

Física del Suelo

Contenido:

- **El suelo como sistema trifásico**
- **Textura del suelo**
- **Densidad de las partículas**
- **Densidad aparente**
- **Estructura del suelo**
- **Porosidad**
- **Bibliografía**



Cátedra de Edafología
Facultad de Agronomía y Zootecnia
Universidad Nacional de Tucumán



FÍSICA DEL SUELO

Ing. Agr. Rafael Gimenez

EL SUELO COMO SISTEMA TRIFÁSICO

Un sistema natural puede consistir de una o más sustancias y una o más fases. Una región, dentro de un sistema, que presente similares propiedades físicas en todo su volumen, es llamada fase. En la naturaleza existen tres fases principales: sólida, líquida y gaseosa.

Un bloque de hielo es un ejemplo de un sistema de una sola sustancia (agua) y una sola fase. Una mezcla de hielo y agua, en cambio, define un sistema de un solo compuesto pero con dos fases. Una solución de agua y sales es un sistema monofásico compuesto de dos sustancias diferentes.

En un sistema heterogéneo y polifásico, sus propiedades difieren no solo entre una fase y otra sino también entre la parte interna de una fase y la zona de separación con la fase o fases vecinas: interfase. Precisamente de la magnitud del área de estas interfases, van a depender una serie de procesos o fenómenos físico-químicos importantes, como ser adsorción, tensión superficial, fricción, etc.

Un sistema que presenta al menos una de sus fases subdividida en pequeñas partículas, las cuales presentan, en conjunto, una gran área interfase, es llamado sistema disperso.

En base a lo expuesto, podemos considerar al suelo como un sistema heterogéneo, polifásico y disperso, en el cual el área interfacial por unidad de volumen, puede ser muy grande. El carácter disperso del suelo da lugar a una serie de procesos que se producen en la zona de interfase; ejemplos de estos procesos son la floculación, intercambio iónico, adsorción de agua y nutrientes, capilaridad, etc.

Las tres fases que ordinariamente se presentan en la naturaleza, se manifiestan también en el suelo: fase sólida, es llamada la matriz del suelo, constituida por una fracción mineral y una orgánica; fase líquida, la cual consiste de diversas sustancias disueltas en agua, de ahí que se llama solución del suelo y fase gaseosa, llamada también la atmósfera del suelo (Figura 1).

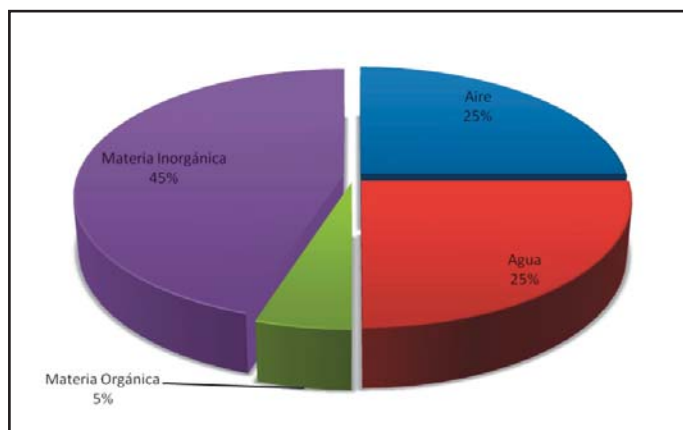


Figura 1: Fases del suelo.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

La fase sólida del suelo está compuesta de sustancias de diferente naturaleza química y mineralógica, de variada forma, tamaño y orientación.

El comportamiento mecánico de la fase sólida del suelo determina, a su vez, las propiedades físicas del suelo, las cuales pueden ser divididas en dos grupos principales:

- **a) Características físicas fundamentales:** textura, estructura, color, consistencia, densidad y temperatura.
- **b) Características físicas derivadas:** porosidad, capacidad de aire, capacidad de agua, compactación y profundidad radicular efectiva.

DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO POR TAMAÑO

La fase sólida del suelo está constituida por componentes minerales de diferentes tamaños. La distribución por tamaño de estas partículas está relacionada, como se mencionó, con diversas propiedades físico-químicas del suelo.

Las partículas del suelo varían en tamaño en forma continua, sin embargo, con un fin práctico, se han definido, arbitrariamente, grupos de tamaños de partículas. A cada agrupamiento de partículas, definido en función de un límite máximo y uno mínimo de diámetro equivalente, se lo denomina **fracción granulométrica**.

El material de suelo con diámetro equivalente inferior a 2 mm corresponde a la fracción fina del suelo, donde se encuentran la arena, el limo y la arcilla (Figura 2); al comprendido entre 2 mm y 25 cm, se le denomina fragmentos gruesos y con más de 25 cm, hablamos de pedregosidad o rocosidad, ésta última ya no forma parte de la masa del suelo.

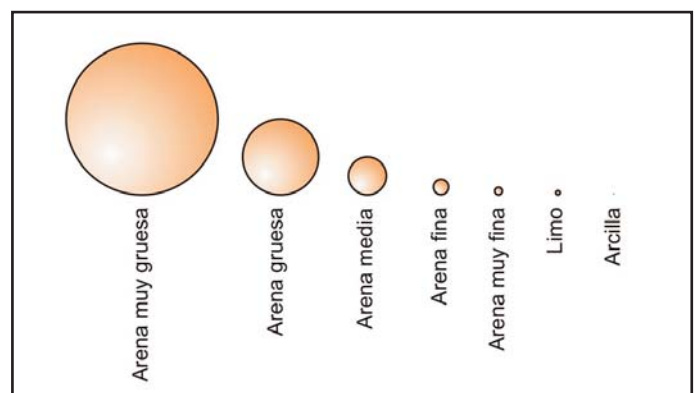


Figura 2: Representación visual de los tamaños relativos de arena, limo y arcilla.

Grava: se origina directamente del proceso de meteorización de la roca madre, por lo tanto presenta, prácticamente, su misma constitución. Su forma y an-

gulosidad van a variar con el medio, intensidad y distancia de transporte.

Arena: esta fracción también proviene de la desintegración física de la roca madre, manifestando, por lo tanto, una mineralogía similar a ésta. Se presentan, además, algunos minerales primarios, principalmente cuarzo (Figura 3), también fragmentos de minerales secundarios como feldespatos, mica, etc.

Limo: esta fracción consiste en partículas de tamaño intermedio entre la arena y la arcilla. Mineralógicamente son similares a las arenas pero, debido a su pequeño tamaño y, consecuentemente, mayor superficie específica que la arena, pueden exhibir, hasta cierto grado, atributos físico-químicos semejantes a los de las arcillas.

Arcilla: está constituida por materiales secundarios (formados a partir de las transformaciones químicas de minerales primarios contenidos en la roca madre). Generalmente aluminosilicatos de forma laminar. Su pequeño tamaño y su forma característica, originan una elevada superficie por unidad de masa, lo que trae como consecuencia una gran actividad físico-química. De ahí que ésta fracción sea la que más influye en las propiedades y características de los suelos (fenómenos de expansión y contracción, procesos de adsorción de agua y nutrientes, etc) (Figura 4).

TEXTURA DEL SUELO

El término textura hace referencia a la proporción relativa de arena, limo y arcilla, en la masa del suelo, es decir, a las partículas inferiores a 2 mm de diámetro equivalente.

Bajo un punto de vista "dinámico", se puede definir la textura como el conjunto de propiedades que resultan directamente del tamaño de sus elementos individuales.

La textura es, quizás, la característica más permanente del suelo aunque puede ser modificada por la remoción de horizontes superficiales por laboreo y el desarrollo de una nueva superficie de textura diferente; o por la acumulación de materiales acarreados por el viento o por el agua de riego, etc.

Las partículas del suelo varían en tamaño en forma continua, sin embargo, con un fin práctico, se han definido, arbitrariamente, grupos de tamaños de partículas. A cada agrupamiento de partículas, definido en función de un límite máximo y uno mínimo de diámetro equivalente, se lo denomina **fracción granulométrica**.

Los sistemas de clasificación de partículas de acuerdo a sus tamaños, más conocidos y utilizados son, el propuesto por el Departamento de Agricultura de Norteamérica (USDA) y el elaborado por la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo (ISSS) (Tabla 1).

Tabla 1: Sistemas de clasificación de partículas según su tamaño.

USDA		ISSS	
Fracción	Diámetros (mm)	Fracción	Diámetros (mm)
Arena muy gruesa	2,00-1,00	Arena	2,00-0,20
Arena gruesa	1,00-0,50	Arena fina	0,20-0,02
Arena media	0,50-0,25	Limo	0,02-0,002
Arena fina	0,25-0,10	Arcilla	<0,002
Arena muy fina	0,10-0,05		
Limo	0,05-0,002		
Arcilla	<0,002		

El tamaño de las partículas está directamente relacionado con sus propiedades físico-químicas.

CLASES TEXTURALES

El suelo generalmente no presenta una sola fracción granulométrica, sino una mezcla de fracciones en diferentes proporciones. Una combinación de fracciones granulométricas en una determinada proporción define una clase textural.

En la Figura 5 se presenta un esbozo de términos generales aceptables, divididos en cinco clases, relacionadas con los nombres de las clases texturales básicas.

