



Programa de la asignatura:

Ingeniería ambiental de suelos

U1 | Caracterización de suelos



DCSBA



TECNOLOGÍA
AMBIENTAL



Unidad 1. Caracterización de suelos



Suelo fangoso seco y agrietado. Tomado de: www.freepik.com



Índice

Presentación de la Unidad.....	4
Propósitos de la unidad	5
Competencia específica	6
Actividades.....	6
1.1. Clasificación del suelo	7
1.1.1. Formación y morfología del suelo.....	7
1.1.2. Composición del suelo.....	25
1.2. Propiedades del suelo	32
1.2.1. Propiedades físicas	32
1.2.2. Propiedades fisicoquímicas y biológicas.....	39
1.3. Contaminación del suelo	45
1.3.1. Agentes contaminantes	46
1.3.2. Contaminación por fitosanitarios.....	50
1.3.3. Contaminación por metales pesados.....	59
Cierre de la Unidad.....	67
Para saber más	68
Fuentes de consulta	71



Propósitos de la unidad



Al término de esta unidad podrás:

1

Distinguir los diferentes tipos de suelo clasificados por su formación, composición, y por las propiedades físicas.

2

Comprenderás las propiedades fisicoquímicas que determinan los procesos de transporte de contaminantes en un suelo.

Se te recomienda que, cuando te surja duda sobre la terminología en esta disciplina, **consultes** la *Base Referencial Mundial del recurso suelo*, la cual funge como glosario de edafología, y que se basa en la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*). Para revisarla, da clic en la siguiente liga:

http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wsrr84s.pdf



Competencia específica



Define los factores que facilitan el transporte de contaminantes en suelos para caracterizar sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, identificando la interacción entre sus componentes.

Actividades



Las instrucciones de las actividades de aprendizaje, las podrás consultar en el espacio de *Planeación del docente en línea*, toma en cuenta que para estas unidades se han generado actividades colaborativas, individuales, complementarias, autorreflexiones y la evidencia de aprendizaje.



1.1. Clasificación del suelo

En este primer tema serás capaz de identificar entre los diferentes tipos de suelo clasificados por los horizontes, los factores y las etapas de formación. En el desarrollo de esta unidad se toma como referencia el recurso suelo de la FAO, pues abarca y estandariza distintas clasificaciones del mundo con la finalidad de tener una base homologada sobre los tipos de suelo.



Para profundizar en la clasificación establecida, consulta el primer capítulo del documento *Base referencial mundial del recurso suelo de la FAO*, llamado Antecedentes de las páginas 6 a 12, mismo que encontrarás en la carpeta *Material de estudio*.

Para comprender la clasificación de los suelos revisarás la relación entre los diversos elementos formadores de suelo y se indicarán los distintos horizontes de un suelo que le proporcionan una nomenclatura de acuerdo a ciertas características. Posteriormente estudiarás las tres fases que componen a un suelo ya formado, es decir, la sólida, la líquida y la gaseosa; y finalmente, la interrelación entre estas mismas fases.

1.1.1. Formación y morfología del suelo

El suelo es una capa fina compuesta por un conjunto de sustancias que recubre la superficie de la Tierra, que es estudiado por medio de la edafología y es el resultado de un proceso de transformación (FAO, 2006).

En este subtema se explican, en primer lugar, los principales factores formadores como son la roca madre, el clima, el relieve y los organismos; en segundo lugar, se resumen las etapas de formación: fragmentación, alteración química y translocación de sustancias; y en tercer lugar, se explica la morfología del suelo dada por los horizontes que le proporcionan una clasificación.



Factores formadores de suelo

En el proceso de formación del suelo intervienen una serie de factores que condicionan la composición y la rapidez de formación; éstos son la roca madre, el clima, el relieve y los organismos (Jenny, 2011; Buol, et al., 2003).

1. **Roca madre.** Es la principal fuente de los materiales sólidos, particularmente de los minerales que van a conformar el suelo. Algunas propiedades de los suelos dependen directamente de la roca (ígnea o sedimentaria) que lo formó, e inciden en la evolución del mismo; estas propiedades son la composición mineralógica, la permeabilidad y la granulometría.



2. **El clima.** La variación de los algunos elementos del clima a lo largo del año, principalmente la temperatura y la humedad, son elementos que regulan las siguientes propiedades en un suelo:



3. **El relieve.** La inclinación y longitud de las laderas, la elevación y la orientación, son los elementos del relieve que más influyen en la formación de suelos de la siguiente manera:

