et al.*, 2000)

Algunos investigadores han usado diferentes pretratamientos, tales como: seco al aire y luego el humedecimiento de los agregados por capilaridad, seco al aire y humedecimiento controlado por tensión, seco al aire y humedecimiento rápido (slaked), y húmedo a capacidad de campo (Beare y Bruce, 1993; Cambardella y Elliott, 1993; Six *et al.*, 1998; Márquez *et al.*, 2004).

El humedecimiento por capilaridad, antes del tamizado en húmedo, produce una ruptura mínima debido a que en los agregados húmedos no se aumenta la presión en los poros y el aire sale con un rompimiento mínimo del mismo. En contraste, el pretratamiento con humedecimiento rápido causa un rompimiento considerable de los agregados. Cuando el agregado seco al aire es sumergido en el agua, el aire que está atrapado en los poros es rápidamente desplazado por el agua, aumentándose en este caso la presión interna causando, en consecuencia, el rompimiento de los mismos (Cambardella y Elliott, 1993; Gale *et al.*, 2000).

Investigadores como Márquez *et al.*, (2004) plantean la necesidad de hacer la corrección por arenas para la interpretación de los resultados, cuando se realiza la distribución de agregados estables, ya que las partículas de arena pueden estar en tres diferentes formas: i) dentro de los agregados estables, ii) dentro de agregados inestables que puede ser redistribuida fácilmente y iii) arena libre.

2. Método de Yoder modificado (descrito en Pla, 1983)

Pla (1983) propone el uso de agregados entre 2 y 4mm de diámetro equivalente y la secuencia de tamices: 2mm, 1mm, 0,5mm y 0,25mm. Los resultados se expresan en porcentaje e incluyen la corrección por arenas.

Valores elevados de porcentaje de agregados estables al agua con diámetros > 1mm, se consideran como favorables para cualquier tipo de suelos. La susceptibilidad de los suelos a la erosión será menor

cuanto mayor sea el porcentaje de agregados estables al agua de diámetros > 2mm (Pla, 1983). Florentino (1998) propone la interpretación de los resultados de esta determinación, en función de la capacidad de infiltración y susceptibilidad a la erosión (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estabilidad de los agregados al agua (%) método tamizado en agua de Yoder modificado

Nivel	¹ Agregados estables al agua con diámetro >1 mm	² Agregados estables al agua con diámetro >0,5 mm
Muy alta	>60	>75
Alta	40-60	60-75
Media	20-40	45-60
Baja	10-20	30-45
Muy baja	<10	<30

¹ Diámetro considerado para evaluar la capacidad de infiltración de agua en el suelo

² Diámetro considerado para evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión. Fuente: Florentino, 1998.

3. Diámetro medio ponderado de los agregados tamizados en agua (DMP) (Kemper y Rosenau, 1986) (modificado por Pla, 1983).

$$DMP = \sum_{i=1}^n D_i * P_i$$

Expresa la relación entre el diámetro medio de una clase de tamaño dada y la fracción de peso de esta clase de tamaño, respecto al peso total en la muestra de suelo. Para su determinación se hace uso de la información generada en la prueba de tamizado en húmedo de los agregados del suelo.

Donde:

DMP = diámetro medio ponderado

D_i = diámetro medio de una clase de tamaño dada

P_i = fracción de peso de la clase de tamaño correspondiente

La utilización del DMP como indicador de la estabilidad estructural es cuestionable cuando la distribución de agregados estables al agua no es simétrica (Six et al., 2000). Por esta razón, algunos autores recomiendan usar la media geométrica del diámetro de agregados estables (Castro Filho, *et al.*, 2002).

4. Partículas menores de 250µm que se separan de los agregados tamizados en agua (El Swaify y Dangler, 1982).

Expresa el porcentaje de partículas que pasan a través del tamiz con aperturas de 250µm (incluyendo microagregados y partículas menores de 250µm) durante el tamizado en húmedo de los agregados del suelo, por ello se calcula en base a los resultados obtenidos en esta prueba.

En la medida que este valor es mayor, se asume que la estabilidad de los agregados será menor, por lo tanto el suelo será más susceptible al sellado y encostrado, y en consecuencia

a ser removido por el agua de escorrentía.

