

Cátedra de Edafología

Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria  
Universidad Nacional de Tucumán



Foto portada: Soil Science "Structure 7a" CC BY

Guía de estudio

# Física del suelo

2023



Facultad de  
Agronomía,  
Zootecnia  
y Veterinaria  
UNT



# FÍSICA DEL SUELO

Mg. Ing. Agr. Roberto Daniel Corbella

## 1. INTRODUCCIÓN

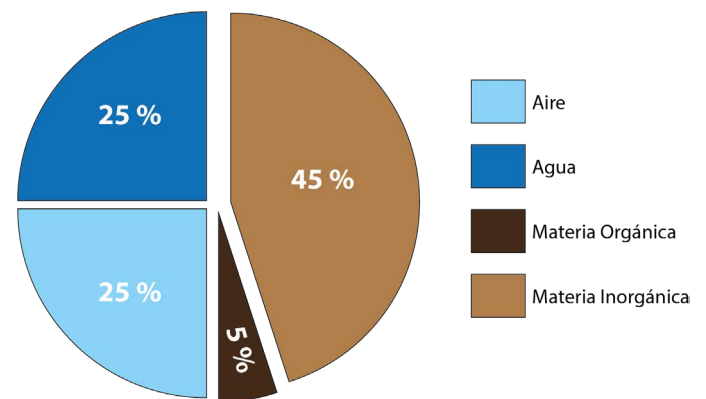
Las propiedades físicas del suelo determinan en gran medida el rol del suelo en un ecosistema y como puede ser manejado correctamente. En las actividades agropecuarias estas propiedades condicionan fenómenos como el crecimiento de las plantas, el movimiento sobre y a través del suelo de agua, nutrientes y sustancias contaminantes. El conocimiento de estas propiedades es de gran utilidad para comprender el comportamiento del suelo por sí mismo y entender otras propiedades relacionadas que se estudiarán en capítulos siguientes.

### 1.2. EL SUELO COMO SISTEMA TRIFÁSICO

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. 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: o sea la 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, absorción 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 fracción 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 de un suelo mineral).



**Figura 1:** Representación gráfica de las fases de un suelo ideal.

## 2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

Las propiedades físicas del suelo se pueden agrupar en:

- Propiedades físicas fundamentales:** textura, estructura, color, consistencia, densidad y temperatura.
- Propiedades físicas derivadas:** porosidad, capacidad de aire, capacidad de agua, compactación y profundidad efectiva de raíces.

En la presente guía se desarrollarán parte de las propiedades físicas fundamentales y derivadas.

## 2.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO POR TAMAÑO

La fase sólida del suelo está compuesta de sustancias de diferente naturaleza química y mineralógica, de variada forma, tamaño y orientación. 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** (Tabla 1).

**Tabla 1:** Fracciones granulométricas.

Diámetro equivalente	Fracción granulométrica
> 25 cm	Pedregosidad o rocosidad (no forma parte de la masa del suelo)
2 mm a 25 cm	Fragmentos gruesos
2 $\mu$ a 2 mm	Fracción fina

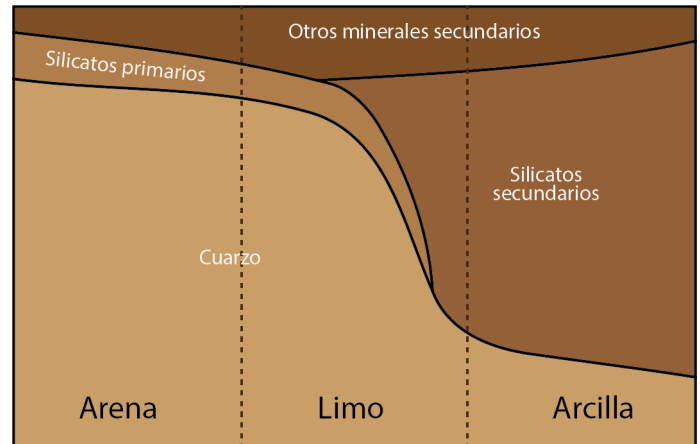
El material de suelo con diámetro equivalente inferior a 2 mm corresponde a la fracción fina del suelo, donde se encuentran la arena, el limo y la arcilla (Figura 2).

### 2.1.1. FRAGMENTOS GRUESOS (2 mm a 25 cm)

No forman parte de la fracción fina (< 2mm) del suelo, pero si son constituyentes de la masa del suelo y pueden afectar el comportamiento del mismo. Se originan directamente del proceso de meteorización de la roca madre, por lo tanto, presenta, prácticamente, su misma constitución. Su forma y angulosidad van a variar con el medio, intensidad y distancia de transporte. A modo de ejemplo podemos citar la grava (2 a 4 mm de bordes redondeados).

### 2.1.2. ARENA (0,05 mm a 2 mm)

Esta fracción también proviene de la desintegración física de la roca madre, manifestando, por lo tanto, una mineralogía similar a ésta. Se presentan,



**Figura 2:** Composición mineralógica de las distintas fracciones granulométricas.

además, algunos minerales primarios, principalmente cuarzo (Figura 2), también fragmentos de minerales secundarios como feldespatos, mica, etc.

### 2.1.3. LIMO (0,002 mm a 0,05 mm)

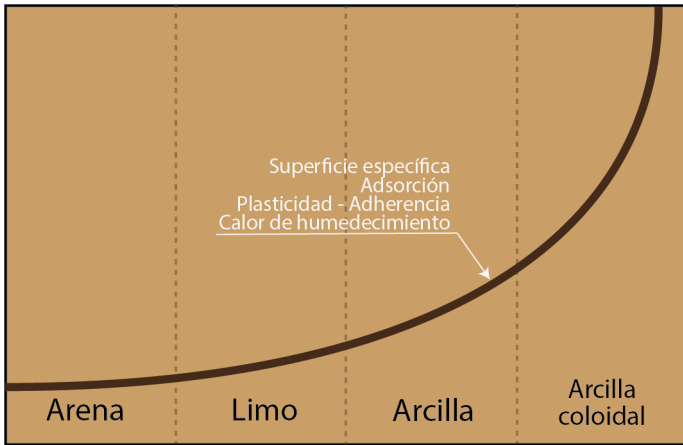
Esta fracción consiste en partículas de tamaño intermedio entre la arena y la arcilla. Mineralógicamente son similares a las arenas, pero, debido a su pequeño tamaño y, consecuentemente, mayor superficie específica que la arena, pueden exhibir, hasta cierto grado, atributos físico-químicos semejantes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

### 2.1.4. ARCILLA (<0,002 mm)

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/unidad de masa, lo que trae como consecuencia una gran actividad físico-química. De ahí que esta fracción sea la que más influye en las propiedades y características de los suelos (fenómenos de expansión y contracción, procesos de absorción de agua y nutrientes, etc.) (Figura 3).

## 2.2. TEXTURA DEL SUELO

La textura es una propiedad física fundamental



**Figura 3:** Variación de algunas propiedades del suelo con el tamaño de la partícula.

que 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 llegar a ser modificada. Entre las acciones que pueden llegar a modificar la textura del suelo se encuentran la remoción de horizontes superficiales por laboreo y el posterior desarrollo de una nueva superficie de textura diferente; la acumulación de materiales acarreados por el viento; 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** como se detalló anteriormente.

Existen distintos sistemas de clasificación de partículas de acuerdo a sus tamaños, sin embargo, los 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 2).

### 2.2.1. CLASES TEXTURALES

El suelo generalmente no presenta una sola frac-

**Tabla 2:** Comparación entre el sistema de clasificación por tamaño de USDA vs ISSS.

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

ción granulométrica, sino una mezcla de fracciones en diferentes proporciones. Una combinación de fracciones granulométricas en una determinada proporción define una clase textural. En la Tabla 3 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 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. Resulta importante observar que un suelo que presente una proporción de arena, limo y arcilla (33% de cada uno) es considerado franco arcilloso y no franco, debido al efecto de la fracción arcilla sobre las propiedades del suelo.