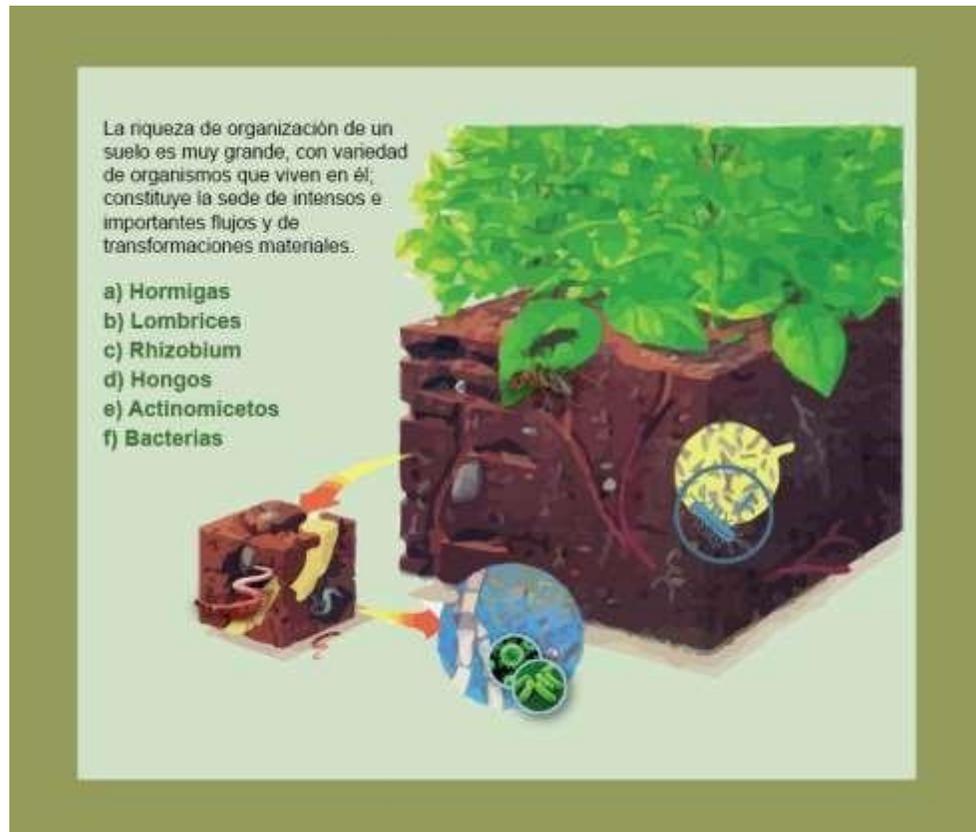


4. Los organismos. La presencia de organismos y microorganismos causan modificaciones al suelo, incorporando nutrientes a través de sus ciclos biológicos. La presencia de organismos modifica el suelo en diferentes formas:





Riqueza de organización del suelo.



Tomada de Margalef, (1992).



Si requieres conocer a fondo cada uno de estos factores formadores de suelo, se te recomienda consultar el texto *Factors of soil formation: A System of Quantitative Pedology* del autor Hans Jenny, que podrás encontrar en la sección *Para saber más*.

Los factores formadores del suelo se relacionan entre sí, no se presentan en forma secuencial, sino que todos, en conjunto, actúan para formar el suelo. Sin embargo, se han logrado distinguir diferentes etapas en las cuales es clara la diferencia de fenómenos que ocurren y que se caracterizan:



Etapas de formación del suelo

A lo largo del estudio de la edafología se han identificado tres principales etapas en la formación de suelo: fragmentación, alteración química y translocación de sustancias (Bolt y Bruggenwert, 1978; Buol, et al., 2003; Jenny, 2011), etapas que a continuación se explican:

1. Fragmentación. Consiste en la desagregación física del material original. Se observa cuando una roca se fractura o rompe y se forman bloques de diversos tamaños, como se puede observar en la siguiente imagen:

Proceso de fragmentación de una roca.



Tomada de NRCS, (2010).

Se ha identificado que la fragmentación se origina por varios fenómenos, los cuales se explican en el siguiente cuadro:



Procesos de fragmentación de suelos.

Insolación

- La radiación solar calienta a las rocas, sometiéndolas a intensas presiones por dilatación.

Congelación

- El agua penetra en los poros, se congela, aumenta de volumen y fragmenta a las rocas.

Efecto de descarga

- El cambio de presión que ocurre entre la roca natural comprimida y el surgimiento del material interno genera expansión y fractura de la roca.

Dilatación/contracción

- Los cambios de humedad producen cambios de volumen que fragmentan las rocas.

Cristalización

- En los poros de las rocas se forman cristales con la solución de agua y minerales, y éstos aumentan de volumen la fractura.

Acción biótica

- Las raíces de las plantas penetran en las grietas de las rocas y, cuando crecen, fracturan la roca.

Basado en Buol, et al. (2003).

2. Alteración química. Es una serie de procesos en donde el aire, el agua, los organismos y los minerales de la roca en conjunto reaccionan. Los organismos extraen minerales como nutrientes para sobrevivir, consumen agua y oxígeno, lo que provoca una alteración química al provocar un desequilibrio, principalmente de potasio, calcio y magnesio (Bolt y Bruggenwert, 1978). Un proceso de alteración química muy común es la cristalización; en la siguiente imagen se puede observar un ejemplo de este proceso al microscopio.

Proceso de cristalización en una roca.





Tomada de NRCS, (2010).

Con base en los estudios de Bolt y Bruggenwert (1978) se han identificado los principales procesos de alteración química en minerales y la materia orgánica que se presentan en los siguientes cuadros:

Procesos de alteración química en los minerales.

Solución

- Afecta sólo a aquellos compuestos que son directamente solubles en agua; por lo general ocurre en rocas sedimentarias compuestas por sales.

Hidratación

- Las moléculas de agua son atraídas por los desequilibrios eléctricos, quedando fijadas en los constituyentes del suelo.

Hidrólisis

- Reacción química de los H^+ y OH^- del agua que se intercambian con los cationes y aniones de los minerales.

Oxidación/reducción

- Alteración química de los materiales del suelo por pérdida o ganancia de electrones de sus iones constituyentes.

Carbonatación

- Es cuando el dióxido de carbono tiene la capacidad de disolverse en el agua y forma ácido carbónico que reacciona con minerales (Ca, Mg, Mn, Na, K).

Basado en Bolt y Bruggenwert, (1978).

Procesos de alteración química en la materia orgánica.

Humificación

- Alteración entre productos orgánicos

Mineralización

- Destrucción total de los restos orgánicos

Basado en Bolt y Bruggenwert, (1978).

Diversos estudios han logrado identificar un gran número de procesos de alteración química, llamados también procesos de meteorización. Basado en los trabajos de



Auerswald, et al. (1997), y de Wilding, et al. (1983), se presenta enseguida un cuadro sinóptico de estos procesos.