5. Índice de Estabilidad Estructural (EE)

Este índice propuesto por Topp et al., (1997) relaciona el peso de agregados estables al agua con diámetro equivalente $> 0,25\text{mm}$ con el peso de agregados entre 1 y 2mm de diámetro, ya que se utiliza el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986), pero usando agregados entre 1 y 2mm de diámetro equivalente. Altos valores del Índice EE están relacionados con una mayor estabilidad de los agregados.

$$EE = \frac{MAE > 0,25\text{mm} - arenas}{MATotal (1 - 2\text{mm}) - arenas}$$

Donde:

EE= Estabilidad Estructural

MAE= Masa de Agregados Estables

MATotal= Masa de Agregados Total

6. Índice de Estabilidad estructural (SI)

Este índice fue propuesto por De Leenheer y De Boodt (1959) con un procedimiento similar al propuesto por Yoder, mediante el cual se determina el diámetro medio ponderado de agregados tamizados en seco y en húmedo. Siendo el índice de estabilidad 'SI', cuya clasificación se presenta en el cuadro 2.

$$SI = \left[\frac{1}{(DMP_{seco} - DMP_{húmedo})} \right] * 100$$

Donde:

DMP_{seco} = Diámetro medio ponderado de agregados tamizados en seco

$DMP_{húmedo}$ = Diámetro medio ponderado de agregados tamizados en húmedo

Cuadro 2. Clases de estabilidad de agregados de acuerdo al Índice de estabilidad (De Leenheer y De Boodt, 1958)

SI	Estabilidad de Agregados
> 1	Excelente
0,8 – 1	Muy buena
0,66 – 0,8	Buena
0,5 – 0,66	Insatisfactoria
< 0,5	Mala

7. Índice de inestabilidad estructural (Henin et al, 1958)

Los autores proponen un índice de inestabilidad (I_s) obtenido mediante la determinación de los agregados retenidos sobre un tamiz de 0,2mm, después de pre-tratamientos con alcohol, benceno y agua.

$$I_s = \frac{\text{Arcilla} + \text{Limo}}{((\text{ASA} + \text{BSA} + \text{WSA})/3) - 0.9\text{Arena}}$$

Donde:

Arcilla, Limo y Arena son los % de arcilla, limo y arena en la suspensión tratada con benceno o agua

ASA= % de agregados estables después del tratamiento con alcohol

BSA= % de agregados estables después del tratamiento con benceno

WSA= % de agregados estables después del tratamiento con agua

El índice I_s puede variar desde valores < 0,1 para suelos estables, hasta > 100 para suelos muy inestables.

Índices de sellado absoluto y relativo (Nacci y Pla, 1991)

Para obtener este índice se mide la mínima conductividad hidráulica saturada del suelo con impacto de gotas (KCS) y sin impacto de gotas (KSS), para lo cual, se utiliza un simulador de lluvia tipo gotero diseñado por Nacci y Pla (1991). Para ambas evaluaciones (KSS y KCS) la muestra de suelo consiste en 70g de agregados entre 2 – 4mm de diámetro secos al aire, cantidad necesaria para alcanzar una capa de suelo aproximadamente de 1cm de espesor en embudos de porcelana de 71 cm² de área.

$$ISA = KCS$$

$$ISR = \frac{KSS}{KCS}$$

Donde:

ISA = Índice de Sellado Absoluto.

ISR = Índice de Sellado Relativo.

KSS = mínima conductividad hidráulica saturada con protección del suelo (mm h⁻¹).

KCS = mínima conductividad hidráulica saturada sin protección del suelo (mm h⁻¹).

En las evaluaciones de KCS se mide la percolación del agua a través de la muestra de suelo a diferentes intervalos de tiempo. Con un evento de lluvia simulada de una hora y una intensidad inicial aproximada de 100mm h⁻¹.

En las evaluaciones de KSS se mide la percolación del agua a través de la muestra de suelo a diferentes intervalos de tiempo, colocando una carga constante de agua sobre la muestra de suelo cubierta por una tela de liencillo.