Para que un material sea considerado arenoso debe

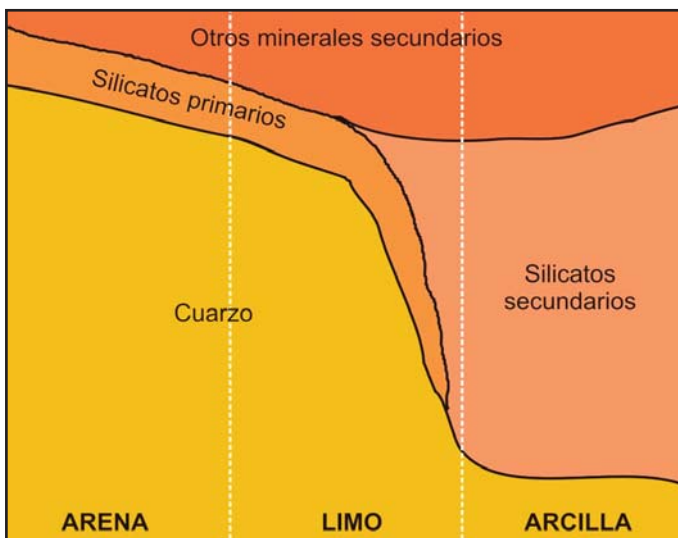


Figura 3: Composición mineralógica de las diferentes fracciones granulométricas.



Figura 4: Variación de las propiedades del suelo con el tamaño de las partículas.

ARENOSO	Texturas gruesas	Arenoso Arenoso franco
	Texturas mod. gruesas	Franco arenoso
FRANCO	Texturas medias	Franco Franco limoso Limoso
	Texturas mod. finas	Franco arcilloso Franco arcillo arenoso Franco arcillo limoso
ARCILLOSO	Texturas finas	Arcillo arenoso Arcillo limoso Arcilloso

Figura 5: Clasificación de las clases texturales.

contener más de 85% de arena, en cambio, un suelo arcilloso debe poseer más de 40% de arcilla y menos de

45% de arena. Un suelo franco (menos de 52% de arena y entre 7 a 27% de arcilla) se caracteriza por presentar una mezcla "balanceada" de partículas finas y gruesas, de tal manera de manifestar un **equilibrio en sus propiedades cualitativas**.

Las proporciones significativas de *fragmentos gruesos* más de 2 mm y menos de 25 cm de diámetro) se expresan en el nombre de la clase textural del suelo por medio de adjetivos apropiados (Tabla 2). Tales fragmentos se consideran parte de la masa del suelo pues influyen la infiltración, el almacenamiento de agua y el escurrimiento, etc.

Tabla 2: Denominaciones usadas en suelos para fragmentos gruesos.

Adjetivo	Forma del Fragmento	Tamaño (mm)
Guijonoso	Redondeados o poliédricos	64 a 250
Pavimentado	Aplanados	16 a 250
Guijarroso	Redondeados o poliédricos	16 a 64
Guijoso	Redondeados o poliédricos	4 a 16
Gravilloso	Redondeados o poliédricos	2 a 4
Escamoso	Aplanados	2 a 16

Estas clases texturales se resumen en un triángulo textural (Figura 6), en el cual se indican los límites máximos y mínimos de tamaño de las fracciones arena, limo y arcilla.

Las definiciones de las clases texturales son el resultado de la experiencia y de investigaciones especiales para establecer los límites entre clases texturales, de tal manera que ofrezcan un buen uso en las interpretaciones de los suelos.

DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA

MÉTODO ORGANOLÉPTICO

La determinación de la clase textural se lleva a cabo en el campo mediante el método organoléptico o del tacto. Este método requiere mucha práctica por parte del

evaluador y, aunque puedan obtenerse apreciaciones muy próximas a las reales, no deja de ser un método estimativo. Si se requiere una determinación más precisa de la textura del suelo, debe recurrirse al análisis de laboratorio.

ANÁLISIS MECÁNICO O GRANULOMÉTRICO

El análisis mecánico es el procedimiento, realizado en el laboratorio, para determinar la distribución de tamaño de las partículas de una muestra de suelo.

El primer paso consiste en dispersar la muestra en un medio acuoso. Las partículas del suelo, normalmente agregadas, deben dispersarse. Para ello se eliminan los agentes cementantes y ligantes (como carbonato de calcio, materia orgánica e hidróxidos de hierro) y se peptizan las arcillas. La remoción de la materia orgánica se logra, generalmente, a través de la oxidación con peróxido de hidrógeno y la de los carbonatos, disolviéndolos con ácido clorhídrico. La dispersión se logra con un agente dispersante como ser el metafosfato de sodio y con agitación mecánica. La función del agente dispersante es reemplazar los cationes adsorbidos en las arcillas, particularmente di y trivalentes, con sodio, catión que favorece la peptización de las partículas. Una deficiente dispersión resultaría en una floculación de las arcillas, registrando un tamaño similar al de la arena o limo, subestimando, por lo tanto, el real contenido de arcilla de la muestra de suelo.

La distribución de las partículas por tamaño se basa en el diámetro que presenten. Si dichas partículas fueran geoméricamente regulares no habría ningún problema para su evaluación. Sin embargo, las partículas del suelo son muy irregulares, de tal manera que es difícil asignarles alguna longitud, anchura, espesor y diámetro.

No existe un método preciso para medir el tamaño de las partículas. Para tal fin se hace necesario introducir el concepto de *diámetro nominal* y *diámetro efectivo*.

La única alternativa al problema de la irregularidad de las partículas es asignarles una dimensión equivalente. Si este diámetro está basado en el tamaño de la partícula que pudiera pasar a través de un tamiz con perforaciones o aberturas conocidas, la partícula podría tener ese diámetro nominal, igual a la sección transversal del cilindro.

Otra expresión indirecta del tamaño de la partícula es el diámetro efectivo o diámetro equivalente esférico. Este diámetro está basado en la ley de Stokes.

De acuerdo a la *ley de Stokes*, en un fluido de determinada densidad y viscosidad, la velocidad Terminal de una partícula esférica, bajo la influencia de la gravedad, será proporcional al cuadrado del radio de dicha partícula. Esta ley se aplica, principalmente en partículas mayores de 1 μ y menores de 50 a 80 μ .

Una partícula de suelo, de cualquier forma, tendrá un diámetro efectivo igual al diámetro de una esfera que tenga la misma densidad, es decir, que caería con la misma velocidad considerando que exactamente obedece a esta ley.

Para determinar la distribución de tamaño de las par-

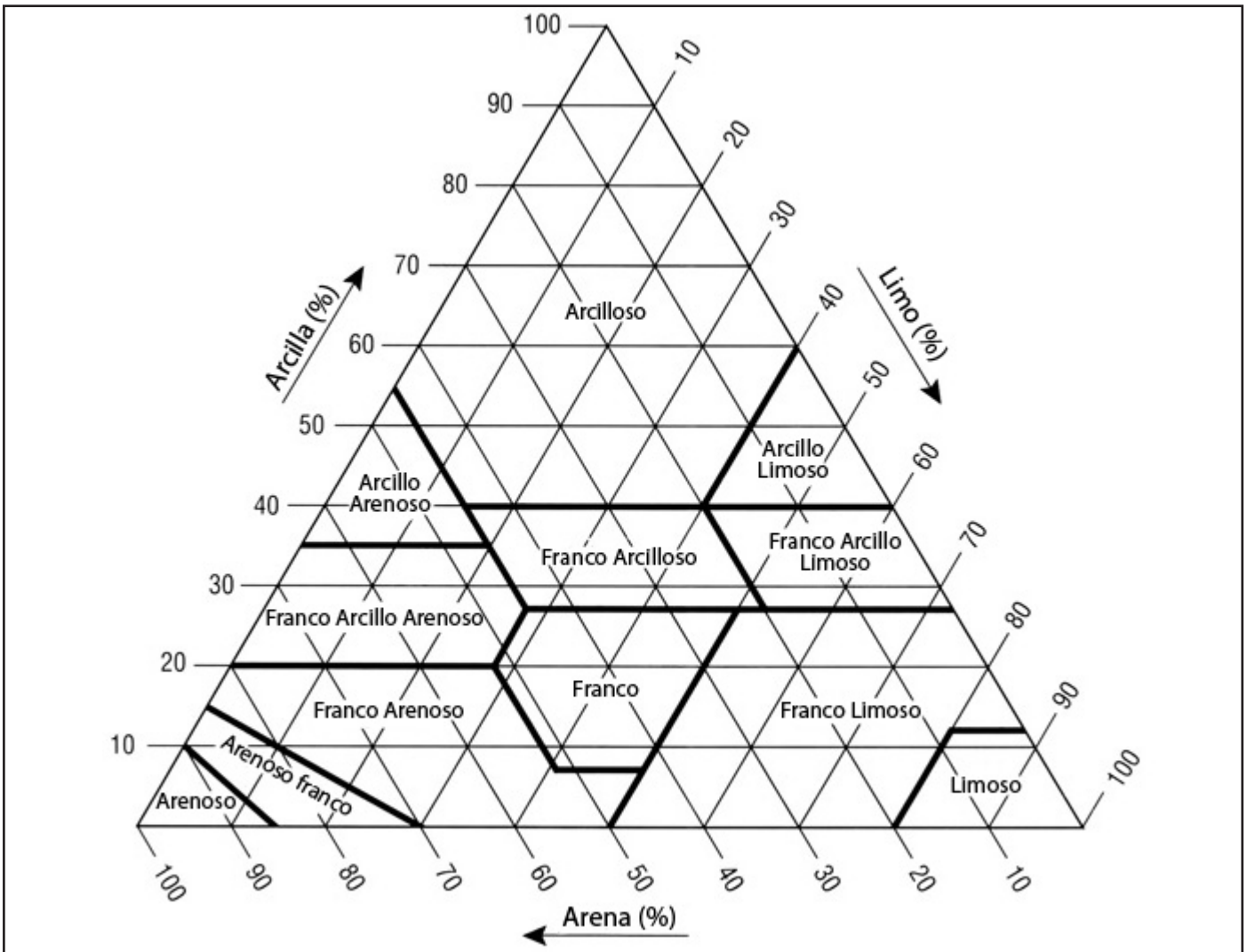


Figura 6: Gráfico que muestra los porcentajes de arcilla (menos de 0,002 mm), limo (0,002- 0,05 mm) y arena (0,05-2,0 mm) en las clases texturales básicas del suelo.

tículas de una muestra de suelo, por un lado, las partículas superiores a $50\ \mu$ son separadas en grupos de diferentes tamaños, haciendo pasar el material disperso a través de un juego de tamices con mallas de diferentes aberturas, lo que define un determinado diámetro nominal de partículas. Por otro lado, las partículas más finas son clasificadas en diferentes tamaños (diámetro efectivo) a través de métodos de sedimentación. Uno de los métodos más exactos y difundidos para medir tamaños de partículas, basado en la ley de Stokes, es el método de la pipeta.