**Tabla 3:** Clasificación de las clases texturales

Arenoso	Texturas gruesas	Arenoso
		Arenoso franco
Franco	Tex. mod. gruesa	Franco arenoso
	Texturas medias	Franco
		Franco limoso
		Limoso
	Texturas moderadamente finas	Franco arcilloso
		Franco arcillo arenoso
Franco arcillo limoso		
Arcilloso	Texturas finas	Arcillo arenoso
		Arcillo limoso
		Arcilloso

Estas clases texturales se resumen en un triángulo textural (Figura 4), 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.

### 2.2.2. FRAGMENTOS GRUESOS

Los fragmentos gruesos son fragmentos libres más grandes que la arena muy gruesa (> 2 mm), fuertemente cementados o más resistentes a la ruptura. Estos fragmentos pueden tener importancia en el almacenamiento del agua, en la infiltración, en el escurrimiento, en el volumen efectivo del suelo, en el crecimiento de las raíces, etc., y pueden ser o no removidos durante las labranzas.

Los fragmentos gruesos son descriptos por su tamaño, forma, y para algunos, por la clase de roca. Las clases pueden ser gravas, guijarros, lascas, pizarras, esquistos, lutitas, pedernal, etc.

La presencia de estos fragmentos gruesos se indica modificando el nombre de la clase textural correspondiente a la fracción fina, por el agregado de un adjetivo que indica el tipo de fragmentos (Tabla 4).

Cuando la proporción de fragmentos rocosos es inferior a un 15% puede usarse el adjetivo ligeramente (por ejemplo: *franco ligeramente graviloso fino*), cuando la proporción es del 15 al 30%, se modifica el nombre de la clase textural (por ejemplo: *franco*

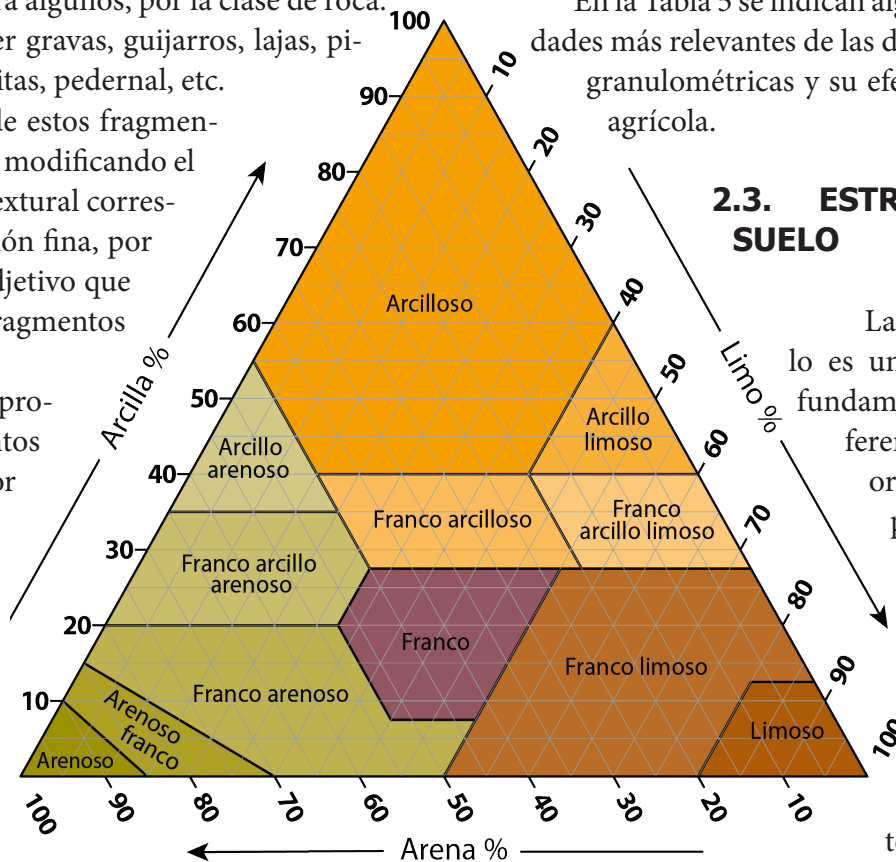
*graviloso fino*), del 35 al 60% puede emplearse el adjetivo muy (por ejemplo: *franco muy graviloso fino*) y si la proporción es mayor del 60 y hasta un 90%, se utiliza el adjetivo extremadamente (por ejemplo: *franco extremadamente graviloso fino*). Si la proporción es superior al 90% se usan los términos gravas, guijarros, piedras o bloques pedregosos.

**Tabla 4:** Denominaciones utilizadas para la descripción de 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
Graviloso	Redondeados o poliédricos	2 a 4
Escamoso	Aplanados	2 a 16

### 2.2.2. PROPIEDADES Y SIGNIFICACIÓN AGROLÓGICA

En la Tabla 5 se indican algunas de las propiedades más relevantes de las diferentes fracciones granulométricas y su efecto en la actividad agrícola.



**Figura 4:** Composición y límites de las doce clases texturales

### 2.3. ESTRUCTURA DEL SUELO

La estructura del suelo es una propiedad física fundamental que hace referencia al arreglo y la organización de las partículas constitutivas del suelo. Se la considera una propiedad física compleja debido a que es condicionada parcialmente por propiedades intrínsecas, como la textura y composi-

**Tabla 5:** Significación agrológica de la textura

Fracción	Propiedades	Significación Agrológica
Grava	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nula plasticidad y cohesión</li> <li>Incapacidad de retención de agua</li> <li>Disminuye el volumen efectivo del suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interferencias en la operación de cultivo</li> <li>Interferencias en la germinación</li> <li>Menos de 20% en suelos de texturas finas favorece el régimen térmico e hídrico</li> <li>Más de 20% en suelos de texturas finas disminuye el espacio poroso</li> <li>En superficie de suelos de texturas finas disminuye la evaporación y favorece la infiltración</li> <li>Reducen la capacidad nutritiva del suelo</li> <li>En suelos de texturas medias y gruesas reducen la capacidad de retención de agua y el volumen efectivo del suelo</li> </ul>
Arena	<ul style="list-style-type: none"> <li>Débil a nula plasticidad y cohesión</li> <li>Poco cambio de volumen</li> <li>Muy débil a débil capacidad de retención de agua</li> <li>Débil a nula actividad físico-química</li> <li>Aireación excesiva</li> </ul>	<p><b>Desfavorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Excesiva capacidad de aire y reducida capacidad de retención de agua</li> <li>Escasa actividad físico-química</li> <li>Fácilmente arrastrable por el agua o el viento, con desarraigo de plantas o efecto abrasivo sobre las mismas</li> <li>Cuando están secos tienen mucha fluctuación térmica</li> <li>Proliferación de ciertas plagas y enfermedades</li> </ul> <p><b>Favorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Permiten profundos sistemas radiculares</li> <li>Fáciles de trabajar ("livianos")</li> <li>Rápida infiltración de agua</li> <li>Lenta evaporación</li> </ul>
Limo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intermedias entre arena y arcilla</li> </ul>	<p><b>Desfavorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Baja estabilidad estructural</li> <li>Suelos con tendencia al "planchado"</li> </ul> <p><b>Favorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Si están constituidos por minerales alterables, poseen buena reserva de nutrientes</li> <li>Buena retención de agua útil</li> </ul>
Arcilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevada plasticidad, cohesión y adhesión</li> <li>Elevada retención de agua</li> <li>Grandes cambios de volumen</li> <li>Elevada superficie específica (interna y externa)</li> </ul>	<p><b>Desfavorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Excesiva capacidad de agua y escasa de aire (según relación con el clima)</li> <li>Muy plásticos y adhesivos en húmedo y duros y compactos en seco. Difíciles de trabajar ("pesados")</li> <li>Sistemas radiculares reducidos, son desfavorables para cultivos de raíz o tallos subterráneos</li> <li>Agrietamientos que pueden llegar a descalzar las plantas</li> <li>No aptos para fundaciones</li> <li>Drenaje pobre</li> </ul> <p><b>Favorables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alta capacidad de intercambio iónico</li> <li>Mejor provistos de nitrógeno</li> <li>Buena estabilidad estructural</li> </ul>
Franco	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equilibradas entre arena, limo y arcilla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las propiedades desfavorables de las arenas y arcillas se encuentran atenuadas</li> </ul>

ción mineralógica, y en parte por factores extrínsecos, como el tipo de uso y sistema de manejo a que se somete el suelo.