El índice de sellado absoluto (ISA) se obtiene como el valor mínimo de conductividad hidráulica después de la formación del sello bajo lluvia simulada, y el Índice de sellado relativo (ISR) como la relación del valor de la conductividad final sin sello formado y el valor de la conductividad final con sello formado. La conductividad para ambos casos se calculó con base en la Ley de Darcy. Para la interpretación de los valores del ISA pueden utilizarse los rangos propuestos por Florentino (1998), los cuales están relacionados con la degradación física del suelo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Conductividad hidráulica final del sello superficial (Ksello, mm h⁻¹)

Ksello (mm h ⁻¹)	Nivel	Severidad de la degradación
>30	Muy alto	Muy baja
15-30	Alto	Baja
5-15	Medio	Media
1-5	Bajo	Alta
<1	Muy bajo	Muy alta

Fuente: Florentino, 1998.

Índice de consistencia C₅₋₁₀ (De Ploey, 1981)

Este índice se determina en muestras de suelo seco al aire pasado por un tamiz de 425µm, las cuales se humedecen a dos puntos tales que permitan cerrar con 5 y 10 golpes la apertura que se realiza en las copas del aparato de Casagrande utilizado para la determinación del límite superior de plasticidad. El índice se calcula a través de la diferencia entre los porcentajes de humedad obtenidos en muestras de suelo a los 5 y 10 golpes.

$$C_{5-10} = W_5 - W_{10}$$

Donde:

W₅ = % de humedad correspondiente a 5 golpes con el aparato de CasagrandeW₁₀ = % de humedad correspondiente a 10 golpes con el aparato de Casagrande

Valores del índice mayores a 3 indican estabilidad ante el sellado mientras que un índice igual o menor a 2,5 indica susceptibilidad al sellado y encostrado de los suelos de acuerdo a los resultados reportados por De Ploey (1981).

Evaluaciones con simulador de lluvia**Evaluaciones en el Laboratorio**

Para estas determinaciones se puede utilizar un simulador de lluvia de invernadero tipo gotero, como el diseñado por Pla (1983), conformado por un sistema alimentador de agua constante y un sistema productor de gotas de lluvia giratorio con goteros (formados por tubos plásticos atravesados por alambre) y ubicados a una altura de 2,5m de la bandeja que delimita el área que recibe la lluvia (Figura 1).

Las muestras de suelo utilizadas en esta prueba, quedan conformadas por agregados secos al aire entre 4 – 8mm de diámetro, dispuestos en bandejas de erosión de 30cm de largo, 20cm de ancho y 15cm de profundidad. Dichas bandejas se someten a un evento de lluvia simulada durante una hora con una intensidad inicial aproximada de 100mm h⁻¹, la cual disminuirá a medida que transcurre el tiempo.

En cada bandeja que representaba una muestra, se puede evaluar durante el evento de lluvia: la lámina escurrida, lámina aplicada o caída y las pérdidas de sedimento por escorrentía y por salpique. Posterior a estas evaluaciones las bandejas se pueden dejar secar al aire para determinar la resistencia máxima de la costra superficial formada; para ello se realizan mediciones cada 48 horas hasta conseguir la resistencia máxima, esto con ayuda de un penetrómetro de resorte manual con punta plana de 0,28cm² de área. Tomando además las muestras de humedad correspondientes a cada medición.

Con las evaluaciones realizadas, se obtienen algunas relaciones como porcentaje de escorrentía (lámina escurrida/lámina caída *100), pérdidas de sedimentos por escorrentía por mm de lluvia caída, pérdidas de sedimentos por salpique por mm de lluvia caída, pérdida de sedimentos por escorrentía por mm de agua escurrida y resistencia máxima de la costra.