Principales procesos de meteorización de suelos.

Melanización

- Representa la coloración oscura, más o menos negra. Es el resultado de la impregnación de los restos orgánicos en el suelo.

Empardecimiento

- Representa la coloración parda o café que aparece en el suelo como consecuencia de la alteración de los primeros minerales que liberan hierro.

Rubefacción

- Los compuestos de hierro producidos como consecuencia de la alteración mineral sufren una deshidratación total, cristalizando en forma de óxidos.

Fersialitización

- Es el proceso de formación de silicatos de la arcilla como son hierro, sílice y aluminio.

Ferralitización

- Alteración extrema de los minerales, con un profundo lavado de alcalinos y alcalinotérreos, llegándose a producir hasta importantes pérdidas del silicio. También se produce un enriquecimiento de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, de cuarzo, así como de los filosilicatos de la arcilla.

Gleyzación y Pseudogleyización

- La formación de ambos procesos está condicionada a la existencia de capas de agua que saturan el suelo, lo que provoca desplazamiento del agua que, a su vez, desplaza oxígeno y lo acidifica por efecto de la materia orgánica.

Basado en Auerswald et al. (1997) y de Wilding et al., (1983).

3. Translocación. Se refiere a la combinación de agregación, mezcla, concentración y separación de materiales del suelo. Estas acciones son realizadas por los organismos que viven en el suelo, como las lombrices, hormigas, entre otros, que excavan galerías (ver la siguiente imagen). También es la acción del agua que transporta los materiales, ya sea en suspensión o en disolución.



Galería de lombrices en el suelo.



Tomada de NRCS, (2010).

De acuerdo al trabajo de Auerswald, et al. (1997), y de Wilding, et al. (1983), se han identificado los principales procesos de translocación que se muestran en el cuadro siguiente:



Principales procesos de translocación de materiales y sustancias en suelo.

Lavado

- Es el transporte y eliminación de los iones disueltos en la solución del suelo.

Desbasificación

- Cuando el proceso anterior se intensifica y produce el transporte y eliminación de los iones adsorbidos en el complejo de cambio del suelo.

Salinización

- Es el resultado de la acumulación de sales solubles en el suelo.

Gypsificación

- Es el proceso responsable de la acumulación de yeso.

Iluviación de arcilla

- Representa la migración de la arcilla de los horizontes superficiales a los profundos por la acción de las aguas de infiltración.

Podzolización

- Se refiere a la migración de aluminio y hierro (eluviación) junto con materia orgánica en un medio fuertemente ácido.

Arcilloturbación

- Provoca la mezcla de los materiales del suelo y conduce a la formación de suelos muy homogéneos, sin cambios en sus propiedades.

Cementación

- Ocurre cuando se acumulan materiales en gran cantidad en un horizonte que se endurece en forma de costras.

Basado en Auerswald et al. (1997) y de Wilding et al., (1983).

Morfología del suelo

Tanto los factores formadores como las etapas de formación de suelo actúan lentamente desde la superficie y disminuyen su intensidad gradualmente conforme aumenta la profundidad del suelo. Se observa que a lo largo de esta profundidad se forman capas denominadas horizontes, caracterizadas por algunas propiedades como el color, la textura y la estructura, cuya superposición constituye el perfil del suelo.



El color, la textura y la estructura de cada capa son las propiedades físicas que diferencian cada horizonte, propiedades a las que la FAO (2006) les ha designado una **nomenclatura** conformada por un conjunto de letras y números, con la finalidad de uniformizar criterios. Los principales horizontes determinados por la FAO se muestran en la tabla siguiente:

Tabla. Horizontes principales.