Las unidades secundarias que se forman de la unión de las partículas primarias o individuales del suelo, se denominan **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 cau-

sado 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.

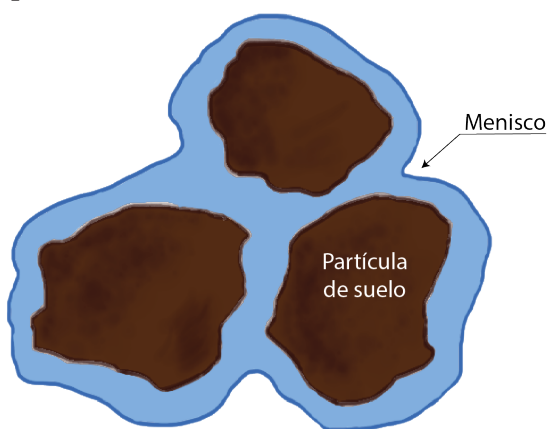
### 2.3.1. MICROAGREGADOS

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

#### 2.3.1.1. 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 (Figura 5). Al disminuir el contenido hídrico, aumenta la curvatura del menisco, aumentando la tensión capilar, la cual es inversamente proporcional al radio del menisco. 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



**Figura 5:** Fuerzas capilares que actúan en la formación de agregados.

que este contenido crítico de humedad corresponde a un 60 a 70% de la capacidad de campo.

#### 2.3.1.2. 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 (ver guía Físico-Química).

#### 2.3.1.3. Fuerzas químicas

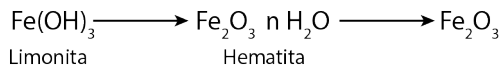
Son las responsables de la estabilización de los agregados, especialmente frente a la acción dispersante del agua. Esto se logra a través de la cementación. Un prerrequisito para la agregación es que el coloide esté floculado. Sin embargo, la floculación no es suficiente, por sí sola, para que exista 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.

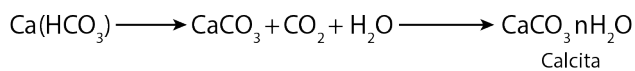
**Elementos Ferruginosos:** El hierro férrico ( $Fe^{3+}$ ) al reducirse, por ejemplo, cuando hay exceso de agua en el suelo, pasa a formas ferrosas ( $Fe^{2+}$ ). El hierro ferroso es móvil y puede difundir al interior de los microagregados. Cuando el exceso de agua desaparece y el hierro pasa a su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

El  $Fe(OH)_3$  explica la mayor estabilidad de los suelos que sufren cortos períodos de hidromor-

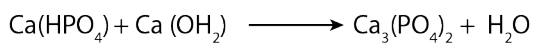
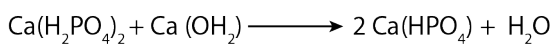
fía. Los óxidos de hierro, típicos de suelos tropicales (orden de los Oxisoles, principalmente), actúan como cementantes mejorando la estructura de los mismos.



**Bicarbonato de calcio y magnesio:** El carbonato de calcio, al hidratarse, se transforma en calcita, la cual actúa como cementante.



**Fosfato 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.



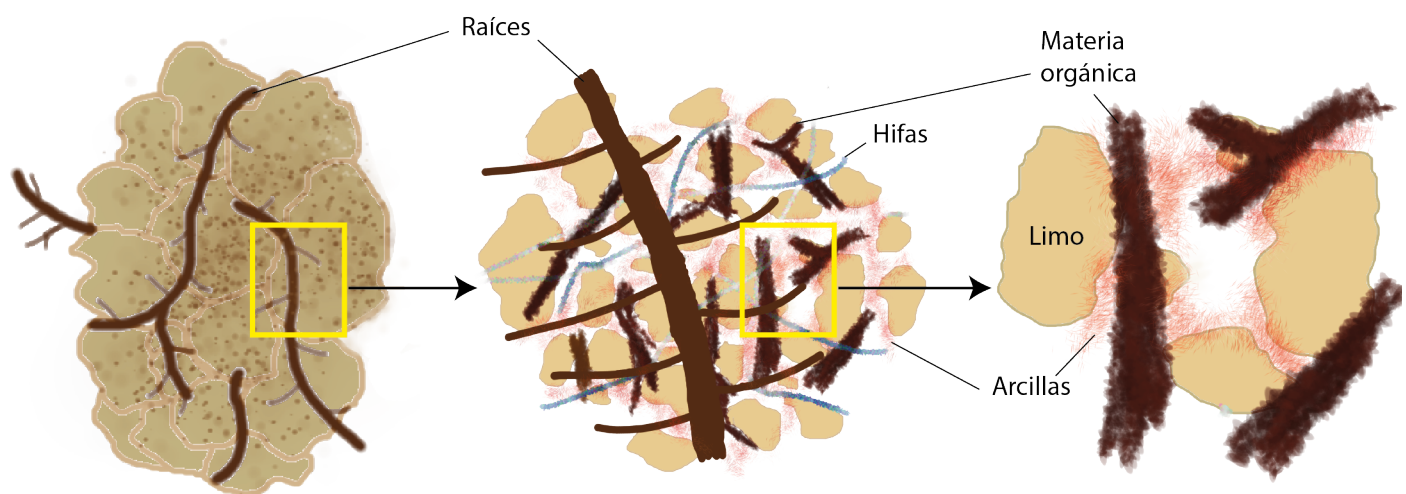
### 2.3.2. MACROAGREGADOS

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. En la Figura 6 se presenta un modelo que da una base para

considerar cómo se reúnen las partículas para conformar unidades mayores. Un macroagregado se encuentra compuesto esencialmente por muchos microagregados unidos principalmente por una red pegajosa compuesta por hifas fungicas y raíces finas. A su vez, estos microagregados pueden estar compuestos de partículas de arena, limo y arcilla, materia orgánica unidos por pelos radiculares, hifas y gomas microbianas.

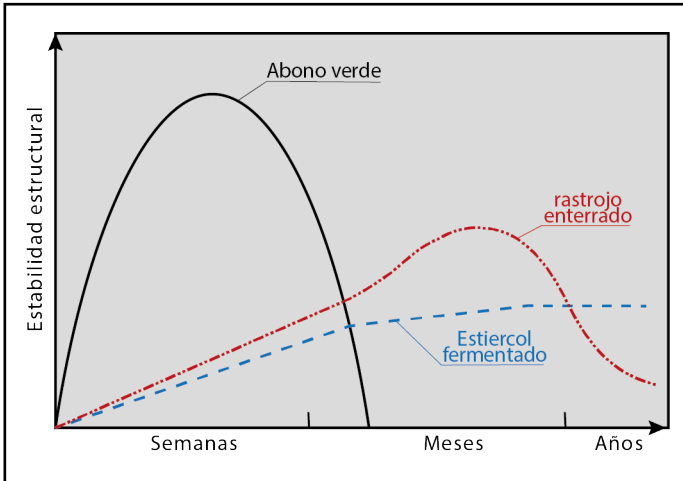
La relación entre la agregación y la materia orgánica (MO) es un proceso dinámico. La estabilidad de los agregados está cambiando continuamente a medida que se añade y descompone la MO. Los agentes cementantes que se forman estabilizan los gránulos y luego la MO, que actúa como ligante, se descompone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

En la figura 7, 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 transitorios de la síntesis microbiana promueven la estabilidad de los agregados. Estos productos de lenta descomposición biológica son los



**Figura 6:** Formación de macroagregados a partir de microagregados





**Figura 7:** Relación entre la estabilidad estructural y distintos residuos agregados al suelo.

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

### 2.3.3. FACTORES QUE AFECTAN LA GÉNESIS DE LA ESTRUCTURA

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 clima y distintos factores biológicos.