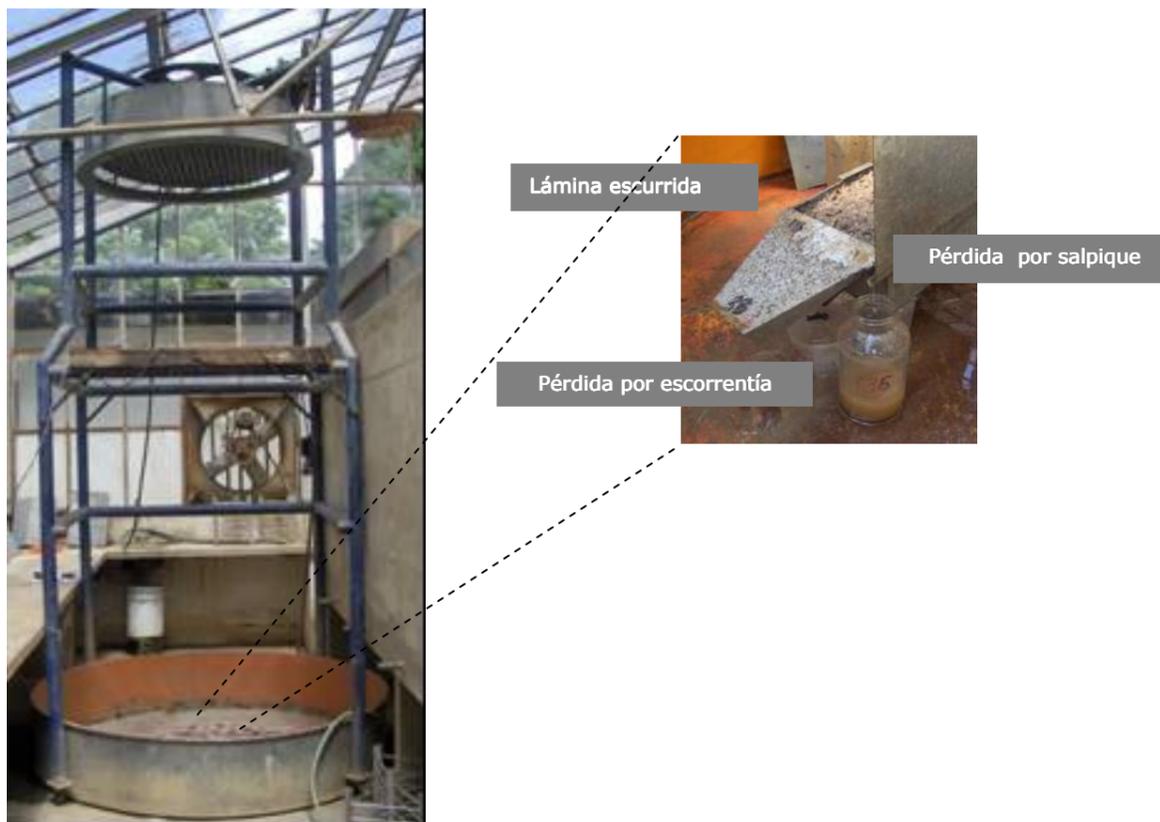


Figura 1. Simulador de lluvia tipo gotero y detalle de la bandeja de erosión

Evaluaciones en el campo

En campo se delimita una parcela de erosión de tipología cerrada con dimensiones determinadas según el área del simulador de lluvia utilizado, haciendo uso de láminas de zinc galvanizado con una boca colectora y una lámina con un canal colector de salpique.

Para simular la lluvia se puede utilizar un simulador de lluvia de campo portátil tipo gotero siguiendo el diseño de Nacci y Pla (1991), cuyo mecanismo formador de gotas está conformado por una caja de metal de dimensiones determinadas, con un sistema de goteros formados por tubos finos de plástico atravesados por un alambre. Este sistema formador de gotas se coloca sobre patas expansibles a una distancia de 2,5m de la superficie del suelo, preferentemente (Figura 2)

La intensidad de lluvia se controla con un sistema de frasco invertido, que permite mantener el nivel de agua más o menos constante dentro de la caja metálica.

Se realizan las mismas mediciones que en invernadero durante la aplicación de la lluvia simulada: lámina escurrida, lámina caída y pérdidas de sedimento por escorrentía y por salpique y la resistencia de la costra; esto con la finalidad de contar con las mediciones tomadas directamente en campo.

También se realizan mediciones de la resistencia de la costra superficial formada en campo bajo condiciones naturales y producto de eventos sucesivos de lluvias naturales, usando el penetrómetro ya descrito anteriormente y tomando las muestras de humedad correspondientes a los puntos de muestreo.



Figura 2. Simulador de lluvia de campo y detalle de la parcela de erosión

Infiltración a través del sello I.S.)

Para evaluar la infiltración a través del sello en campo, se utiliza el método no destructivo de Boiffin y Monnier (1986), el cual se fundamenta en suplir agua a la superficie del suelo y medir el área de flujo saturado cuando el flujo gravitacional comienza a prevalecer.