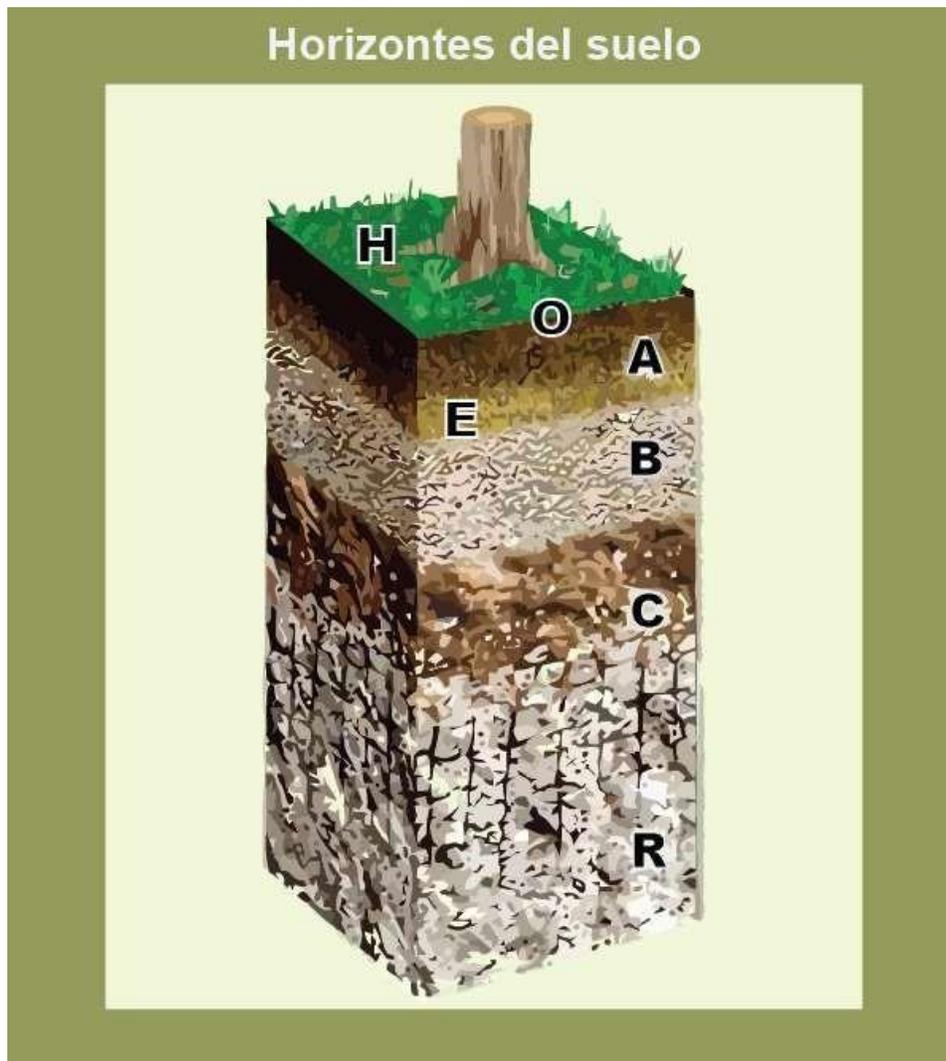
Horizonte	Tipo	Textura	Color	Estructura	Características
H	superficial	materia orgánica	diversos	sin estructura	acumulación de materia orgánica saturada en agua, inicia proceso de descomposición
O		materia orgánica	diversos	sin estructura	formación de humus, baja el contenido de agua
A	subsuelo	humus, arcilla, arena	gris y negro	migajosa y granular	alto contenido de materia orgánica y humus, gran contenido de arcilla, presencia de lavado de materiales
E		humus, arcilla, arena	claros	laminar	bajo contenido de humus, disminuye la arcilla, principal zona de lavado
B		arcilla y arena	pardo y rojo	bloques angulares, prismáticos	enriquecimiento de arcilla y óxidos, acumulación y precipitación de materiales de lavado
C	subterráneo	roca	diversos	rocosa	suelo suelto a duro, roca madre con rasgos de meteorización sin edafizar
R		roca	diversos	rocosa	roca dura, no se puede cavar por ser lecho rocoso

Basado en FAO (2006) y Fanning y Balluff (1989).

En la siguiente imagen observa todos los horizontes del suelo mencionados en la tabla anterior:



Horizontes del suelo.

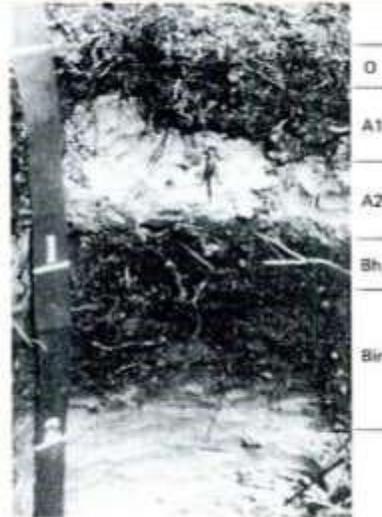


Fuente: UnADM (2015)

En la siguiente imagen podrás observar un ejemplo de los diferentes horizontes del suelo:



Perfil de un espodosol mostrados los horizontes O, A1, A2, y B2.



Tomado de Milton y Troeh, (1982).

Los horizontes no son homogéneos y presentan variaciones que se caracterizan por los diversos componentes que contienen. De esta manera, se le designa una nomenclatura que está dada por una letra minúscula que acompaña a la letra mayúscula del horizonte mayor. En la tabla que a continuación se muestra puedes observar esta lista:

Tabla. Características dentro de horizontes mayores.

Símbolo	Característica
a:	materia orgánica (fibra <17% del volumen)
b:	horizonte enterrado
c:	nódulos cementados de Fe, Al, Ti, Ma
d:	horizonte alterado sin desarrollo de raíces
e:	materia orgánica (fibra >17% del volumen)
d:	suelo congelado
g:	suelo de color claro por déficit de hierro
h:	acumulación iluvial de materia orgánica
i:	materia orgánica (fibra >40% del volumen)
k:	acumulación de carbonatos
m:	suelo cementado
km:	carbonato
qm:	sílice
sm:	hierro



ym:	yeso
kq:	limo y sílice
zm:	sales
n:	acumulación de sodio
o:	acumulación residual de sesquióxidos
p:	suelo de labranza
q:	acumulación de sílice
r:	residuo de roca blanda
s:	acumulación iluvial de sesquióxidos y materia orgánica
ss:	presencia de zonas de fricción
t:	acumulación de arcilla
v:	plintita
w:	desarrollo de color y estructura
x:	característica de fragipan
y:	acumulación de yeso
z:	acumulación de sales

Basado en Fanning y Balluff, (1989).



Con lo anterior puedes identificar tipos de suelos por sus horizontes; sin embargo, es un tema que compete a la edafología, por lo que, si requieres información detallada de cada horizonte, podrás encontrarla en el libro *Base referencial mundial del recurso suelo* (FAO, 1998), específicamente en los apéndices 1. Designación de Horizontes de suelos, y 2. Códigos para referenciar grupos de suelos y subunidades de suelo, los cuales podrás revisar en la sección *Para saber más*.

La designación de los horizontes es una clasificación básica de los suelos a partir de la cual, y de otras características, se han desarrollado otras. De esta manera, es frecuente que se clasifiquen los suelos por su color, textura y estructura (Fanning y Balluff, 1989; Schoeneberger, et al., 1997).