#### 2.3.3.1. Efecto del clima

Debemos considerar el efecto del clima a corto y a largo plazo.

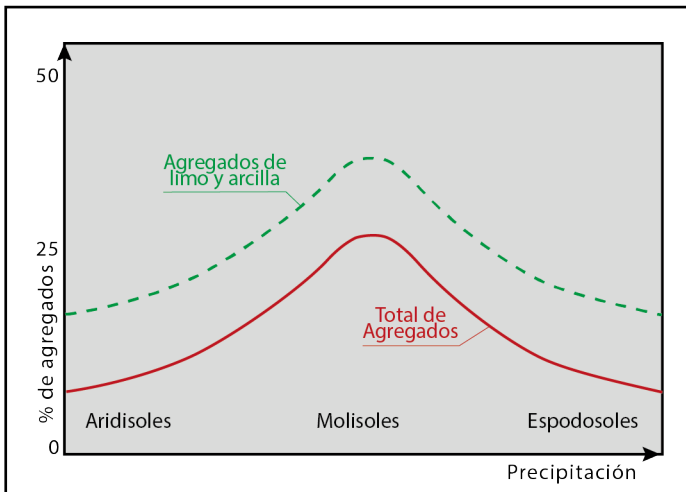
**Corto plazo:** el clima obra a través de su influen-

cia en los procesos de desecación y humectación y de congelamiento y descongelamiento.

**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. El horizonte genético Bw estructura se origina por este proceso (ver guía de horizontes).

**Congelamiento y descongelamiento:** Cuando la temperatura del suelo fluctúa por arriba y por debajo de 0°C, el agua del suelo está sometida a ciclos de congelamiento y deshielo. El congelamiento y deshielo alternantes someten a los agregados del suelo a presiones, a medida que se forman y expanden zonas de hielo puro dentro del suelo, llamadas lentes de hielo. Estas presiones alteran la estructura física del suelo. En un suelo saturado, masivo, la acción del congelamiento rompe las grandes masas y mejora notablemente la granulación. Por el contrario, si en los suelos con buena agregación comienza un proceso de congelamiento-descongelamiento cuando el suelo está muy mojado se puede producir deterioro de la estructura. 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.

**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 MO. 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 8, la fracción de agregados es baja en los suelos del orden de los Aridisoles, es máxima en los suelos del orden de los Molisoles y desciende en los suelos del or-



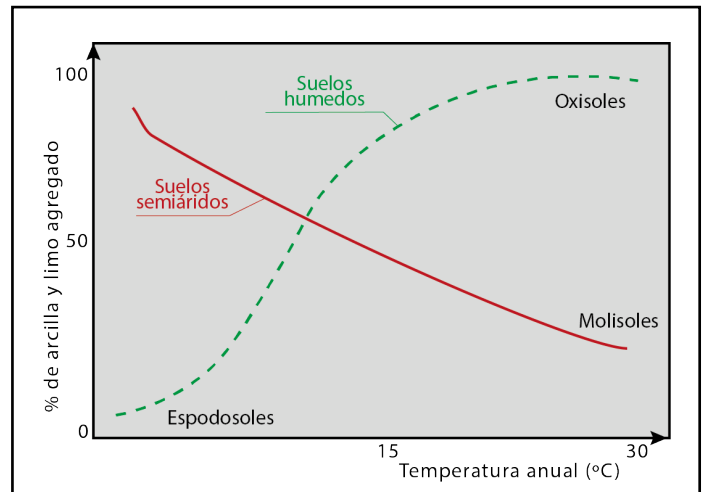
**Figura 8:** Relación distintos tipos de suelos y el porcentaje de agregación de los mismos.

den de 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.

Cuando la Precipitación se mantiene constante y la Temperatura es variable, se aprecia una disminución en el agregado de limo y arcilla en los suelos del orden de los Molisoles debido aparentemente, al menor contenido de materia orgánica a medida que aumenta la temperatura (Figura 9). En los suelos de los órdenes Espodosoles y Oxisoles las causas parecen estar relacionadas con: con los materiales húmicos, la lixiviación y destrucción de arcillas en los Espodosoles y en los Oxisoles con los altos contenidos de hierro y aluminio, (cementación mediante compuestos deshidratados de hierro y aluminio).

### 2.3.3.1. Efectos biológicos

**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 tra-



**Figura 9:** Relación entre la agregación y la temperatura en distintos tipos de suelos.

vés de la exudación de sustancias orgánicas, las cuales, mediante transformación microbiana, se convierten en sustancias ligantes.

**Los microorganismos:** los residuos vegetales, tanto del follaje como de las raíces muertas, favorecen la actividad biológica del suelo. 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.

**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.

**El 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 men-

cionados. Por ejemplo, incorporando materia orgánica, no trabajando el suelo en exceso ni en condiciones desfavorables; modificando, en los suelos sódicos, por ejemplo, la constitución del complejo de cambio con el agregado de calcio.

#### 2.3.4. CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN EL CAMPO

Un criterio de clasificación de la estructura, en descripciones a campo<sup>1</sup>, se basa en determinar los siguientes aspectos.

- a) **Tipo y subtipo de estructura:** según la forma general y la ordenación de los agregados.
- b) **Clase de estructura:** según el tamaño de los agregados. Recordar que, 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.
- c) **El grado de estructura:** determinado por la distinción y durabilidad de los agregados.

Un material puede no presentar estructura, esto ocurre cuando no se observa agregación o arreglo ordenadamente definido de superficies naturales de fragilidad. 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 deshacerse en los agregados menores. Una estructura mixta es cuando coexisten en un mismo horizonte, dos tipos de estructura.

#### 2.3.5. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA ESTRUCTURA A CAMPO

Como ya hemos visto, la estructura del suelo puede ser descripta a campo en base a la forma, tamaño y grado de coherencia de los agregados. Sin embargo, esta metodología y otras semejantes presentan un

1. Ver guía de Morfología del suelo

inconveniente: la dificultad de obtener, fácil y rápidamente, un indicador numérico que refleje la calidad estructural del suelo y que oriente la toma de decisión respecto de las prácticas de manejo necesarias para maximizar la productividad de los cultivos.

En los últimos años se realizaron avances importantes en lo que respecta a evaluar la **calidad estructural** a campo en forma visual y manual. Se desarrolló el método objetivo, rápido, de bajo costo, de fácil comprensión y semicuantitativo denominado “*Visual Assessment of Soil Structure*”, traducido como “Calificación visual a campo de la estructura” (CVC). En este método los criterios que se tienen en cuenta para la calificación de la calidad estructural son: 1- El tamaño, 2- La resistencia, 3- Porosidad, 4- Raíces y 5- Color.

El rango de la calidad estructural (denominado Sq) va desde 1 hasta 5, en donde 1 es Bueno y 5 se refiere a una estructura pobre del suelo.

Los factores que pueden incrementar el puntaje son:

- 1) Dificultad en la extracción del corte de suelo.
- 2) Presencia de agregados más grandes y angulares porosos.
- 3) Agujeros de gusanos grandes y continuos.
- 4) Raíces agrupadas y desviadas.
- 5) Áreas de tierra gris.

Es de destacar que en este método es indispensable identificar las capas con estructura diferente antes de dividir el corte, dado que el puntaje final es producto de la multiplicación del puntaje de cada capa por su grosor y dividiéndolo en la profundidad total.