- **Método de la pipeta:** la diferencia de cantidad de material sólido que permanece en suspensión a una profundidad dada en dos tiempos dados, representan la cantidad de material que se ha asentado o desplazado más allá de la profundidad de medida, en el intervalo de tiempo. La distancia recorrida por las partículas, en un determinado tiempo, define una velocidad de sedimentación la cual, a través de lo expuesto, puede relacionarse con el tamaño de estas partículas. Uno de los métodos más difundidos y exactos para

medir la concentración de las partículas en suspensión es tomar con una pipeta una muestra de la suspensión a la profundidad deseada. Se puede determinar la cantidad de sólido en el volumen que se ha tomado como muestra, evaporando el agua, secando el residuo y pesándolo. Este método necesita que la pipeta sea llenada a una velocidad uniforme.

- **Método del hidrómetro:** consiste en determinar, en diferentes tiempos, la cantidad de sólidos en el material en suspensión. La densidad de la suspensión se mide por medio de un hidrómetro especial (la profundidad del centro de flotación del hidrómetro varía con la densidad de la suspensión). A su vez, la densidad del medio se relaciona con la cantidad o porcentaje de partículas en suspensión, para lo cual fue necesario calibrar la metodología con numerosos suelos. El diámetro equivalente de estas partículas en suspensión se estima a través de la velocidad de sedimentación, aplicando la ley de Stokes. Se realizan lecturas con el hidrómetro a diferentes tiempos, obteniéndose una curva de distribución de tamaño de partículas.

El método del hidrómetro es más rápido pero menos preciso que el de la pipeta. El primero es un método calibrado (estimativo) que, además, da una lectura promedio de la densidad de toda la suspensión. Con la pipeta, en cambio, se realizan lecturas puntuales dentro de la suspensión, determinándose directamente la cantidad de partículas presentes. Sin embargo, con el método de la pipeta tampoco se obtiene una determinación completamente real de la distribución de tamaño de partículas pues, en el mismo, se aceptan como ciertos, una serie de condiciones que, en la realidad no se cumplen o bien sólo se dan en forma parcial. Por ejemplo, para que la ley de Stokes se aplique correctamente debe cumplirse, entre otras cosas, lo siguiente:

- **1.** Las partículas deben ser lo suficientemente grandes para no ser afectadas por el movimiento Browniano.
- **2.** Las partículas deben ser esféricas y todas de igual densidad.
- **3.** La suspensión debe ser lo suficientemente diluida para que no exista interferencia de una partícula con sus vecinas.

En definitiva, el análisis mecánico del suelo sólo brinda

un resultado aproximado de la real distribución de tamaño de partículas. Otro inconveniente del mismo es que no hace distinción entre los diferentes tipos de arcillas presentes en el material analizado.

PROPIEDADES Y SIGNIFICACIÓN AGROLÓGICA DE LA TEXTURA

En la Tabla 3 se indican algunas de las propiedades más relevantes de las diferentes fracciones granulométricas y su efecto en la actividad agrícola.

DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS Ó PESO ESPECÍFICO REAL

La densidad de las partículas (DP) o peso específico real (PER) se define como la relación entre la masa total de los sólidos y el volumen de los mismos, sin incluir el espacio poroso. Las unidades de expresión son g/cm^3 o t/m^3 . La DP permite calcular, entre otras cosas, la poosidad total del suelo, junto con la densidad aparente, estableciéndose las relaciones volumétricas entre las fases sólida, líquida y gaseosa.

Tabla 3: Significación agrológica de la textura.

Fracción	Propiedades	Significación agrológica
Grava	<ul style="list-style-type: none"> • Nula plasticidad y cohesión. • Incapaces de retener agua. • Disminuye el volumen efectivo del suelo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Interferencias en las operaciones de cultivo. 2) Interferencias en la germinación. 3) Menos de 20%, en suelos de texturas finas, favorece el régimen térmico e hídrico. 4) Más de 20%, en suelos de texturas finas, disminuye el espacio poroso. 5) En superficie, en suelos de texturas finas, disminuyen la evaporación y favorecen la infiltración. 6) Reducen la capacidad nutritiva del suelo. 7) En suelos de texturas medias a gruesas, reducen la capacidad de agua y el volumen efectivo de suelo.
Arena	<ul style="list-style-type: none"> • Débil a nula plasticidad y cohesión. • Poco cambio de volumen. • Muy débil a débil capacidad de retención de agua. • Débil a nula actividad físico-química. • Aireación excesiva. 	<p>Desfavorables: 1) Excesiva capacidad de aire y reducida de agua. 2) Escasa actividad físico-química. 3) Fácilmente arrastrado por el agua o el viento, con desarraigo de plantas o efecto abrasivo sobre las mismas. 4) Cuando secos, amplias fluctuaciones térmicas. 5) Proliferación de ciertas plagas y enfermedades.</p> <p>Favorables: 1) Permiten profundos sistemas radicales. 2) Fáciles de trabajar ("livianos"). 3) Rápida infiltración de agua (según relación con el clima y el riego). 4) Lenta evaporación.</p>
Limo	<ul style="list-style-type: none"> • Intermedias entre arena y arcilla 	<p>Desfavorables: 1) Baja estabilidad estructural. 2) suelos que se "planchan".</p> <p>Favorables: 1) Si están constituidos por minerales alterables, poseen buena reserva de elementos nutritivos. 2) Buena retención de agua útil.</p>
Arcilla	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada plasticidad, cohesión y adhesión. • Elevada retención de agua. • Grandes cambios de volumen. • Elevada superficie específica (interna y externa). 	<p>Desfavorables: 1) Excesiva capacidad de agua y escasa de aire (según relación con el clima). 2) Muy plásticos y adhesivos en húmedo y duros y compactos en seco: difíciles de trabajar ("pesados"). 3) Sistemas radicales reducidos desfavorables para cultivos de raíz o tallos subterráneos. 4) Agrietamientos que descalzan las plántulas. 5) No aptos para fundaciones. 6) Drenaje pobre.</p> <p>Favorables: 1) Alta capacidad de intercambio iónico. 2) Mejor provistos de nitrógeno. 3) Estructuras estables.</p>
Franco	Equilibradas entre arena, limo y arcilla	Las propiedades desfavorables de las arenas y arcillas se encuentran atenuadas.

Aunque pueden observarse considerables variaciones en la densidad de los suelos minerales individuales (Tablas 4 y 5), las cifras para la mayor parte de los mismos varían entre los estrechos límites de 2,60 a 2,75. Esto es así porque el cuarzo, feldespato y silicatos coloidales, con densidades dentro de estas cifras constituyen, por lo regular, la mayor parte de los suelos minerales. Por excepción, cuando están presentes cantidades anormales de minerales pesados, como magnetita, granates, epidota, etc., la densidad de las partículas de un mineral puede exceder de 2,75.

Debido a que la materia orgánica pese mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, la cantidad de ese constituyente en un suelo, afecta marcadamente a la densidad de las partículas.

Para cálculos generales, el término medio de la DP, en un suelo mineral, puede considerarse igual a 2,65 g/cm³.

Tabla 4: Densidad de las partículas de distintos componentes de la fase sólida del suelo.

Menor a 2,65		Próximo a 2,65		Mayor a 2,65	
Humus	1,3	Cuarzo	2,65	Limonita	3,7
Caolinita	2,5	Feldespatos	2,6	Hematita	5,2
Yeso	2,3	Calcita	2,7	Micas	2,9
Vidrio volcánico	2,3			Piroxenos	3,2

Tabla 5: Densidad de las partículas de distintos suelos.

Tipo de suelo	Valor de DP
Medios	2,50-2,65
Calcáreos	2,40-2,50
Humíferos	1,80-2,30
Histosoles	1,2
Ferruginosos	2,7

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS PARTICULAS

El método del picnómetro es el más empleado para medir la DP. Se basa en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco (picnómetro) de volumen conocido.

Procedimiento

1. Pesar el picnómetro limpio y seco (P).
2. Agregar 10 g de suelo seco y pesar (Ps).
3. Agregar agua destilada¹ hasta llenar el picnómetro. El aire se elimina llevando a ebullición y agitando.
4. Pesar el picnómetro con el suelo y el agua (Ps+a).