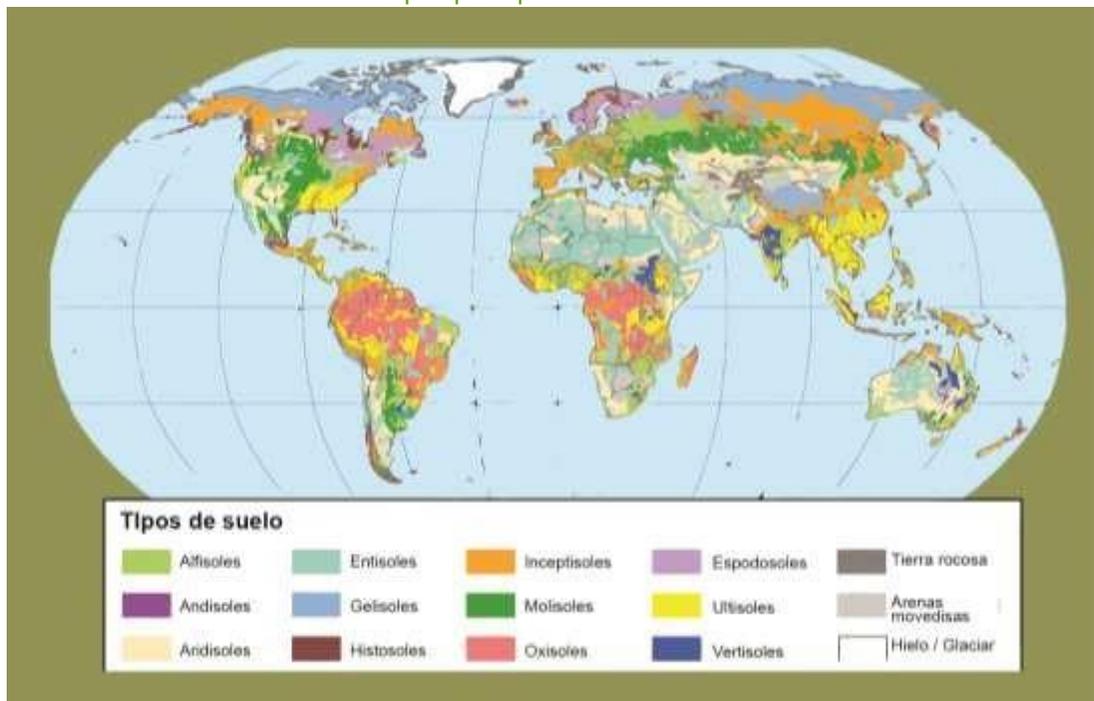
De entre las numerosas clasificaciones, las más empleadas se muestran en la siguiente tabla:



Tabla. Principales clasificaciones de suelos

Clasificación de suelos por organismo	Fuente en internet
U. S. Soil Taxonomy	Podrás encontrar esta taxonomía en el carpeta <i>Material de estudio</i> .
Diagnostic horizons, properties and materials	http://www.fao.org/docrep/w8594e/w8594e06.htm#chapter%203:%20diagnostic%20horizons,%20properties%20and%20materials

Tipos principales de suelos.



Tomada de Hillel, D., (2008).

En el caso de México, se ha empleado la clasificación USST, y partir de ésta se localizan los diferentes tipos de suelo a lo largo del territorio nacional. Esta información la puedes encontrar en las siguientes ligas.



Tabla. Tipos de suelo y localización en México

Distribución de suelos en México	
INEGI	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/
SEMARNAT	http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica-am/informe/acrobat/capitulo2-1-6.pdf

Una vez que consultaste los diferentes suelos que existen en México, los podrás localizar por región y entidad. En el mundo existe una gran diversidad de éstos, los cuales han sido clasificados de acuerdo a los horizontes y sus propiedades, como se ha visto en este subtema. Puedes hacer una búsqueda sobre este tema con las palabras claves de “Tipos de suelos en México”. Un compendio de esto se presenta en el documento *Mapas de suelos en el mundo*, el cual puedes **consultar** en la siguiente liga: <http://www.fao.org/nr/land/soils/en/>

Si quieres profundizar aún más en el tema, a continuación, se presenta un sitio en internet del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS), en donde se muestran “Los Doce Órdenes de Taxonomía de Suelos”, una serie de fotografías de tipos de suelos que te permitirán entender en forma clara el proceso de formación, así como distinguir entre los diferentes tipos de suelo. Para **revisarlo**, da clic en la siguiente liga: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/clasificacion-de-suelos/taxonomia-de-suelos-de-usda/es/>

En este subtema entendiste el proceso de formación de suelo, en donde intervienen varios factores y etapas en forma cíclica y relacionada. Asimismo, ya eres capaz de distinguir entre los diferentes tipos de suelos que están clasificados de acuerdo a los horizontes que los conforman y algunas características como la textura, color y estructura. Esta información será muy útil para que puedas estudiar y entender con facilidad la composición de un suelo en sus tres fases por separado, a saber: fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. Ahora eres capaz de identificar los tipos de suelo por su formación, lo cual podrás reflejar en la primera actividad de esta unidad, en la que distinguirás los suelos más importantes que existen en México, identificando, además, su proceso de formación.



1.1.2. Composición del suelo

El perfil de un suelo está compuesto por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa. Cada una de éstas ocupa un volumen variable (% del volumen total del suelo), y su importancia radica en que son el soporte para el crecimiento vegetal, ya que determinan la disponibilidad de agua y aire para las raíces. Estas tres fases interactúan a través de reacciones físicas y químicas; las más comunes son la solubilización y la adsorción. Cuando un suelo se contamina, estas reacciones se modifican a tal grado que imposibilitan el crecimiento de vegetales, e incluso pueden llegar a ser fuente de sustancias tóxicas. En este subtema estudiarás cada una de las fases y su relación entre sí. Observa la siguiente imagen, en la cual podrás identificar dichas fases:



Fases del suelo. Tomada de Edafología.ur.es, (2004).