##### 2.3.5.1. Método para determinar CVC en campo

El método consiste en extraer muestras inalteradas de suelo del lote a estudiar con una pala plana. El volumen de suelo de las muestras debe ser aproximadamente de 25-30 cm de largo (profundidad de penetración de la pala), 20-25 cm de ancho y 10-15 cm de espesor. Una vez extraída la muestra, se coloca sobre una superficie plana (bandeja) para realizar el análisis visual de la estructura.

Se procede a separar las unidades estructurales

según sus líneas de fragilidad, para identificar capas que se diferencian por:

- Las características de los agregados (forma, tamaño y dureza).
- Por la presencia y distribución de las raíces dentro y fuera de los agregados.
- Por la tipología de los poros visibles.

A cada una de esas capas se le determina el espesor y se le asigna un valor (Cvc), de acuerdo con una escala de 1 a 5, donde el número 1 corresponde a la mejor calidad estructural y el número 5 a la peor. Se debe obtener un valor ponderado de Cvc para cada bloque; para ello, se tiene en cuenta el espesor de cada capa identificada y su Cvc y el espesor total del bloque. Valores entre 1 y 3 indican calidad del suelo decreciente pero que aún no requiere cambios en el manejo, mientras que la 4 y 5 demandan cambios en la rotación de cultivos y la realización de prácticas tecnológicas y mecánicas para mejorar la estructura del suelo.

A modo de ejemplo, se presenta una evaluación realizada en un suelo de Tucumán que se observa en la Figura 10.



**Figura 10:** Forma de computar el indicador Calificación visual a campo de la estructura (Cvc) para un suelo que presenta dos capas que se diferencian por la forma y tamaño de los agregados y la cantidad de raíces.

$$\text{Capa 1 (C1)} = 3 \text{ cm} = 1$$

$$\text{Capa 2 (C2)} = 13 \text{ cm} = 2$$

$$\text{Capa 3 (C3)} = 9 \text{ cm} = 3$$

$$\text{CVC final} = (1 \cdot 3) / (3 + 13 + 9) + (2 \cdot 13) / (3 + 13 + 9) + (3 \cdot 9) / (3 + 13 + 9) = 0,12 + 1,04 + 1,08 = 2,24 \text{ adimensional}$$

Valores entre 1 y 3 indican calidad del suelo decreciente pero que aún no requiere cambios en el manejo, mientras que la 4 y 5 demandan cambios en la rotación de cultivos y la realización de prácticas tecnológicas y mecánicas para mejorar la estructura del suelo. Tabla 6.

**Tabla 6:** Valores umbrales de CVC para la productividad agrícola sustentable.

Puntaje de la estructura	Calidad estructural del suelo	Necesidades de manejo
1 - 2	Bueno	No necesita cambios
2 - 3	Justo	Mejoras a largo plazo
3 - 5	Pobre	Mejoras a corto plazo

## 2.4. 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. Pero si es 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 más importantes son la dispersión, el efecto del aire entrampado, el impacto de la gota de lluvia y los sistemas de labranza y cultivo.

### 2.4.1. DISPERSIÓN

Este proceso se manifiesta en los suelos sódicos ( $PSI > 0 = 15\%$ ) o por la acción de aguas sódicas en el suelo. Es conocido el efecto dispersante del catión  $Na^+$  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<sup>2</sup>.

### 2.4.2. EFECTO DEL AIRE ENTRAMPADO

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 la temperatura del aire como consecuencia del **calor de mojadura**. Este incremento de temperatura genera un aumento de volumen del gas, un aumento de la presión del aire entrampado y de su temperatura. Este aumento de presión destruirá el agregado en el momento que las fuerzas de cohesión interna del mismo sean superadas.

El proceso se visualiza a través de la liberación de burbujas de aire, que, finalmente, logran escapar<sup>3</sup>. 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 humedad de los agregados sea menor, el agua ingresará con mayor rapidez ocasionando un agravamiento del proceso. La presencia de sustancias cementantes y ligantes, aumentara la resistencia de los



<sup>2</sup> Ver guía de Físico-química del suelo.

<sup>3</sup> Ver video de la acción del aire entrampado QR

agregados a destruirse.

La materia orgánica juega un rol muy importante pues, actúa como ligante y 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.

Cualquiera sea el mecanismo interviniente, el efecto de la MO 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.
- Reduce la fuerza destructiva del aire entrampado. La materia orgánica retarda el humedecimiento pues es hidrófoba, permitiendo que el aire tenga oportunidad de escapar.

### 2.4.3. IMPACTO DE LA GOTA DE LLUVIA

Las gotas de lluvia impactan sobre el suelo superficial con una energía 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 ya que puede destruir los agregados. 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, endureciéndose 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 (Figura 11). 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. Los suelos de textura limosa se planchan con facilidad.



**Figura 11:** Suelo planchado después de una lluvia. Fuente: [dekel en Pixabay](#)

#### 2.4.4. 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 ofrecen 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 de 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.

## 2.5. DENSIDAD DEL SUELO

La densidad del suelo es una propiedad física fundamental del mismo, en el cual se relaciona la masa y el volumen. En el estudio de los suelos se distinguen dos tipos de densidad: la Densidad de las partículas y la Densidad Aparente.

### 2.5.1. DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS

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  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{t/m}^3$ . La DP permite calcular, entre otras cosas, la porosidad total del suelo, junto con la densidad aparente, estableciéndose las relaciones volumétricas entre las fases sólida, líquida y gaseosa.

Aunque pueden observarse considerables variaciones en la densidad de los suelos minerales individuales (Tablas 7 y 8), las cifras para la mayor parte de los mismos varían entre los estrechos límites de 2,60 a 2,75  $\text{gr/cm}^3$ . 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 pesa 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  $\text{g/cm}^3$ .

**Tabla 7:** 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	Feldespato	2,6	Hematita	5,2
Yeso	2,3	Calcita	2,7	Micas	2,9

**Tabla 8:** 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	1,20
Ferruginosos	2,70

## 2.5.2. DENSIDAD APARENTE

La Densidad Apparente (DA) o Peso Específico Apparente (PEA) 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, conocer el peso de la capa arable, para calcular láminas de riego, etc.

Entre los factores que alteran la Densidad Apparente de un suelo, se encuentra la textura, la estructura, la compactación, la materia orgánica, la actividad biológica y la composición mineralógica del suelo.

### 2.5.2.1 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).

### 2.5.2.2 Estructura

Las partículas elementales del suelo se hallan agrupadas en agregados que originan un mayor espacio poroso originando, por lo tanto, una DA más baja. El tipo de estructura también tiene importancia: estructu-

ras con agregados pequeños generan una mayor porosidad que las estructuras con agregados gruesos.

### 2.5.2.3 Compactación

En la medida en que disminuya el espacio poroso, la DA aumentará, de ahí que, por efecto de la compactación, este 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. La compactación definida en términos muy generales es el aumento de la DA del suelo y es causada por diversos factores como: la compresión de las partículas por procesos pedogenéticos, la contracción natural en los procesos de humedecimiento y secado, el pisoteo generado por los animales, las labranzas continuas, la acción del agua causada por la implementación de sistemas de riego y las presiones generadas por el tráfico y el peso de los vehículos e implementos agrícolas. Estos cuatro últimos procesos son de origen antrópico, siendo el hombre quien puede decidir su manejo racional.

### 2.5.2.4 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 DP del material orgánico.

### 2.5.2.5 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.

### 2.5.2.6 Profundidad

A mayor profundidad el perfil del suelo, hay menos materia orgánica y menos agregación, menor can-

tidad de raíces finas y menor cantidad de poblaciones de microorganismos de suelo, todo lo cual contribuye a aumentar la DA.

### 2.5.2.7 Composición granulométrica

Como ya se mencionó, el material constituyente del suelo presenta diferentes valores de DP, a la cual se le asigna un valor promedio de 2.65 gr/cm<sup>3</sup>. 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 9).