El método consiste en hacer pasar a través de la superficie del suelo sellado, agua a una descarga constante, cuyo punto de origen es un tubo capilar suplido de agua por un tanque a nivel constante. Alrededor del orificio de salida de las gotas se forma un halo de humedecimiento más o menos circular, la prueba termina cuando este halo deja de aumentar su diámetro (Figura 3).

$$I.S. = \frac{4.V}{\pi.t.D^2}$$

Donde:

I.S. = Infiltración a través del sello (cm h⁻¹)

V = Volumen de agua de la calibración (cm³)

t = Tiempo de descarga (h)

D = diámetro promedio del halo mojado (cm)

Esta evaluación se realiza utilizando una tasa de descarga entre 5 y 100mm h⁻¹ para evitar el anegamiento en la superficie, esto basado en las recomendaciones de Boiffin y Monnier (1986).

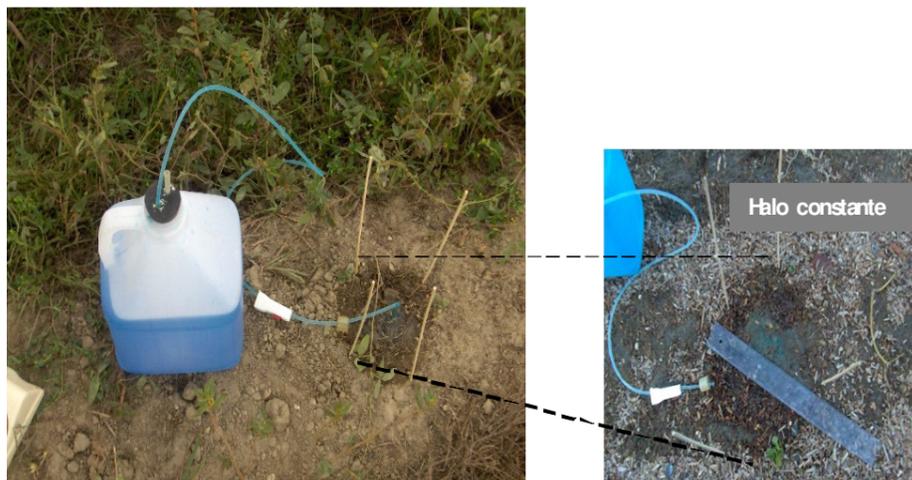


Figura 3. Equipo para determinar la infiltración a través del sello y detalle del halo mojado

Métodos indirectos

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

1. Índice de separabilidad de partículas (ISP) (Florentino, 1998)

Este índice, propuesto por Florentino (1998), refleja la tendencia que tiene un suelo, predominantemente mineral, con muy bajo contenido de materia orgánica, a la separación de sus partículas y como consecuencia a la formación de sello o costra superficial cuando el suelo se humedece o caen fuertes lluvias.

$$I.S.P = \frac{\% A}{\% L + \% af + \% amf}$$

Donde:

I.S.P.= Índice de susceptibilidad a la separación

A = % de arcilla (< 2µm)

L = % de Limo (2 - 50µm)

af = % de arena fina (100 - 250µm)

amf = % de arena muy fina (50 - 100µm)

Se calcula en base a la información extraída de las curvas de distribución de tamaño de partículas, determinada por el método del hidrómetro, mediante la relación entre el porcentaje de arcilla (partículas < 2µm) y el porcentaje de limo más arena fina y muy fina (partículas 2 - 250µm). para la interpretación de los valores puede utilizarse los rangos que se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Susceptibilidad a la separación, de acuerdo al índice de separación de partículas

I.S.P	Separabilidad
> 2	Muy Baja
1 – 2	Baja
0.5 – 1	Moderada
0.2 – 0.5	Alta
< 0.2	Muy Alta

2. Índice de Sellado- Encostrado de los suelos (I.S.E.)

Índice calculado con base a experimentos realizados por Florentino (1998), derivado de ecuaciones de regresión.

$$I.S.E. = \frac{6,7433 \times \% MO}{0,5501 \times (\% L + \% amf + \% af)}$$

Donde:

I.S.E.= Índice de Sellado-Encostrado

MO = % de materia orgánica

L= % de Limo (2 - 50µm)

amf = % de arena muy fina (50 – 100µm)

af = % de arena fina (100 – 250µm)

3. Índice de encostramiento (I.E.)

FAO, (1980) propone un índice 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.