5. Limpiar el picnómetro y aforarlo con agua destilada hervida y pesarlo (Pa).

Cálculos

$$DP = \frac{\text{Densidad del agua} \times (Ps - P)}{(Ps - P) - (Ps + a - Pa)}$$

DENSIDAD APARENTE O PESO ESPECÍFICO APARENTE

Es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total del mismo, incluyendo el espacio poroso. Sus unidades de medida son las mismas de la DP.

Es una característica del suelo que reviste importancia para el agrónomo pues, a través de ella, se puede calcular el espacio poroso total, transformar la humedad gravimétrica en volumétrica, para conocer el peso de la capa arable, para calcular láminas de riego, etc.

La Densidad Aparente (DA) varía con la textura, estructura, compactación, materia orgánica, actividad biológica composición mineralógica del suelo.

- **Textura:** los suelos de textura fina tienen valores de DA menores que los suelos de texturas gruesas. Esto se explica por el mayor espacio poroso total de los primeros (aunque en la geometría porosa abundan los poros pequeños).
- **Estructura:** las partículas elementales del suelo se hallan agrupadas en agregados que originan un mayor espacio poroso originando por lo tanto, una DA más bajo. El tipo de estructura también tiene importancia: estructuras con agregados pequeños generan una mayor porosidad que con agregados gruesos.
- **Compactación:** en la medida en que disminuya el espacio poroso, la DA aumentará, de ahí que, por efecto de la compactación, éste parámetro aumente. Las capas inferiores del suelo suelen registrar un valor de DA mayor que las superiores debido al menor contenido de materia orgánica, a la presión de las capas superiores y a su, generalmente, menor estructuración. El laboreo excesivo o el tránsito de maquinarias, pueden generar, fuerte compactación.
- **Materia orgánica:** influye en la DA en la medida que afecta la estructura del suelo. Por otro lado, en suelos con elevado contenido de materia orgánica, la DA será pequeño dado el bajo valor de DA del material orgánico.
- **Actividad biológica:** la actividad de la mesofauna y de raíces originan canalículos y bioporos, especialmente en los horizontes superiores, aumentando la porosidad y, consecuentemente, disminuyendo los valores de DA.
- **Composición granulométrica:** Como ya se mencionó, el material constituyente del suelo presenta diferentes valores de DP, a la cual se le asigna un valor

¹ Para determinaciones más precisas, especialmente en suelos con partículas de superficies muy activas (arcillas), debe usarse un líquido no polar.

promedio de 2.65. Sin embargo, en suelos con predominio de materiales livianos (materia orgánica, vidrio volcánico, etc.) el valor de DP será bajo y consecuentemente también lo será el valor de DA. Caso contrario con materiales pesados, tendremos elevados valores de DP y DA (Tabla 6)

Tabla 6: Valores comunes de DA.

Suelo	Valor mínimo (g/cm ³)	Valor medio (g/cm ³)	Valor máximo (g/cm ³)
Texturas finas	1,0	1,2-1,4	1,6-1,8
Texturas gruesas	1,2	1,3-1,5	1,8-1,9
Orgánicos		>1	
Rico en mat. Piroclástico		>0,85	

En resumen, la DA es un parámetro importante como valor diagnóstico del estado estructural de los suelos, del grado de compactación de los mismos del estado del suelo como medio para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DA

- **Método del cilindro:** este método consiste en tomar una muestra de suelo **no alterada** en un cilindro de volumen conocido. Se seca a estufa a 105° hasta peso constante. La DA será igual a:

$$DA = \frac{M_{ss}}{Vol}$$

Donde
M_{ss}: Masa del suelo seco
Vol: volumen del cilindro

- **Método del orificio:** se realiza un orificio en el suelo mediante el uso de barrenos especiales y se determina el peso de la muestra secada a estufa a 105°. El volumen se determina recubriendo el orificio con una membrana de material plástico y llenando el espacio con agua; posteriormente se determina el volumen ocupado por el agua con la ayuda de una probeta.
- **Métodos radiométricos:** consiste en utilizar aparatos emisores y receptores de rayos gamma. La pérdida de energía de los rayos emitidos está en relación con el número de choques efectuados hasta llegar al receptor y por lo tanto, en relación también con la DA y el contenido de humedad del suelo. Las ventajas son la rapidez y la escasa o nula perturbación del suelo con lo que se pueden realizar numerosas muestras en un mismo lugar, a través del tiempo. Pero son aparatos de elevado costo y de menor precisión que los métodos de medición directa de la DA.
- **Método del terrón parafinado:** se pesa un agregado de suelo y luego se lo recubre e impermeabiliza

con parafina. El volumen del agregado se determina a través del desplazamiento de un líquido de densidad conocida.

ESTRUCTURA DEL SUELO

Un conjunto de ladrillos dispuestos desordenadamente y al azar constituye sólo una pila o estriba de ladrillos. Sin embargo, los mismos ladrillos dispuestos ordenadamente y unidos entre sí, puede dar lugar a una casa o a una fábrica. De la misma manera, el suelo puede ser sólo un conjunto de partículas sueltas, desordenadas; o bien estar constituido por estas mismas partículas unidas entre sí conformando un arreglo espacial, con una determinada forma y tamaño, bien definidos.

El arreglo y la organización de las partículas constitutivas del suelo, se conoce como *estructura del suelo*. Las unidades secundarias que se forman de la unión de las partículas primarias o individuales del suelo, se denomina **agregados**. Tales patrones o arreglos espaciales necesariamente incluyen *espacios porosos*.

Existen fuerzas que mantienen unidos esos componentes y que permiten que los agregados se comporten como una unidad. Tales fuerzas son mayores que aquellas que unen agregados adyacentes, de esa forma, al aplicarse una presión sobre una masa de suelo, los agregados se separan por *superficies naturales de fragilidad*, que representan los límites entre agregados.

A diferencia de un agregado, un terrón es causado por una perturbación, por ejemplo de aradura, que moldea el suelo en forma temporal, deshaciéndose al someterla a humedecimientos y secados repetidos.

Las partículas del suelo difieren en forma, tamaño y orientación, sus masas pueden estar asociadas e interligadas en diferentes formas, presentando configuraciones complejas e irregulares, las cuales son, en general, difíciles de caracterizar en términos exactos. Por otro lado, la estructura del suelo tiene una naturaleza variable, muy afectada por condiciones climáticas, biológicas y de manejo. Por estas razones, la estructura del suelo denota un *concepto cualitativo* más que una propiedad cuantitativa.

Desde un punto de vista teórico, pueden distinguirse microagregados, con diámetros menores a 0,250 mm y macroagregados, con diámetros entre 0,250 y 10 mm.

FUERZAS QUE INTERVIENEN EN LA FORMACION DE AGREGADOS

Los microagregados están formados por coloides orgánicos y partículas minerales (arcilla, limo y arenas finas y muy finas), que se mantienen unidas entre sí por fuerzas intermoleculares, capilares y químicas.

- **Fuerzas capilares:** cuando un suelo está seco, las partículas individuales están rodeadas por aire, no actúan las fuerzas intermoleculares. El humedecimiento provoca la formación de una película de agua alrededor de cada partícula. El contacto entre películas da lugar a la formación de un menisco, el cual ejerce una

fuerza de tracción (de igual valor a la tensión capilar), acercando las partículas entre sí. Dicho fenómeno se incrementa al disminuir el contenido hídrico, posibilitando que actúen fuerzas de Van der Waals. Al disminuir el contenido hídrico, aumenta la curvatura del menisco, aumentando la tensión capilar, la cual es inversamente proporcional al radio del menisco (Figura 7). Por el contrario, cuando el contenido de agua es excesivo, las partículas tienden a separarse, fluyen. Existe un contenido de humedad en el cual las partículas están lo suficientemente cerca como para que comiencen a actuar las fuerzas intermoleculares: *contenido de humedad crítico*. Es el contenido de humedad que favorece la formación de estructura y es el ideal para laborear el suelo. Normalmente se considera que este contenido crítico de humedad corresponde a un 60 a 70% de la capacidad de campo.

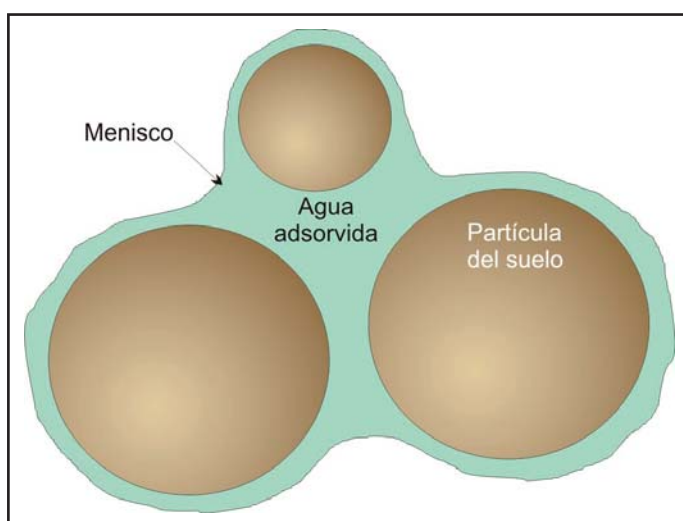


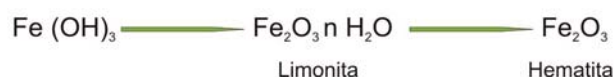
Figura 7: Fuerzas capilares actuando entre las partículas del suelo.