**Tabla 9:** Valores comunes de DA según la textura o composición de algunos suelos.

Suelo	Valor mínimo (gr/cm <sup>3</sup> )	Valor medio (gr/cm <sup>3</sup> )	Valor máximo (gr/cm <sup>3</sup> )
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		
Volcánicos	<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.

## 2.6. POROSIDAD

La porosidad es la propiedad física derivada que hace referencia al sistema de espacios vacíos o poros del suelo donde se cumplen infinidad de procesos. El sistema poroso del suelo impacta directamente sobre el balance del agua, difusión de gases y el crecimiento radicular. Es una de las propiedades edáficas que, con mayor facilidad, y frecuencia sufren la alteración de las operaciones de labranza. El porcentaje de espacio poroso que hay en el suelo se puede calcular a partir de DA y 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.

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

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

$$\% \text{ de espacio poroso total} = [1 - (DA / DP)] \times 100$$

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, tienen un porcentaje menor (30 – 50%) que los suelos de texturas finas (40 – 60%); mientras que los orgánicos tienen una porosidad total superior a ambos. De manera similar, estructuras finas generan porosidades superiores a las ocasionadas por estructuras gruesas.

Un suelo ideal 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 (ver guía 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 dichos 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 que muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10:** Clasificación de poros según su 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  $\mu\text{m}$  (poros que necesitan succiones 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  $\mu\text{m}$ , el agua puede permanecer entre 24 a 48 horas antes de vaciarse (máxima capacidad de retención de agua). Los pelos radiculares y los miembros mayores de los microorganismos del suelo, como protozoos y hongos con micelios gruesos, necesitan poros mayores a 10  $\mu\text{m}$  para crecer o moverse, y los microorganismos más pequeños necesitan poros mayores a 1  $\mu\text{m}$  (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.

Los diferentes tipos de macroporos presentes en el suelo se originan a partir de procesos particulares. Algunos de estos poros se relacionan directamente con la 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.

### 2.6.1. DIFERENTES TIPOS DE POROS

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

## 2.7. COLOR

### 2.7.1. IMPORTANCIA

El color es una de las propiedades edáficas que

se puede observar a simple vista. Se utiliza para diferenciar horizontes y para clasificar los distintos tipos de suelo. La principal razón para estudiar los colores de los suelos es que ellos proporcionan pistas valiosas sobre la naturaleza de otras propiedades y condiciones del suelo. Debido a la importancia del color en la clasificación e interpretación del suelo, se ha desarrollado un sistema estándar para la descripción precisa del color utilizando las **tablas de colores Munsell**. En este sistema, se compara una pequeña porción de suelo con fichas de colores estándar en un libro de colores de suelos. Cada muestra de color se describe mediante tres componentes de color: el **HUE** o matiz en los suelos, el **CHROMA** la intensidad o brillo, (siendo un cromatismo de 0 gris neutro); y el **VALUE** luminosidad u oscuridad (un valor de 0 es negro).

Es una importante propiedad diagnóstica, ya que muestra muchas variables y condiciones del perfil del suelo. Los suelos muestran una amplia gama de rojos, marrones, amarillos e incluso verdes. Algunos suelos casi negros, otros casi blancos, algunos colores del suelo son muy brillantes, otros son grises apagados. Los colores del suelo pueden variar de un lugar a otro en el paisaje, como cuando los suelos adyacentes tienen diferentes colores de horizonte superficial. Los colores también suelen cambiar con la profundidad a través de las distintas capas dentro de un perfil de suelo. En muchos suelos, los horizontes en un perfil dado tienen colores que son similares en HUE, pero varían con respecto al cromatismo y el value. Incluso dentro de un solo horizonte de suelo, los colores pueden variar de un lugar a otro.

## 2.7.2. CAUSA DE LOS COLORES DE LOS SUELOS

La mayoría de los colores del suelo se derivan de los colores de los óxidos de hierro y la materia orgánica que recubre las superficies de las partículas. Los recubrimientos orgánicos tienden a oscurecer y enmascarar los colores derivados de los otros minerales. Los horizontes del subsuelo con poca materia orgánica, por lo tanto, a menudo muestran más claramente los colores del óxido de hierro, como el amarillo de la goethita, el rojo de la hematita y el marrón de la

maghematita. Otros minerales que en ocasiones dan colores distintivos a los suelos son el óxido de manganeso (negro) y la glauconita (verde). Los carbonatos, como la calcita, que normalmente se acumulan en los suelos de las regiones semiáridas, pueden impartir un color blanquecino.

## 2.7.3. INTERPRETAR LOS COLORES DEL SUELO

Por lo general, un horizonte A es más oscuro y un horizonte B es de un color más brillante que los horizontes adyacentes. En algunos casos, el color es un criterio diagnóstico para la clasificación. Por ejemplo, un epipedón mólico se define como un color tan oscuro que tanto su valor como su cromatismo son 3 o menos. Otro ejemplo es el de ciertos órdenes de suelos, que tienen horizontes B caracterizados por colores muy rojos con matices entre 2,5 YR y 10 R. El color también puede proporcionar información cualitativa sobre el estado de humedad actual de un suelo, suelos secos generalmente de colores más claros que los suelos húmedos.

Debido a los cambios de color que tienen lugar cuando varios minerales que contienen hierro se oxidan y reducen, los colores del suelo pueden proporcionar información muy valiosa sobre el régimen hidrológico o el estado de drenaje de un suelo. Los colores brillantes a lo largo del perfil son típicos de suelos bien drenados por los que el agua pasa fácilmente y en los que generalmente abunda el oxígeno. Las condiciones anaeróbicas prolongadas pueden hacer que los recubrimientos de óxido de hierro se reduzcan químicamente, cambiando los colores rojo o marrón de alto cromatismo a colores gris, azulado o gris verdoso de bajo cromatismo, una condición conocida como gley. La presencia de gley en los horizontes superiores, ya sea sola o mezclada en un patrón moteado con colores más brillantes, se usa para delimitar humedales, ya que es indicativa de condiciones de anegamiento durante al menos una parte importante de la temporada de crecimiento de la planta. La profundidad en el perfil en la que se encuentran los colores gley ayuda a definir la clase de drenaje del suelo.

Finalmente, vale la pena mencionar que los sue-

los, con sus colores distintivos, son componentes estéticos importantes del paisaje. Por ejemplo, los colores cálidos y rojizos son característicos de muchos paisajes tropicales y subtropicales, mientras que los grises oscuros y los marrones tipifican las regiones más frías y templadas.

## 2.7.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COLOR

El color del suelo depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. Depende de los procesos pedogenéticos como es la composición de la roca madre de la que se derive. El color del suelo se relaciona con:

1. Génesis y grado de evolución
2. Clima
3. Condiciones de drenaje y aireación
4. Contenido de MO
5. Presencia de ciertos minerales

### 2.7.4.1. Génesis y evolución

Se relaciona entre otros aspectos, con los materiales originales a partir de los cuales se desarrollaron. El color del suelo ha sido utilizado para la definición de índices de evolución. Suelos pardos se asocian a suelos en etapas iniciales de evolución, con escaso contenido de MO; mientras que los suelos rojizos se consideran suelos seniles debido a la elevada meteorización y a la abundante liberación de Fe.

### 2.7.4.2. Clima

En regiones de clima árido los colores de suelo suelen ser claros (gris o beige) debido al bajo contenido de MO. En regiones de clima templado con contenidos mayores de MO los suelos son de colores pardos a negros. Los suelos de clima tropical son generalmente de coloración rojiza. Estos colores se asocian a procesos de alteración de materiales parentales en condiciones de altas temperaturas, lo que desencadena una alta tasa de meteorización con liberación de Fe en un medio oxidativo.