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

Donde:

I.E. (FAO)= Índice de encostramiento (FAO)

Lg = % de Limo grueso (20 - 50µm)

Lf = % de Limo fino (2 - 20µm)

A = % de arcilla (< 2µm)

MO = % de materia orgánica

Este índice varía entre valores menores a 0,2 para los suelos que no forman costra y valores mayores a 2 para los que están sujetos a una intensa formación de costras.

4. Índice de encostramiento de FAO (1980) modificado para las condiciones de los Llanos Occidentales (Comerma *et al.*, 1992)

Este índice representa el índice propuesto por la FAO (1980) modificado en función de la información disponible por Comerma *et al.* (1992) en la zona de Turén, Venezuela. Los límites de clase se establecieron en base a un análisis realizado con datos de 25 suelos de Venezuela, comparando los valores del índice de encostramiento calculados y su estabilidad de agregados al agua por varias metodologías.

$$I.E. = \frac{1,125 L}{A + 10 M . O}$$

Donde:

I.E.= Índice de encostramiento

L = % de Limo (2 - 20 µm)

A = % de arcilla (< 2 µm)

MO = % de materia orgánica

Los valores del índice de encostramiento, citados por los autores, se separan según el tipo de utilización de tierras (con ajonjolí y sin ajonjolí) debido a los requerimientos de preparación de tierras para el cultivo de ajonjolí utilizado en la zona de Turén.

CONCLUSIONES

La estabilidad de agregados es ampliamente reconocida como un indicador clave del suelo. Existe un número importante de métodos para determinarla, o estimarla a partir de otras características del mismo.

La determinación del estado de agregación del suelo y la estabilidad de los agregados ha sido realizada usando diferentes métodos e índices, pero no existen métodos, modelos o índices estandarizados que se puedan utilizar de manera universal.

La estabilidad de agregados al humedecimiento es determinada con base en el principio de que los agregados inestables se romperán con mayor facilidad que los estables cuando son sumergidos en agua; así mismo cuando son sometidos al impacto de gotas. Por esta razón, tales determinaciones serán útiles para valorar la susceptibilidad de un suelo a formar sellos superficiales o costras, que tendrán efectos sobre la penetración de agua o sobre la emergencia de plantas y difusión de gases, respectivamente; así como la susceptibilidad a la compactación y a la erosión hídrica o eólica.

La selección de los métodos de evaluación y la interpretación de los resultados dependen del propósito de la medición.

LITERATURA CITADA

- Awadhwal, N. K. ; G.E. Thierstein.** 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: A review. *Soil and Tillage Research*, 5: 289-302.
- Beare, M.H.; R.R. Bruce.** 1993. A comparison of methods for statistical index of aggregation: Implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56:87-104.
- Boiffin J.; G. Monnier.** 1986. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. International symposium on the assessment of soil surface sealing and crusting. *En: Assessment of soil surface sealing and crusting, proceedings of the Symposium held in Gent, Belgium.* p 210-217.