Fase sólida

La fase sólida representa entre el 45% y el 50% del volumen total del suelo. Esta fase está constituida en un 90% a 99% por minerales (fracción mineral) y por un 10% a 1% de materia orgánica (fracción orgánica) (Brady y Weil, 2008). Los minerales y la materia orgánica se unen y forman los llamados agregados, quedando espacios entre ellos de diversos tamaños que constituyen la porosidad de un suelo. Estos poros, por lo general, no quedan vacíos, y su lugar es ocupado por gases o líquidos.

Fracción mineral. Es muy variable y se ha logrado clasificarla por su composición química, mostrada a continuación en la tabla:

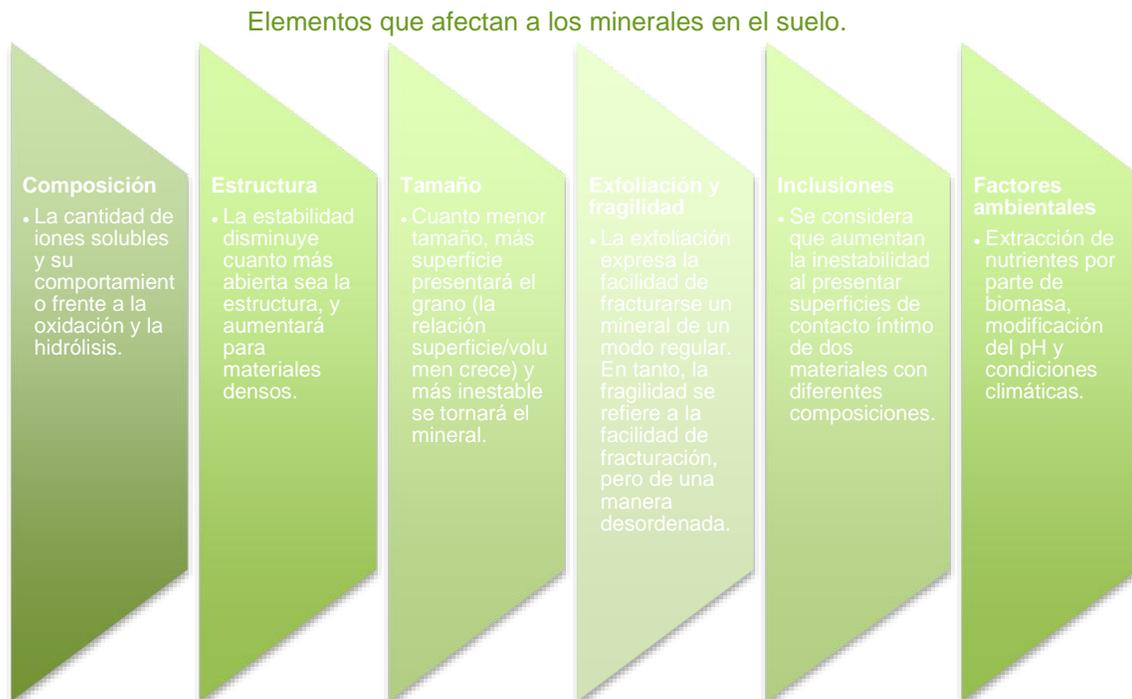
Clasificación de minerales por su composición química.

Tipo de minerales		solubilidad
silicatos	Tectosilicatos o feldespatos: ortoclasas, plagioclasas	baja
	Silicatos laminares: micas, arcillas	
	Inosilicatos: piroxenos, anfíboles	
	Sorosilicatos: epidoto	
	Nesosilicatos: olivino, circón	
óxidos	Sílice	baja
	Óxidos e hidróxidos de hierro	
	Óxidos e hidróxidos de aluminio	
carbonatos	de sodio	alta
	de calcio (calcita)	mediana
	de calcio y magnesio (dolomita)	
fosfatos	de calcio (apatita)	baja
	de hierro y aluminio (vivianita)	
cloruros	de sodio	alta
	de potasio	
	de calcio	
sulfuros	de hierro (pirita)	baja
	de calcio (yeso)	mediana
sulfatos	de sodio	alta
	de calcio	alta
nitratos	de sodio	

Basada en Molina, et al. (2013).



La existencia de los minerales en el suelo depende fundamentalmente de su estabilidad, lo cual se refiere a la resistencia a la modificación en su composición química o de su estructura cristalina (Brady y Weil, 2008). Por tanto, a mayor estabilidad, menor será la alteración. La estabilidad de un mineral es función principalmente de los elementos mostrados en el siguiente cuadro:



Basado en Dorronsoro, (2007).

Ahora bien, esta estabilidad del mineral condiciona el tipo de mineral presente en el suelo, y es variable en abundancia, según sea arcilla o arena, como se puede ver en las siguientes tablas:

Tabla. Mineralogía de las arenas.

Abundancia	Grupo mineral	Especie mineral
Poca	Nesosilicatos	Circón, granates, distena
Escasa	Ciclosilicatos	Turmalina
Poca	Inosilicatos	Piroxenos y anfíboles
Abundantes	Filosilicatos	Micas y cloritas
Muy abundantes	Tectosilicatos	Feldespatos
Muy abundantes	Óxidos	Cuarzo



Media	Óxidos e hidróxidos	Hematites, goethita
Muy variable*	Carbonatos, sulfatos	Calcita, yeso

* En determinadas ocasiones pueden ser muy abundantes, pero normalmente se encuentran ausentes.

Modificada de Dorrosoro, (2007).

Tabla. Mineralogía de las arcillas.