### 2.7.4.3. Condiciones de drenaje y aireación

Los compuestos ferrosos de color azul y verde con frecuencia se encuentran en condiciones mal aireadas, es decir, en condiciones de reducción química. Los moteados indican condiciones alternadas de buena y mala aireación. Suelos con drenaje deficiente suelen presentar coloración verdosa. Cuando el agua se evapora, las formas reducidas se oxidan, generándose moteados de coloración anaranjada. Otras bacterias utilizan el  $Mn^{4+}$  reduciéndolo a  $Mn^{2+}$ , de color negro.

### 2.7.4.4. Contenido de materia orgánica

La MO produce colores oscuros en los suelos. Cuanto mayor es el contenido de MO más oscuro es el color de los suelos.

### 2.7.4.5. Presencia de ciertos minerales

Minerales como el cuarzo, feldespatos, calcita, dolomita y yeso son de colores claros. Los óxidos hidratados de Fe pueden dar un color amarillento a pardo. La hematita da colores rojos entre otros.

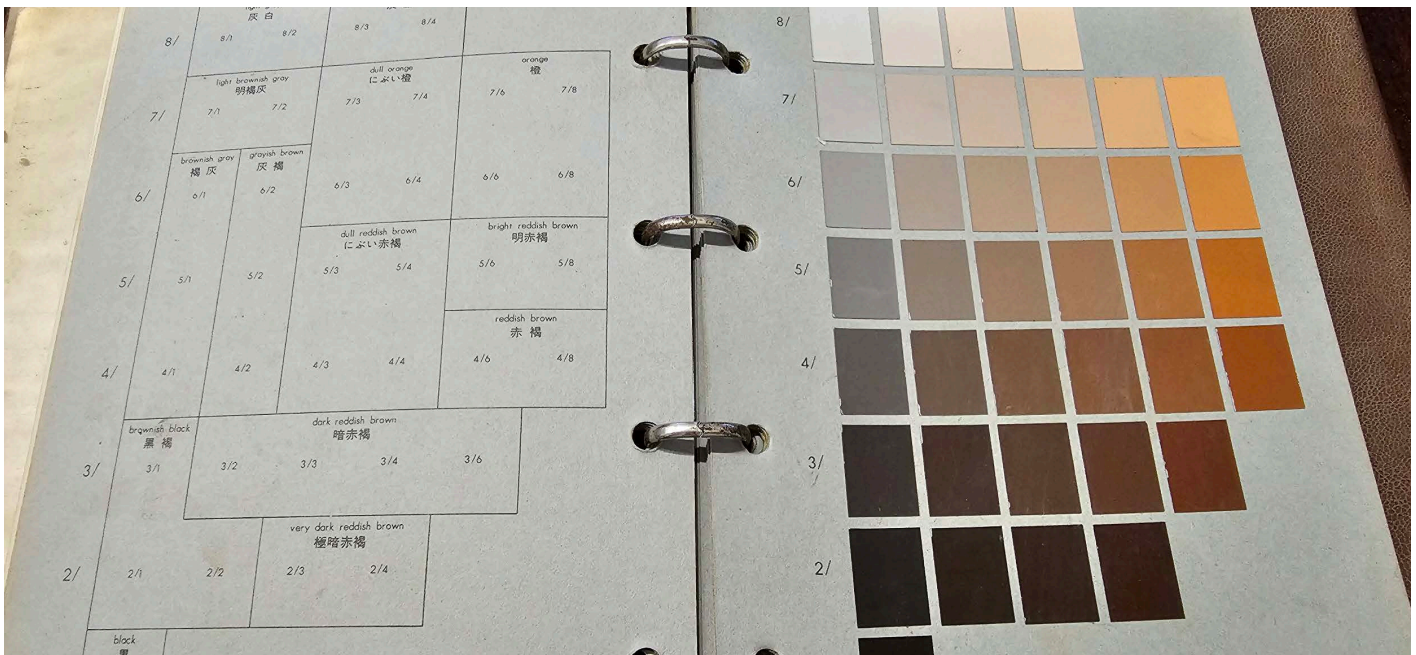
## 2.7.5. MEDICION DEL COLOR

Casi todos los perfiles consisten en varios horizontes que difieren por su color. Cada perfil de suelo-descripto en el campo debe mostrar un cuadro completo de los colores de todos sus horizontes.

El color del suelo se determina por comparación con la carta de colores de Munsell (Figura 12). En esta carta cada color es caracterizado por: Hue, value y chroma.

### 2.7.5.1. Hue (matiz)

Corresponde al color dominante del espectro. El sistema Munsell está basado en cinco colores principales (rojo, amarillo, verde, azul y púrpura) y cinco colores intermedios entre los principales colores (amarillo-rojizo, verde-amarillento, azul-verdoso, púrpura azulado y rojo-purpurado). Cada uno de estos diez



**Figura 12:** Tabla de Munsell. A la derecha se observa la página correspondiente al Hue 5YR y a la izquierda se puede leer el nombre de cada uno de los colores de la página de la derecha.

Hue resultantes se caracteriza por un símbolo correspondiente al nombre del color que es dividido a su vez en 4 segmentos, los cuales son designados por valores numéricos que se aplican como prefijo al símbolo del nombre del Hue, por ejemplo para el amarillo-rojizo de símbolo YR tenemos 2,5YR, 5YR, 7,5YR y 10YR. El esquema se repite para los otros colores. Cada tarjeta de la carta de Munsell corresponde a un Hue.



Indica el grado de saturación del gris neutro por el color espectral. Las escalas de Chroma de los suelos se extienden desde /0 para los colores neutros, a chromas de /8 para la máxima expresión del color usado para los suelos. El Chroma está ordenado horizontalmente en cada tarjeta Munsell, incrementando su valor de izquierda a derecha.

#### 2.7.5.4. Nombre del color

#### 2.7.5.2. Value (luminosidad)

Corresponde a la relativa iluminación del color con relación a la escala neutra del gris. En la escala neutra del gris (acromático), el Value se extiende desde el negro puro (0/) al blanco puro (10/), encontrándose el gris en el medio, por lo que su notación es 5/. Los colores claros quedan indicados por una notación entre 5/ y 10/ y los colores oscuros entre 5/ y 0/. En cada tarjeta de la tabla de Munsell los Values se encuentran ordenados verticalmente mostrando intervalos iguales desde los más luminosos a los más oscuros de ese Hue.

#### 2.7.5.3. Chroma (intensidad o saturación)

Corresponde a la pureza relativa o intensidad

La medición de los colores se realiza por medio de una comparación de las muestras de suelo con las hojas de la tabla de Munsell. Se toma una porción de suelo y se ubica primero el Hue, luego habrá que desplazarse verticalmente para obtener el valor del Value y horizontalmente Chroma hasta coincidir el color del suelo con uno determinado.

La nomenclatura del color de un horizonte consiste entonces en a) El nombre del color (ej. *pardo rojizo*, *pardo muy oscuro*, etc.) que se encuentra en y b) El símbolo o notación del color (ej. *10YR 2/2*). A modo de ejemplo, *Pardo Oscuro 10YR 2/2*, en donde “*Pardo oscuro*” es el nombre de color, “*10YR*” es el Hue y *2/2* son el Value/Chroma. Esta notación permite comparar colores de forma objetiva teniendo una escala de referencia.

Por otra parte, el color del suelo varía con el contenido de humedad, por lo que el color se puede determinar en dos niveles de humedad determinados: muestras secas al aire y en húmedo a la capacidad de campo. Para esto último, se humedece la muestra y una vez que la película de agua desaparece, se determina el color.

Si existen moteados de colores diferentes se debe indicar el color de las motas e indicar el contraste, la abundancia y el tamaño de las mismas (Ej. “*Escasos moteados irregulares, medianos, nítidos, amarillo rojizos*”).