- **Fuerzas intermoleculares (Van der Waals):** son fuerzas muy grandes que actúan a distancias muy cortas, la intensidad de la atracción disminuye con la distancia a la sexta potencia. Cuando predominan estas fuerzas sobre las de repulsión, el suelo se encuentra floculado, estado previo y necesario para llegar a la agregación. Para que el acercamiento entre partículas, debido a fuerzas capilares, provoque una floculación de las mismas, las fuerzas de atracción (Van der Waals) deben prevalecer sobre las de repulsión. Para esto último, la doble capa eléctrica debe estar contraída.
- **Fuerzas químicas:** son las responsables de la estabilización de los agregados, especialmente frente a la acción dispersante del agua. Esto se logra a través de la cementación. Un pre-requisito para la agregación es que la arcilla esté floculada. Sin embargo, la floculación no es suficiente, por sí sola, para que exista agregación. La agregación es floculación y algo más. Este "algo" más es la cementación. Un agente cementante es un compuesto que, sufriendo un cambio químico (provocado

por cambios en el contenido hídrico) provoca un endurecimiento.

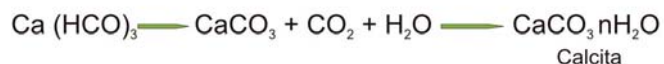
Existen diferentes sustancias cementantes:

- **Elementos ferruginosos:** el hierro férrico (Fe^{3+}) al reducirse, por ejemplo cuando hay exceso de agua en el suelo, pasa a formas ferrosas (Fe^{2+}). El hierro ferroso es móvil y puede difundir al interior de los microagregados. Cuando el exceso de agua desaparece y el hierro pasa a su forma oxidada, precipita como óxido férrico. Posteriormente, este último, al ir deshidratándose, va transformándose en óxidos con diferentes cantidades de moléculas de agua.



El $\text{Fe}(\text{OH})_3$ explica la mayor estabilidad de los suelos que sufren cortos períodos de hidromorfía. Los óxidos de hierro, típicos de suelos tropicales (Oxisoles, principalmente), favorecen la mayor estabilidad estructural de estos suelos, pues actúan como cementantes.

- **Bicarbonato de Calcio y Magnesio:** el carbonato de calcio, al hidratarse, se transforma en calcita, la cual actúa como cementante.



- **Fosfatos de Calcio:** el fosfato diácido de calcio, soluble, puede transformarse en monoácido, forma menos soluble y, finalmente en fosfato tricálcico, el cual es aún menos soluble, actuando, bajo esta forma, como agente cementante.



Los macroagregados están formados por las partículas minerales más grandes (arenas medias y gruesas) y/o por los mismos microagregados unidos por coloides orgánicos e inorgánicos floculados; estos últimos actúan como **ligantes**.

En la Figura 8 se presenta un modelo que da una base para considerar cómo se reúnen las partículas para conformar unidades mayores.

Las partículas de arcillas se muestran como dominios, consistentes en varias partículas de arcilla mantenidas juntas cara con cara; los dominios pueden unirse, a su vez, a través de fuerzas electrostáticas o por polímeros orgánicos. Estos polímeros pueden también ligar partículas de arcilla a la superficie de las partículas de limo o arena.

Se puede observar el importante papel que cumple la materia orgánica en la estabilidad de los agregados.

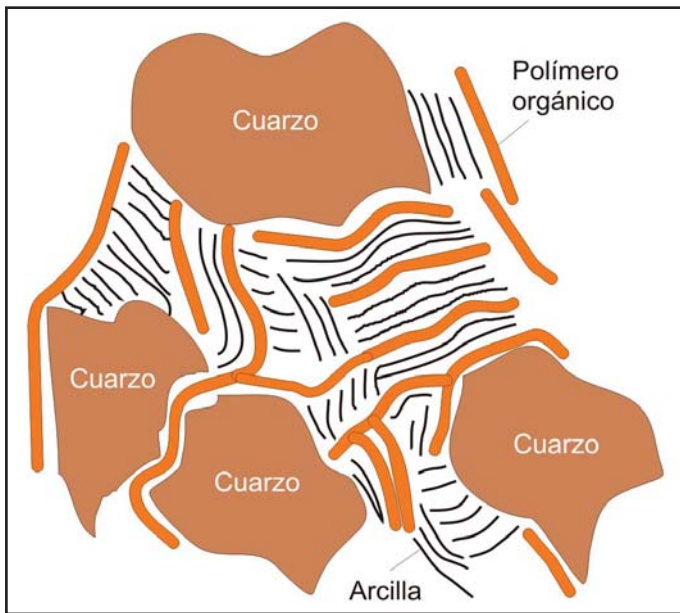


Figura 8: Modelo de unión de los agregados.

Cualquiera sea el mecanismo interviniente, el efecto de la materia orgánica en la estabilidad de los agregados, se resume en lo siguiente:

- **Reduce el hinchamiento de los coloides:** la materia orgánica puede formar, junto con las arcillas, complejos arcillo-húmicos, reduciéndose la capacidad de hinchamiento de la arcilla y, como consecuencia, aumentando la estabilidad de los agregados. Este complejo arcillo-húmico reduce, también, la humectabilidad de los agregados, como consecuencia de la condición hidrófoba de la materia orgánica.
- **Reduce la fuerza destructiva del aire atrapado:** si un agregado es sumergido rápidamente en agua, el aire contenido en los poros no tiene tiempo de escapar y ejerce una presión, la cual se incrementa con el calor de mojadura. Si esta presión es mayor que las fuerzas que mantienen unido el agregado, éste se destruye. La materia orgánica retarda el humedecimiento pues es hidrófoba, permitiendo que el aire tenga oportunidad de escapar.

La relación entre la agregación y la materia orgánica es un proceso *dinámico*. La estabilidad de los agregados está cambiando continuamente a medida que se añade y descompone materia orgánica. Los agentes cementantes que se forman estabilizan los gránulos y luego se descomponen haciendo los agregados menos estables (Figura 9).

En la figura, el punto máximo de la curva representa la agregación producida por los cuerpos microbianos del suelo. El efecto más importante, el cual ocurre en el período de intensa actividad biológica, es la ligadura mecánica por los micelios de los hongos, actinomicetes y células bacterianas. Este tipo de estabilidad de los agregados es sólo temporal, pues los micelios y las células se descomponen por acción bacteriana al declinar la intensidad de la acción biológica. La estabilización de la estructura entra luego en la fase en que los productos

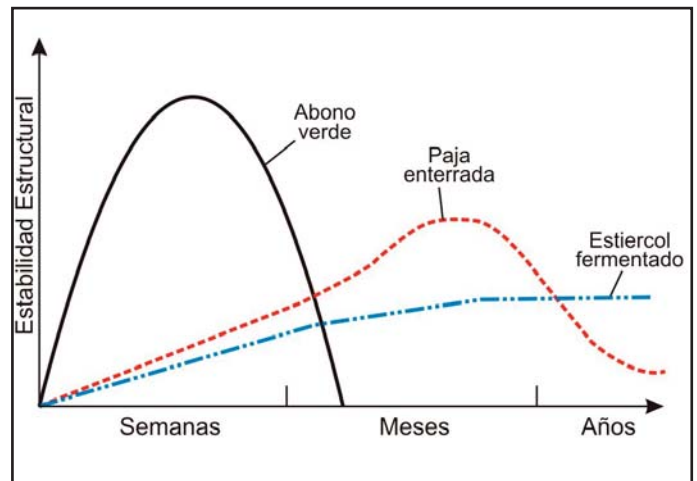


Figura 9: Estabilización de la estructura del suelo por la materia orgánica.

transitorios de la síntesis microbiana promueven la estabilidad de los agregados. Estos productos de lenta descomposición biológica son los *polisacáridos* y compuestos similares.

Los polisacáridos, en particular, parecen favorecer la estabilidad de los agregados naturales, sus moléculas conforman una estructura alargada, lineal y flexible (características que facilitan la constitución de la red) que favorece el contacto estrecho con las partículas, uniéndolas entre sí; en la cadena contienen gran número de grupos oxhidrilos, carboxilos, fenólicos, etc. No obstante su labilidad, ya que los microorganismos las descomponen rápidamente, estas sustancias constituyen una parte considerable de la materia orgánica del suelo.

Estas curvas resaltan la necesidad de llevar abundante materia orgánica a los suelos para mantener una granulación estable.

FACTORES QUE AFECTAN LA GÉNESIS DE LA ESTRUCTURA

Los macroagregados resultan de la asociación de los microagregados entre sí o estos últimos con partículas individuales (arena o limo). En estas asociaciones la materia orgánica juega, probablemente, el rol más importante: como sustancia ligante. La macroestructura puede generarse también a través de la fragmentación de masa mayor de suelo, a través de los procesos que se verán a continuación.

Los principales factores que controlan la formación y estabilización de los macroagregados son el humedecimiento y secado, hielo y deshielo, efecto de la raíces, actividad biológica y clima.

- **Humedecimiento y secado:** estos fenómenos originan planos de debilitamiento ocasionados por tensiones y presiones diferenciales en el suelo. Los planos de ruptura debido a la eliminación del agua son, principalmente en sentido vertical. El secado, por otro lado, tiende a incrementar la estabilidad de los agregados al producir la deshidratación de los cementantes y ligantes del suelo.