- Bradford, J.M.; C.Huang.** 1992. Mechanisms of crust formation: physical components. *En: Soil Crusting: Physical and Chemical Processes* (Eds M.E. Sumner y B.A. Stewart), Lewis, Boca Raton, Florida. pp. 55-72.
- Bravo, C.; E. Andreu.** 1995. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un Alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos* (Venezuela) 3(2):62-68.
- Bronick C. J.; R. Lal.** 2004. Soil structure and management: a review. *Geoderma*: 124:3-22.
- Cambardella, C.A.; E.T. Elliott.** 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56:449-457.
- Castro Filho, C.; A. Lourenço; M.F. de Gimarães; I.C.B. Fonseca.** 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.* 65:45-51.
- Cerda A.** 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil Till. Res.* 57: 159-166.
- Chartres, C.J.; G.W. Geeves.** 1998. The impact of soil seals and crusts on soil water balance and runoff and their relationship with land management. *Advances in GeoEcology*, (Reiskirchen) 31: 539-548.
- Comerma, J., S. Torres, D. Lobo, N. Fernández, R. Delgado; L. Madero.** 1992. Aplicación del sistema de evaluación de tierras de la F.A.O. 1985 en la zona de Turén, Venezuela. *Cuadernos de Agronomía*, año 1 (1). 24p.
- De Leenheer L.; M. De Boodt.** 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Proceedings of International Symposium on Soil Structure*. Ghent, Belgium. p 290-300
- De Ploey, J.** 1981. Crusting and time-dependent rainwash mechanisms on loamy soil. *Soil conservation. Problems and Prospects*. Edited by R.P.C. Morgan. p139-152.
- Elliott, E.T.; C.A. Cambardella.** 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34:407-419.
- El Swaifi, S.A.; E. W. Dangler.** 1982. Rainfall erosion in the tropics: A state of the Art. *In: Soil erosion and conservation in the tropics. ASA Special Publication*, 43: 1-26.
- F.A.O.** 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma-Italia. 86p.
- 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. *En: Manejo Sostenible de los Suelos, Manual de Prácticas*. Facultad de Agronomía UCV. Maracay- Venezuela. p 68-77.
- Gale, W.J.; C.A. Cambardella; T.B. Bailey.** 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:201-207.
- Gabriels, D., R. Horn, M.M. Villagra; R. Hartman.** 1997. Assessment, prevention and rehabilitation of soil structure caused by soil surface sealing, crusting and compaction. *In: R. Lal et al. (Eds). Methods for Assessment of Soil Degradation. Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida USA. pp. 129-165.
- Henin S, Monnier G; A. Combeau.** 1958. Methode pour l'étude de la stabilite structurale des sols. *Ann. Agron.* 9:71-90.
- Kemper, W.D.; R.C. Rosenau.** 1986. Aggregate stability and size distribution. *En: A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI.* p. 425-442.
- Lal, R.** 1991. Soil structure and sustainability. *J. Sustainable Agric.*, 1: 67-92.
- Le Bissonnais, Y.** 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- Lozano, Z.; S. Cabrera y M. Adams.** 2000. Efectos de los sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de dos suelos de los llanos occidentales. *Memorias XV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo*. Barquisimeto- Venezuela. p 171-177.
- Márquez, C.O.; V. J. Garcia; C. A. Cambardella; R. C. Schultz; T. M. Isenhardt.** 2004. Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(3): 725 - 735.
- Martinez-Gamiño, M.A.; P.M. Walthall.** 2000. Physical, Chemical, and Mineralogical Properties Affecting Soil Crust Formation in Soils of Mexico and Louisiana, USA. *Terra*, 18 (3):184.
- Mbagwu, J.** 2004. Aggregate stability and soil degradation in the tropics. *Invited presentations College on Soil Physics 2003. Trieste, Italy.* p. 245-252.

- Nacci, S.; I. Pla.** 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. Serie B, N° 17. Maracay (Venezuela). 40p.
- Porta J.; M. López-Acevedo; C. Roquero.** 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. Ediciones Mundo-Prensa, Barcelona, España. 849p.
- Pagliai, M.** 2003. Soil surface sealing and crusting-soil compaction. *En: College on Soil Physics. Trieste Italy.* 24p.
- Pagliai, M.; N. Vignozzi; S. Pellegrini.** 2004. Soil Structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79: 131-143.
- Pla, I.** 1983. Metodologías 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. 91p.
- Pla, I.** 1993. Degradación de suelos y sustentabilidad de los sistemas agrícolas. Memorias de la Segunda Reunión Bienal de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista. Guanare – Portuguesa. p 16-18.
- Pla I.** 1996. Suelos con limitaciones físicas. Evaluación, Diagnóstico y Manejo. Memorias del curso-Taller realizado en Mérida, Venezuela 19 al 23 de Junio de 1995. (Ed.: Lopez, R. y Delgado, F.). CIDIAT. 130p.
- Six, J.; E.T. Elliott; K. Paustian; J. Doran.** 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soil. *Soil Sci. Am.J.* 62:1367-1377.
- Soil Survey Division Staff.** 1995. Soil survey manual, USDA-SCS Agric. Handbook. 18. Washington: U.S.D.A. Press. 410 p
- Topp, G.C., W.D. Reynolds, F.J. Cooke, J.M. Kirby; M.R. Carter.** 1997. Physical attributes of soil quality. *In: E.G. Gregorich and M.R. Carter (ed.) Soil quality for crop production and ecosystem health.* Elsevier, New York. p. 21–58.
- Wakindiki, I.I.C.; M. Ben-Hur.** 2002. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion. *S.S.S.A.J.* 66:897-905.
- Yoder, R.E.** 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron.*, 28: 337-351.