Abundancia	Grupo mineral	Especie mineral
Muy abundantes	Filosilicatos	Ilita, moscovita y caolinita
Abundantes	Filosilicatos	Biotita, clorita y montmorillonita
Media	Filosilicatos	Vermiculita
Poca	Filosilicatos	Sepiolita y paligorsquita
Poca	Silicatos amorfos	Alofanas
Media	Óxidos	Cuarzo
Poca	Tectosilicatos	Feldespatos
Poca*	Óxidos	Hematites y goethita
Poca*	Carbonatos	Calcita
Poca*	Sulfatos	Yeso
Poca*	Haluros	Halita

*En determinadas ocasiones pueden ser muy abundantes, pero normalmente se encuentran ausentes.

Modificada de Dorrosoro, (2007).

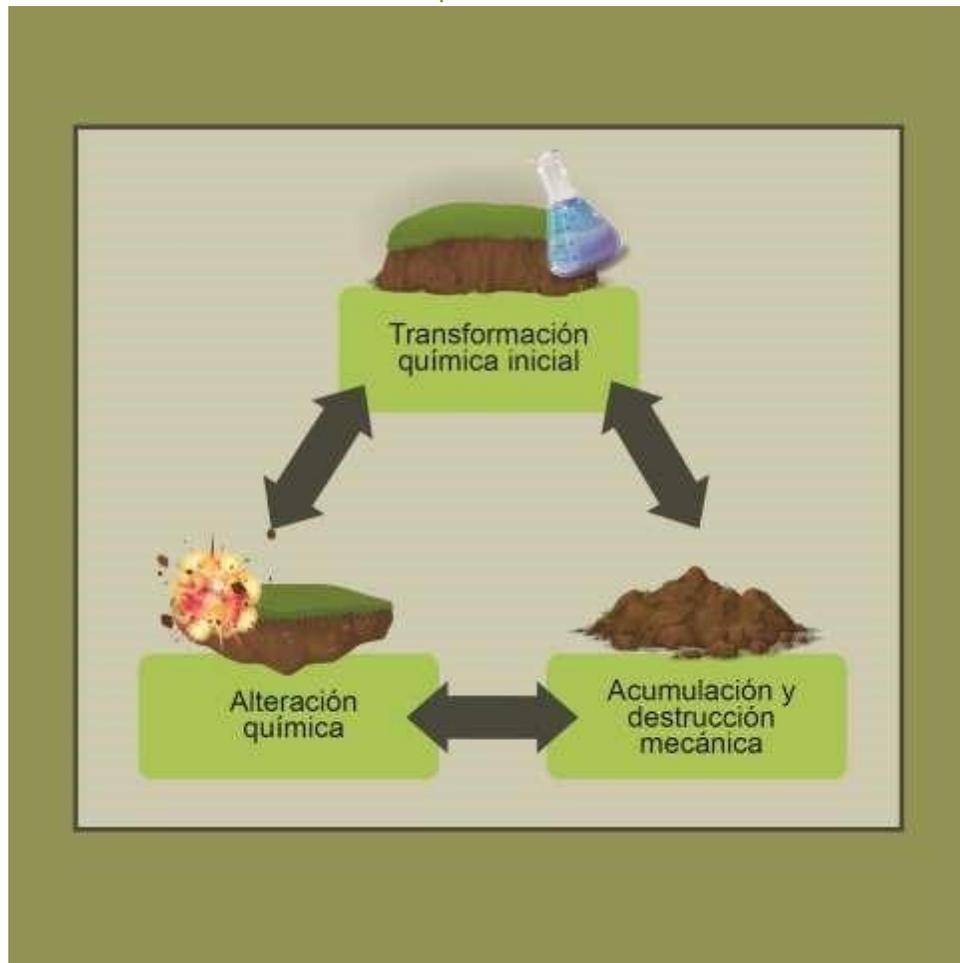
En cuanto a la contaminación ambiental, cobra mayor importancia la existencia de los minerales de la arcilla respecto a los de las arenas, pues la solubilidad y la adsorción de una sustancia agregada desde el exterior, como puede ser un contaminante, ocurre debido a la presencia de arcilla (Brady y Weil, 2008). Entonces, un compuesto mineral altamente soluble junto con otras partículas contaminantes tenderá a adsorberse con mayor dificultad. Lo que se requiere es un mineral al que se le dificulte disolverse para poder adsorberse con el agua y formar coloides, los cuales capturan las sustancias contaminantes (Bolt y Bruggenwert, 1978; Brady y Weil, 2008). Aquí es cuando la presencia de coloides como las arcillas y el humus que se muestran más adelante, son fundamentales para determinar la capacidad de retención de sustancias contaminantes de un suelo.

Fracción orgánica. Esta se distribuye en biomasa (flora y fauna) y materia orgánica (no viva) que se divide en materia en descomposición y el humus. Este último se clasifica en sustancias húmicas y no húmicas (Brady y Weil, 2008).



La biomasa transforma la materia orgánica en el suelo, por lo tanto, determina la concentración de oxígeno y de dióxido de carbono en la fase gaseosa (fase que revisarás más adelante), equilibra las reacciones de disolución, hidrólisis y óxidoreducción que afectan los minerales para liberar nutrientes. La materia en descomposición se encuentra en proceso de formar humus, sirve de nutriente para la biomasa, y regula la humedad y temperatura del suelo. El *humus* se define como materia orgánica transformada y alterada; constituye un conjunto de compuestos orgánicos coloidales de color oscuro sometidos a un constante proceso de transformación (Whitehead y Tinsley, 2006). Es decir, toda la materia orgánica entra al proceso de formación de humus (*humificación*) y llega a la transformación total de los compuestos orgánicos, dando lugar a productos inorgánicos sencillos como CO_2 , NH_3 , H_2O . La humificación es un proceso cíclico que involucra los siguientes fenómenos:

Fenómenos en el proceso de humificación.