- Congelamiento y descongelamiento:** la formación de hielo y su acción agregante depende del contenido de agua en el suelo, la distribución de poros y la velocidad de congelamiento. El congelamiento afecta la agregación debido a la expansión del agua al pasar a hielo dentro del suelo. En suelos de texturas gruesas, el agua se congela en su lugar, pero en suelos de texturas finas, se presenta movimiento de agua hacia los sitios congelados formándose allí, lentes de hielo. A medida que las capas lenticulares crecen, el suelo se comprime y se levanta. Las fisuras agrandadas por la expansión del agua al congelarse, presentan mayor capacidad de agua cuando el hielo se ha derretido y pueden agrandarse más cuando se congela de nuevo. Enfriamientos rápidos ocasionan un congelamiento brusco y el rompimiento de agregados, al dispersar el suelo. Los efectos de la congelación-descongelación pueden ser también desfavorables, especialmente si la lluvia o el drenaje pobre causan el amasado durante la fase de descongelamiento.
- Efecto de las raíces:** las raíces de las plantas en crecimiento influyen en la agregación de varias formas: las presiones ejercidas por las raíces en el suelo producen compresión y separación de los agregados; la toma de agua a través de las raíces causa una deshidratación diferencial, con la formación de numerosas y pequeñas grietas y posterior formación de agregados. Las pequeñas raicillas mantienen juntas las partículas a través de la exudación de sustancias orgánicas, las cuales, mediante transformación microbiana, se convierten en sustancias ligantes.
- Efecto de los microorganismos:** los residuos vegetales, tanto del follaje como de las raíces muertas, favorecen la actividad biológica del suelo (importante factor de agregación). La actividad microbiana origina productos capaces de unir las partículas del suelo entre sí. Los micelios de los hongos, por otro lado, pueden unir las partículas y microagregados entre sí por acción mecánica, favoreciendo la formación de agregados.
- Efecto de la fauna del suelo:** la acción combinada de arañas, nematodos, insectos, y, en especial, la lombriz de tierra, entre otros, determinan un efecto pronunciado sobre la formación estructural. Las lombrices de tierra promueven una mejor agregación, tanto en tamaño como en estabilidad de los agregados. La presión ejercida en el suelo en la deposición de las heces de las lombrices, favorece la agregación. Los pellets fecales de las lombrices de tierra presentan una estabilidad estructural elevada debido a su alto contenido de materia orgánica.
- Efecto del clima:** debemos considerar el efecto del clima a corto y a largo plazo.
 - A corto plazo:** el clima obra a través de su influencia en los procesos de desecación y humectación y de congelamiento y descongelamiento.

A largo plazo: se debe considerar el efecto zonal de las precipitaciones y de la temperatura, básicamente como determinantes de la cantidad y calidad de la materia orgánica. Al mantener la temperatura constante y la precipitación como variable, se produce un cambio en el porcentaje de los agregados.

En el ejemplo de la Figura 10, la fracción de agregados es baja en los Aridisoles, es máxima en los Molisoles y desciende en los Espodosoles. La explicación puede relacionarse con la presencia de arcilla y materiales húmicos: escasos en los Aridisoles y máximo en los Molisoles. En los Espodosoles, en cambio, la clase de material húmico, la lixiviación de elementos cementantes y destrucción de arcillas, ayudan a explicar estos resultados.

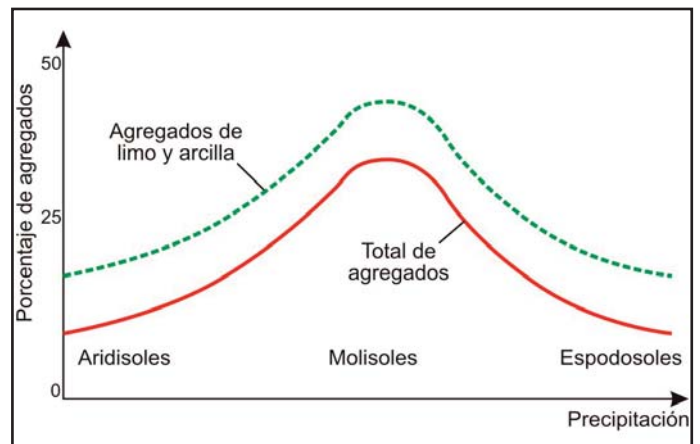


Figura 10: Relación entre agregados y la precipitación.

Cuando la precipitación se mantiene constante y la temperatura es variable, se aprecia una disminución en los agregados de limo y arcilla en los Molisoles debido, aparentemente, al menor contenido de materia orgánica a medida que aumenta la temperatura (Figura 11). En los Espodosoles y Oxisoles, las causas parecen estar relacionadas, con los materiales húmicos y la lixiviación y destrucción de arcillas, en los Espodosoles y los altos contenidos de hierro y aluminio, en los Oxisoles (cementación mediante compuestos deshidratados de hierro y aluminio).

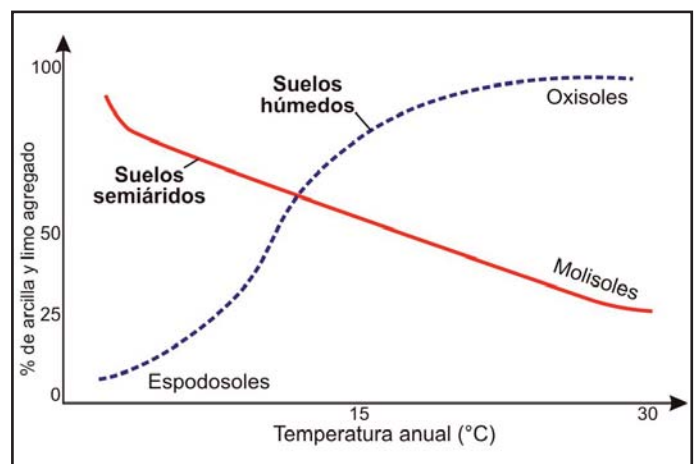


Figura 11: Relación entre agregación y temperatura.

- **Acción del hombre:** el hombre a través del uso y manejo del suelo, afecta la estructura del mismo. El laboreo pone en evidencia la estructura preexistente del suelo pero no la mejora y, a la larga, la deteriora. El hombre puede favorecer la formación de estructura manejando los factores mencionados. Por ejemplo, incorporando materia orgánica, no trabajando el suelo en exceso ni en condiciones desfavorables; modificando, en los suelos sódicos, la constitución del complejo de cambio con el agregado de calcio, etc.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN EL CAMPO

Un criterio de clasificación de la estructura, en descripciones a campo, se basa en determinar los siguientes aspectos.

- a) Tipo y subtipo de estructura, según la forma general y la ordenación de los agregados.
- b) La clase de estructura, según el tamaño de los agregados
- c) El grado de estructura, determinado por la distinción y durabilidad de los agregados.

Se reconocen cuatro tipos primarios de estructura, con sus respectivos subtipos, a saber:

1. **Bloque:** partículas dispuestas alrededor de un punto y limitadas por superficies lisas o redondas.
 - Bloques angulares:** cuando los bloques se encuentran limitados por planos que se interceptan en ángulos relativamente agudos.
 - Bloques subangulares:** cuando los bloques presentan caras redondeadas y planas con vértices, en su mayoría, redondeados.
2. **Esferoidal:** las partículas se encuentran alrededor de un punto, limitadas por superficies convexas o muy irregulares que no se acomodan a los agregados laterales.
 - Granular:** relativamente no poroso.
 - Migajoso:** relativamente poroso.
3. **Prismática:** semejantes a prismas, con las partículas arregladas alrededor una línea vertical y limitadas por superficies verticales relativamente lisas.
 - Prismática:** sin los extremos superiores redondeados.
 - Columnares:** con los extremos superiores redondeados.
4. **Laminar:** con las partículas dispuestas alrededor de un plano horizontal.

Un material puede no presentar estructura, esto ocurre cuando no se observa agregación o arreglo ordenadamente definido de superficies naturales de debilidad. Se dice que el material es masivo, cuando es coherente y de grano simple, si no es coherente.

Muchos horizontes de suelo tienen estructuras compuestas que consisten de uno o más conjuntos de agregados pequeños unidos en agregados mayores; cuando los agregados mayores son perturbados, pueden desha-

cerse en los agregados menores.

Una estructura mixta es cuando coexisten en un mismo horizonte, dos tipos de estructura.

SIGNIFICADO AGRONÓMICO DE LA ESTRUCTURA

La estructura del suelo tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo, en determinados casos, un factor limitante de la producción.

Una de las primeras consecuencias de la estructura es hacer del suelo un medio poroso; ese espacio poroso, a su vez, puede estar ocupado por agua y por aire. De ahí que la estructura afecta marcadamente la relación volumétrica porcentual de las tres fases constitutivas del suelo (sólida, líquida y gaseosa), con directa influencia en las relaciones suelo-agua-planta.

La estructura afecta directamente muchas de las propiedades del suelo, entre ellas, la retención y la conducción del agua, que dependen del espacio poroso, del tamaño y la distribución de los poros; influye en las operaciones de labranza y en el crecimiento vegetal a través de sus efectos sobre el ambiente del suelo en el que opera el sistema radical. La estructura afecta tanto el suministro de agua como la capacidad de aire, la temperatura del suelo y la resistencia que ofrece al crecimiento de las raíces.

Una estructura desfavorable puede acarrear problemas en el desarrollo de las plantas, tales como el exceso o deficiencias de agua, la falta de aire, la incidencia de enfermedades, la baja actividad microbiana, el impedimento para el desarrollo de las raíces, etc. Por el contrario, una estructura favorable permitirá que los factores de crecimiento actúen eficientemente y se obtengan, en consecuencia, los mayores rendimientos en las cosechas.

ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Se dijo que la estructura del suelo tiene una naturaleza variable, muy afectada por condiciones climáticas, biológicas y de manejo. Así un suelo virgen o con muy pocos años de agricultura puede presentar un buen desarrollo estructural con una porosidad que asegure una relación equilibrada entre las fases líquida y gaseosa. Sometido o expuesto a las diferentes fuerzas disociantes, se producirá una degradación de su estructura y con ella, una pérdida de sus características agronómicas favorables.

Se entiende por estabilidad estructural a la medida de la resistencia de los agregados a la ruptura cuando son sometidos a procesos potencialmente destructivos. Tal medida no es absoluta ya que depende del suelo y de la intensidad y naturaleza de las fuerzas aplicadas.

Existen varios mecanismos involucrados en la destrucción de los agregados, los cuales se mencionan a continuación.

- **Dispersión:** este proceso se manifiesta en los suelos sódicos o por la acción de aguas sódicas en el suelo. Es conocido el efecto dispersante del catión sodio

cuando se encuentra en cantidades apreciables en el complejo de cambio. La manera de controlar este mecanismo de destrucción de la estructura es a través del reemplazo, en el complejo de cambio, del catión sodio por cationes bivalentes, de tal forma de promover la floculación. Además, evitar el riego con agua de alto contenido en sodio.

- **Efecto del aire atrapado:** si un agregado de suelo con escaso contenido de humedad es sumergido rápidamente en agua, ésta ingresará por toda su periferia, por sus poros capilares, interconectados entre sí. A medida que el frente de humedecimiento va avanzando, el agua comprime el aire atrapado en el interior del agregado, el cual no puede escapar pues el agua ocupa las salidas. Por otro lado se produce un incremento de temperatura del aire como consecuencia del calor de mojadura. El aumento de la presión del aire atrapado y de su temperatura destruirá el agregado en el momento que las fuerzas de cohesión interna de este, sean superadas. El proceso se visualiza a través de la liberación de burbujas de aire, que, finalmente, logra escapar.

La intensidad del proceso va a depender de la intensidad de las fuerzas que mantienen unidas a las partículas que constituyen el agregado, de la velocidad de humectación, de la humectabilidad de los agregados y del contenido inicial de humedad. A medida que el contenido inicial de los agregados sea bajo, el agua ingresará con mayor rapidez ocasionando un agravamiento del proceso. La presencia de sustancias cementantes y ligantes, aumentará la resistencia de los agregados a destruirse. La materia orgánica juega un rol muy importante pues, actúa como ligante y además por su carácter hidrófobo, el cual provoca una disminución de la velocidad de ingreso del agua a los agregados, minimizando el efecto destructivo. La tensión superficial y la viscosidad del agua afectarán, igualmente, la velocidad de ingreso del agua a los agregados, pero son factores que no manejamos en forma práctica.

- **Impacto de la gota de lluvia:** las gotas de lluvia impactan sobre el suelo superficial con una fuerza proporcional a la masa y a la velocidad de caída de dichas gotas ($Energía\ cinética = m \times v^2$). Esta fuerza de impacto lleva a la degradación del suelo. Cuando el agua precipitada comienza a superar la velocidad de infiltración del suelo, se forma una película de agua sobre la superficie, en la cual quedan en suspensión las partículas del suelo (dispersas por efecto mecánico de las gotas al impactar). Si la superficie se presenta inclinada, el agua de escorrentía arrastrará las partículas dispersas (erosión), caso contrario, sobre una superficie plana o cóncava, el agua permanecerá en el sitio, produciéndose la decantación de dichas partículas. Se depositarán primero las arenas, luego el limo y, finalmente, sellando los poros más pequeños, las arcillas. Se forma así una costra que se irá secando, endure-

ciéndose y transformándose en un sello superficial (suelo planchado)

Este sello o costra, que solo presenta unos pocos milímetros de espesor, por su escasa porosidad, reduce notablemente el paso de agua y gases desde la superficie a las capas inferiores del suelo. Por otro lado, según su dureza, puede ser un severo impedimento mecánico para la emergencia de plántulas de los cultivos, obligando al agricultor, en casos extremos, a realizar una resiembra.

- **Sistemas de cultivo y labranza:** la influencia de los distintos cultivos sobre la agregación, es una función de la potencialidad de sus raíces en la formación de agregados, del efecto sobre la actividad biológica, del grado de protección que ofrezcan al suelo y de las prácticas de cultivo incluidas.

Así cultivos que provean de poca cobertura, poca materia orgánica y que requieran labranzas intensivas, tienden a degradar la estructura. Lo contrario ocurre con los cultivos perennes, con extensos sistemas radiculares, con aportes continuos de materia orgánica y una efectiva protección contra la erosión.

Muchas prácticas agrícolas afectan la estructura del suelo. La maquinaria y los animales compactan el suelo, mientras que la labranza los afloja modificando los agregados hasta lograr el tamaño deseado. La labranza también puede tener efectos adversos debido a que expone los agregados y puede compactar y deslizar el suelo debajo de la profundidad del labranza, formando un "pie de arado". También acelera la velocidad de descomposición de la materia orgánica, afectando con ello la estabilidad de los agregados. La oportunidad de labranza es también un efecto importante pues, cuando el laboreo se realiza en condiciones no adecuadas de humedad, se produce un deterioro de la estructura.

MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Muchos investigadores prefieren utilizar la estabilidad de los agregados más que, por ejemplo, la distribución del tamaño de los mismos, como índice de la estructura en el campo. Esta decisión se basa, principalmente, en el hecho que la resistencia a la ruptura de los agregados frente a fuerzas destructivas, parece relacionarse en gran medida con importantes fenómenos observados a campo.

Los poros de mayor tamaño, relacionados con la estructuración del suelo, favorecen la tasa de infiltración, una buena aireación para el desarrollo de las plantas, etc. Inmediatamente de ocurrido el laboreo del suelo, generalmente estos poros son abundantes. Sin embargo, su permanencia en el suelo va a depender, fundamentalmente, de la estabilidad de los agregados.

Por otro lado, la erodabilidad de los suelos va a disminuir a medida que la estabilidad estructural aumenta.

Para evaluar la estabilidad estructural, los físicos de

suelo someten a los agregados a fuerzas destructivas inducidas artificialmente, de forma de simular los fenómenos, que, naturalmente, se producen en el campo. La naturaleza de estas fuerzas aplicadas artificialmente va a depender de la percepción particular que tiene el investigador del fenómeno que pretende reproducir. De tal modo que algunas metodologías se basan en el efecto destructivo del viento; otras en la acción degradante del agua y sea por inmersión o por efecto mecánico de las gotas de lluvia, etc.

Sin embargo, el concepto de estabilidad estructural se relaciona, principalmente, con la resistencia de los agregados a la acción del agua. A continuación se describen brevemente algunas de las metodologías más utilizadas para la determinación de la estabilidad de la estructura.

- **Método francés (Henin):** este método destaca el efecto del aire atrapado como agente deteriorante de la estructura. El mismo consiste en someter el suelo a tres pre-tratamientos: agua, alcohol etílico y benceno y luego evaluar la cantidad de suelo que queda retenido en un tamiz. El tamizado se realiza bajo el agua, se utiliza un aparato que produce un movimiento helicoidal análogo al que se le imprime al tamiz cuando la operación se hace a mano. Con los resultados se puede establecer un índice de estabilidad estructural.

Con el pre-tratamiento con alcohol etílico (o líquido similar), se atenúa el efecto de estallido pues favorece la expulsión del aire contenido en los agregados. El alcohol etílico, de mayor viscosidad y menor tensión superficial que el agua, penetra más lentamente que esta, de tal manera que favorece la expulsión del aire interno. Cuando la muestra se sumerge a continuación en agua, el efecto estallido disminuye.

Para destacar la característica hidrofóbica de la materia orgánica, se utiliza el pre-tratamiento con benceno (líquido orgánico no miscible con el agua ni fijado por la materia mineral), la materia orgánica presente fija el benceno, rodeándose de una película que protege al agregado del contacto con el agua.

En general, se comprueba que el pre-tratamiento del suelo con alcohol permite obtener más agregados estables (siempre que el suelo no sea sódico) que con agua. El suelo con materia orgánica da, después del tratamiento con benceno, tantos o más agregados que después del tratamiento con alcohol; el mismo suelo sódico, con contenido de materia orgánica, se dispersa menos.

- **Método de la gota (McCalla):** este método destaca el efecto destructivo de la gota de agua al impactar sobre los agregados desnudos.

Agregados individuales del suelo son sometidos a la acción destructiva de gotas de agua aplicadas de una manera estandarizada. El número total de gotas requeridas para la destrucción total del agregado o la fracción de suelo que aún permanece agregado luego de un tiempo dado, son indicativos de la estabilidad estructural.

- **Método del tamizado en seco y en húmedo (De Leenheer and De Boodt):** con esta técnica se pretende evidenciar, principalmente, el efecto disgregante del agua saturando el suelo.

Una muestra de suelo seco en estufa es colocada en un juego de tamices de diferentes tamaños. Se tamiza el suelo y se pesan los agregados de diferentes tamaños obtenidos.

Por otro lado, una muestra similar, previamente humedecida con agua, se tamiza en forma similar a la anterior pero bajo el agua. El humedecimiento previo al tamizado bajo el agua, evita la destrucción de los agregados por efecto del aire atrapado. En ambos casos, el tamizado se realizará con movimientos ascendentes y descendentes constantes y sistemáticos. Con los agregados obtenidos en ambos tamizados (seco y mojado) se elaboran gráficos que muestran el porcentaje en peso de los diferentes tamaños de agregados (Figura 12).