## 2.8. CONSISTENCIA

La consistencia estudia las diferentes respuestas que ofrece el suelo a una fuerza externa, a medida que va cambiando el contenido de humedad del mismo. Es una característica física que gobierna las fuerzas de cohesión–adhesión, responsable de la resistencia que ofrece el suelo a ser trabajado. Las fuerzas que intervienen permiten que las partículas se mantengan unidas y depende del contenido de humedad, por ello la consistencia se expresa en términos de seco, húmedo y mojado o saturado.



### 2.8.1. IMPORTANCIA AGRONÓMICA

El laboreo del suelo tiene implicancias en la estructura del mismo y su comportamiento dependerá de la humedad a la cual el mismo es laboreado. El suelo en estado seco es duro, allí predominan las fuerzas de cohesión entre las partículas sólidas. El suelo trabajado bajo estas condiciones genera la formación de terrones. Con el incremento de humedad del suelo, disminuye la fuerza de cohesión y comienza a incrementarse la fuerza de adhesión debido a la tensión superficial generada por las películas de agua que imparte la condición de friabilidad al suelo. El rango óptimo para las labores agrícolas es el rango de friabilidad, donde hay suficiente espacio entre partículas como para que sean bajas las fuerzas de cohesión y a

la vez no hay un exceso de agua entre partículas como para generar una consistencia plástica. En el rango de consistencia plástica y viscosa, el laboreo puede generar pérdidas de la estructura dado que no ofrece resistencia produciéndose compactación y apelmazamiento del mismo.

La consistencia incluye varios conceptos tales como:

1. Plasticidad y adhesividad (consistencia en mojado).
2. Resistencia a la ruptura (consistencia en húmedo).
3. Repuesta del suelo a la compresión (consistencia en seco).
4. Resistencia a la penetración.

#### 2.8.1.1. Consistencia en mojado

Se determina a la capacidad de campo o un poco por encima de ella. Comprende la adherencia y la plasticidad. Las fracciones más pequeñas (arcillas) son las responsables de la plasticidad y adhesividad del suelo. Las arcillas secundarias silicatadas presentan estructura laminar y participan en una mayor proporción determinando la plasticidad de los suelos. Los suelos con contenidos de arcilla inferiores al 15% no presentan plasticidad. La arcilla montmorillonita genera mayor consistencia que la caolinita.

**Adherencia:** Es la cualidad de adherirse o pegarse a otros objetos. Se aprecia en campo por el grado de adherencia que manifiesta la masa de suelo al ser comprimida entre pulgar e índice. Se la clasifica como:

0. *No adhesiva:* al soltar la presión el material, prácticamente no se adhiere al pulgar ni al índice;
1. *Ligeramente adhesiva:* después de la presión el material se adhiere al pulgar y al índice, pero al separar los dedos quedan limpios.
2. *Adhesiva:* después de la presión el material se adhiere a ambos dedos y tiende a estirarse algo y romperse en dos porciones más que a despegarse de algún dedo.

3. *Muy adhesiva*: después de la presión el material se adhiere fuertemente a ambos dedos y cuando se los separa se estira decididamente.

**Plasticidad**: Es la capacidad de cambiar de forma cuando se aplica una presión y de conservar la deformación cuando la presión a cesado. En campo se la determina por la propiedad o no de formar bastoncillos y la resistencia de éstos a la ruptura. Los grados de plasticidad se expresan como:

0. *No plástico*: no se puede formar hilos.
1. *Ligeramente plástico*: se puede formar hilos, pero la masa es fácilmente deformable.
2. *Plástico*: se puede formar hilos y se requiere moderada presión para deformarlo.
3. *Muy plástico*: se puede formar hilo y requiere mucha presión para deformar la masa del suelo

#### 2.8.1.2. Consistencia en húmedo

Se determina con un contenido intermedio de humedad, entre seco al aire y capacidad de campo. En esta condición casi todos los materiales se caracterizan por: romper en masas pequeñas y no en polvo; ausencia de fragilidad y capacidad del material de hacerse nuevamente coherente cuando se lo comprime. Para evaluar la consistencia en húmedo se elige una masa ligeramente húmeda y se intenta romperla entre el pulgar y el índice. La mayor o menor resistencia que opone a la ruptura nos da la evaluación:

0. *Suelta*: no coherente.
1. *Muy friable*: el material se rompe fácilmente bajo débil presión entre pulgar e índice y recupera cohesión al ser comprimido.
2. *Friable*: el material se rompe fácilmente bajo débil a moderada presión y recupera cohesión al ser comprimido.
3. *Firme*: el material se rompe bajo moderada presión entre pulgar e índice, pero la resistencia es notoriamente evidente.
4. *Muy firme*: el material se rompe bajo fuerte presión.

5. *Extremadamente firme*: el material solo se rompe bajo muy fuerte presión, no así entre pulgar e índice y se debe partir poco a poco.

#### 2.8.1.3. Consistencia en seco

Se determina en una masa de suelo seca al aire. En esta condición la consistencia de los materiales edáficos se caracteriza por: rigidez, fragilidad, máxima resistencia a la presión, mayor o menor tendencia a molerse en polvo o en fragmentos de aristas muy agudas, o incapacidad del material para recuperar su coherencia cuando se lo vuelve a comprimir. Para evaluar esta condición se elige una masa seca y se intenta romperla como en el caso anterior. Su resistencia da la clasificación:

0. *Suelto*: no coherente.
1. *Blanda*: la masa del suelo es muy débilmente coherente y frágil, se muele o desmenuza en forma de polvo o granos individuales bajo muy débil presión.
2. *Ligeramente dura*: débilmente resistente a la presión, fácilmente rompible entre pulgar e índice.
3. *Dura*: moderadamente resistente a la presión, puede romperse con las manos sin dificultad, pero apenas puede partirse entre pulgar e índice.
4. *Muy dura*: muy resistente a la presión, solo con dificultad se consigue romperlo con las manos, irrompible entre los dedos;
5. *Extremadamente dura*: resistente en extremo a la presión, no se puede romper con las manos.

#### 2.8.1.4. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración es la capacidad del suelo en su estado confinado para resistir a la penetración de un objeto rígido. La forma y el tamaño del elemento de penetración debe ser definido. La resistencia a la penetración depende fuertemente del contenido hídrico, el cual debe ser especificado. En campo la resistencia a la penetración se determina con

el penetrómetro, algunos de los cuales, llamados penetrógrafos, grafican las presiones ejercidas. La Tabla 11 da las clases por resistencia a la penetración en función de la presión requerida para empujar una varilla cilíndrica de extremo plano con un diámetro de 6,4mm a una distancia de 6,4 mm en el suelo en un segundo. La evaluación de la resistencia a la penetración, cuando la capa de suelo está a o cerca de su máximo contenido hídrico es una estrategia útil para la evaluación de limitaciones a la penetración y desarrollo radical.

**Tabla 11:** Clases de resistencia a la penetración.

Clase	Resistencia (MPa)
Débil	<0,1
Extremadamente baja	<0,01
Muy baja	0,01 - 0,1
Intermedia	0,1 - 2,0
Baja	0,1 - 1,0
Moderada	1,0 - 2,0
Fuerte	>2,0
Alta	2,0 - 4,0
Muy alta	4,0 - 8,0
Extremadamente alta	>8,0

### 3. BIBLIOGRAFÍA

- Marta E. Conti-Lidia Giufré 2011 Edafología, Beses y Aplicaciones Ambientales Argentinas: Universidad de Buenos Aires ISBN 978-950-29-1323-0.
- Nyle C Brady – Ray R. Weil Fourteenth Edition 2008 The Nature and Properties of Soils, PEARSON, Prentice Hall ISBN 0-13-227938-X.
- Rafael Giménez 2018 Física del suelo, www. Edafología.org 2021 -FAZ y V-UNT
- Roberto H. Balbuena, Guido F. Botta y Ezequiel R. D. Rivero 2009 Herramientas de labranza para la descompactación del suelo agrícola. Orientación Grafica editora SRL ISBN 978-987-9260-66-1.