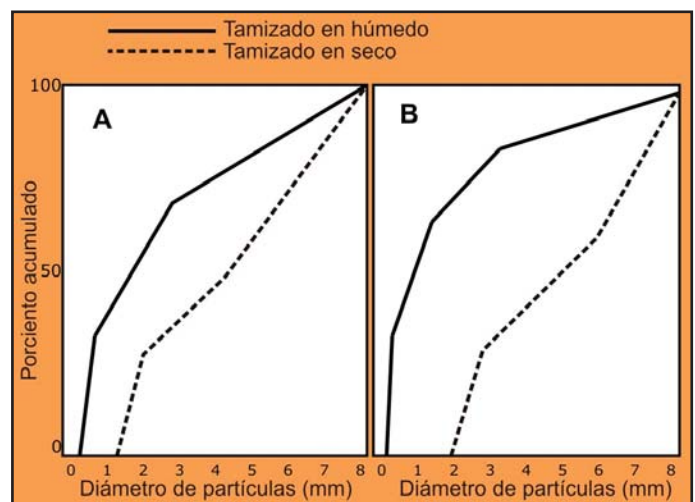


Figura 12: Determinación gráfica de los cambios en el diámetro medio ponderado, en húmedo y en seco, en un suelo arenoso (A) y en uno franco (B).

Con un planímetro se determina la superficie comprendida entre ambas curvas. Este valor de área es utilizado para la elaboración de un índice de estabilidad estructural. Mientras más pequeña es el área entre las curvas, más estables serán los agregados y viceversa.

POROSIDAD

El porcentaje de espacio poroso que hay en el suelo se puede calcular del DA y del DP, si ambos se expresan en la misma unidad de medida. Con la fórmula siguiente se obtiene el porcentaje de suelo que está formado por partículas sólidas.

$$\text{Porcentaje de sólidos} = \frac{DA}{DP}$$

Ese porcentaje, restados del volumen total, nos dará el porcentaje de espacio poroso, de allí la fórmula:

$$\text{Porcentaje del espacio poroso total} = \left(1 - \frac{DA}{DP}\right) \times 100$$

Mediante esta expresión se conoce el porcentaje, en volumen, del espacio poroso, pero no las dimensiones de estos poros. Los suelos con texturas gruesas, en general, tiene un porcentaje menor (30–50%) que los suelos de texturas finas (40–60%); mientras que los orgánicos tiene una porosidad total superior a ambos. De manera similar, estructuras finas generan porosidades superiores a las ocasionadas por estructuras gruesas.

Un suelo idea es aquel que tiene espacio poroso dividido por igual entre poros grandes y pequeños. Tal suelo tiene un alto grado de características físicas favorables en relación con la aireación, permeabilidad y retención de humedad.

Como se mencionó, el DP tiene muy pocas variaciones en los suelos, de ahí que la porosidad total guarda una estrecha relación con los valores de DA. A mayores valores de DA, menor porosidad y viceversa.

Diversos autores han clasificado a los poros del suelo en función a la relación existente entre el tamaño de los mismos y la fuerza con que estos retienen el agua.

Estas clasificaciones son solo aproximadas a la realidad, puesto que fueron obtenidas a partir de técnicas que no toman en cuenta todas las variables que participan en la transmisión y almacenamiento de agua. Por otro lado, el tamaño de los poros fue determinado a través de métodos indirectos como por ejemplo mediante el uso de curvas de retención de agua del suelo.

Cuando se considera la movilidad del agua a través del suelo es necesario considerar no solo el tamaño de los poros del suelo, sino también otros aspectos morfológicos de dicho poros como su *forma*, *orientación*, *tortuosidad* y *continuidad*. La evaluación de estos últimos parámetros requiere la aplicación de técnicas de análisis micromorfológicos, las cuales están fuera del alcance de este curso.

Una clasificación de tamaño de poros en función a relaciones suelo-agua es la de la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación de los poros por tamaño.

			Diámetro equivalente
Poros útiles	Poros de drenaje	Drenaje rápido	> 30 micras
		Drenaje lento	30 a 10 micras
	Poros de almacenaje		10 a 0,2 micras
Poros inútiles			< 0,2 micras

Los poros útiles son aquellos que pueden retener y almacenar agua y, por otra parte, permiten la libre y rápida circulación del agua a fin de asegurar una adecuada aireación.

El agua solo drena rápidamente en el suelo, bajo la acción de la gravedad, si puede moverse a través de poros mayores de 30 a 60 μm (poros que necesitan succiones

de de más o menos 5 a 10 KPa. para vaciarse); las raíces jóvenes de muchas plantas necesitan también poros de alrededor de ese tamaño para una penetración fácil. A través de poros comprendidos entre 10 a 30 μm , el agua puede permanecer entre 24 a 48 horas antes de vaciarse. Los pelos radiculares y los miembros mayores de los microorganismos del suelo, como protozoos y hongos con micelios gruesos, necesitan poros mayores a 10 μm para crecer o moverse, y los microorganismos más pequeños necesitan poros mayores a 1 μm (requieren una succión de 300 KPa. para vaciarse) para su movimiento.

La geometría del espacio poroso es variable según los suelos y puede ser crítica en algunos casos. Por ejemplo, en un suelo arenoso, los poros de retención o almacenamiento pueden resultar escasos, mientras que los poros de drenaje pueden encontrarse en exceso. En un suelo arcilloso, en cambio, con mayor porosidad total que los arenosos, puede existir un exceso de poros de retención e inútiles, en detrimento de los de drenaje.

Un buen estado estructural puede revertir las condiciones extremas mencionadas. Por otro lado, una buena estructuración en todo el perfil del suelo está, generalmente, asociada a una adecuada continuidad o efectividad de los poros en el transporte y almacenamiento de agua (Figura 13).

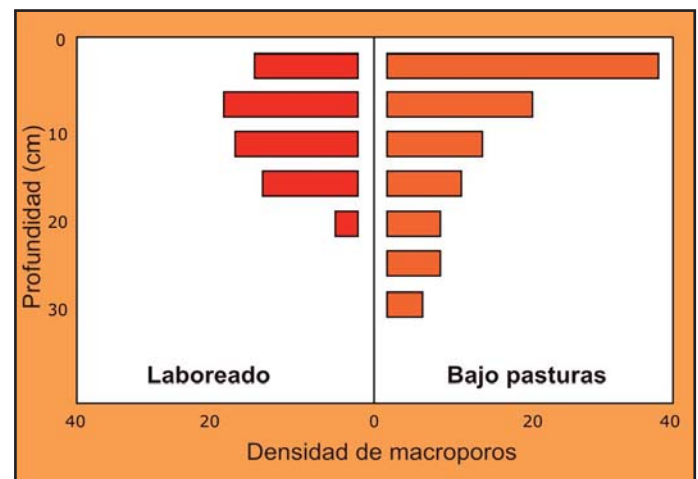


Figura 13: Densidad y continuidad de macroporos (>30 μm) en un suelo franco limoso sometido a laboreo continuo (más de 25 años) y bajo pastura permanente (más de 25 años).

Los diferentes tipos de macroporos presentes en el suelo se originan a partir de procesos particulares. Algunos de estos poros se relacionan directamente con las estructura del suelo y suelen ser, por su grado de interconexión, altamente efectivos en el movimiento del agua. Otros, no se relacionan con unidades estructurales, entre estos últimos aquellos poros elongados, asociados a la actividad de la mesofauna del suelo, son, generalmente, poros transmisores de agua.

DIFERENTES TIPOS DE POROS

- **Poros estructurales:** relacionados a unidades estructurales.
 - a. **Poros de empaquetamiento:** resultan del em-

paquetamiento de partículas individuales (poros de empaquetamiento simples o texturales) o de agregados (poros de empaquetamiento compuestos); son de forma irregular y altamente interconectados.

- b. Fisuras:** creados por procesos de humedecimiento y secado y otros procesos mecánicos, son de forma alargada y aplanada, más o menos conectados.
- **Poros no estructurales:** no se encuentran relacionados a unidades estructurales.
 - a. Cavidades:** se originan por desconexión de los poros de empaquetamiento ocasionada por compactación o reconsolidación. Presentan una forma irregular.
 - b. Cámaras:** se encuentran al final de las cavidades de los gusanos de tierra y de hormigas. Son de forma esférica y elipsoide.
 - c. Vesículas:** se encuentran inmediatamente por debajo de las costras originadas por el impacto de las gotas de lluvia. Son de forma esférica.

BIBLIOGRAFÍA

- **BAYER, L. D.; W. H. GARDNER and W. R. GARDNER.** 1973. Física de los suelos. UTEHA. (editor). Mexico. 529p.
- **BUCKMAN y BRADY.** Naturaleza y propiedades de los suelos. Montaner y Simona S.A. Editores. 590p.
- **HENIN, S.; GRAS, R. y MONNIER, G.** 1972. El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Ediciones Mundi-Prensa. 335p.
- **HILLEL, D.** 1980. Fundamentals of soil physics. Academia Press. 407p.
- **MANUAL DE LEVANTAMIENTO DE SUELOS.** 1965. Traducción del Soil Survey Manual. USDA. Ministerio de Agricultura y Cria. Caracas, Venezuela. 633p.
- **MONTENEGRO GONZALEZ, H y MALAGÓN CASTRO, D.** 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia. 797p.
- **WILD, A.** 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel. Ediciones Mundi-Prensa. 1025p.