Basado en Whitehead y Tinsley, (2006).



El humus se involucra en todas las reacciones químicas del suelo, en específico, en las sustancias húmicas que son polímeros de alto peso molecular (carboxilos, oxidrilos fenólicos). Se ha observado que el humus tiende a unirse por intercambio iónico con la fracción mineral, en particular con los cationes, arcillas y óxidos de hierro y aluminio.

La fracción orgánica de un suelo, principalmente el humus, tiene una gran importancia en la formación y fertilidad del suelo, ya que tiene una gran capacidad de retención de agua, evita la erosión y, sobre todo, protege al suelo de la contaminación por su capacidad de formación de coloides; es decir, el humus adsorbe plaguicidas y otros contaminantes y evita que éstos se infiltren hacia los acuíferos.

Fase líquida

El agua interviene directamente en la formación del suelo (meteorización física y química, y translocación de sustancias), lo que ya fue tratado en el subtema anterior. También facilita el transporte de sustancias, ya que puede circular a través del suelo gracias a la fuerza gravitacional, lo cual sucede cuando el potencial de succión es menor que el gravitacional; entonces, el agua se desplaza hacia abajo, por lo que puede transportar sustancias, ya sea material mineral, nutrientes o contaminantes (Brady y Weil, 2008).

Ahora bien, el agua retenida entre los horizontes del suelo fue debido a fuerzas llamadas *potencial de succión*, *potencial osmótico* y *potencial matricial*. El potencial osmótico ocurre por acción de las sales, y su fuerza es débil. El potencial matricial es debido a dos fuerzas: adsorción y capilaridad. La adsorción en suelos se origina como consecuencia de que las moléculas del agua actúan como dipolos y son atraídas por fuerzas electrostáticas sobre la superficie de las partículas de los constituyentes del suelo.

La adsorción es la principal fuerza de retención en un suelo, y es fundamental para que forme soluciones iónicas, siendo las más comunes, electrolitos del tipo: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4 , HCO_3^- , CO_3 y NO_3 (Brady y Weil, 2008). Estas soluciones tienden a unirse a la arcilla o a materia orgánica como humus, lo cual forma lo que se denomina **coloides**. Más adelante se explicará la importancia de la presencia de coloides en el suelo.



Fase gaseosa

Es el volumen ocupado por los gases presentes en el suelo. Tiene una composición similar a la atmósfera, con variaciones en el contenido de O_2 y CO_2 debido a su empleo para el metabolismo de la biomasa.

Los gases contenidos en el suelo son la base de la respiración de los organismos y responsables de las reacciones de oxidación. Se sitúa en los poros del suelo, en los cuales las fases líquida y gaseosa están en mutua competencia, variando sus contenidos a lo largo del año. Un suelo saturado de agua no contendrá fase gaseosa. En condiciones ideales la fase gaseosa representa un 25%, otro 25% para el agua, y un 50% para la fase sólida. Se admite que un porcentaje de aire del 10% es insuficiente. La composición del gas en los suelos es similar a la del aire atmosférico, pero mucho menos constante (Brady y Weil, 2008), composición que podrás observar en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla. Comparación de la composición del aire en suelo y en la atmósfera.

Gas	Aire atmosférico (%)	Aire en suelo (%)
Oxígeno	21	10-20
Nitrógeno	78	78,5-80
CO_2	0,03	0,2-3
Vapor de agua	Variable	en saturación

Basado en Brady y Weil, (2008).

La composición media del aire del suelo varía con la profundidad del aire y con los cambios estacionales. De esta manera, en los períodos de mayor actividad biológica que suelen ocurrir en primavera y otoño, hay menos O_2 y más CO_2 ; entonces, en el suelo hay menos O_2 y más CO_2 que en la atmósfera por el consumo de O_2 y el desprendimiento de CO_2 , en los procesos de respiración de las plantas, actividad de microorganismos, procesos de mineralización y procesos de oxidación. El aire del suelo está en continuo intercambio con el aire atmosférico, intercambio que se realiza por movimiento en masa o por difusión.

Has concluido con el primer tema, que es la clasificación de los suelos por sus factores, etapas de formación y los horizontes dados por características físicas, principalmente color, textura y estructura. Todo esto ayuda a distinguir a los suelos entre sí, por lo cual se han clasificado diferentes tipos de suelo. Finalmente, entendiste que un suelo, una vez formado, está compuesto por tres fases, la sólida, la líquida y la gaseosa, fases que



se relacionan entre sí y proporcionan diferentes propiedades en los suelos. En el siguiente tema, estudiarás dichas propiedades.

1.2. Propiedades del suelo

En el tema anterior se estudió el proceso de formación de los suelos y las fases que lo conforman. Ahora es importante entender que los suelos presentan ciertas características tanto físicas como fisicoquímicas, que pueden ser medibles, pero, sobre todo, explican el comportamiento de las diferentes sustancias contenidas en él, como pueden ser contaminantes. Basado en el texto de Dorronsoro (2007) y la publicación de la FAO (2006), a continuación, se explican, en primer lugar, las principales propiedades físicas: textura, estructura, porosidad, color y dinámica del agua en el suelo; en segundo lugar, se estudian las propiedades fisicoquímicas: presencia de coloides, el intercambio iónico, el pH y el potencial de óxido-reducción.

1.2.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de un suelo son aquellas que proporcionan información del comportamiento de un suelo debido a las partículas sólidas que lo conforman, los vacíos que se encuentran y la relación que guardan con el agua como vehículo que transporta sustancias como los contaminantes; las propiedades físicas son la textura, la estructura, la porosidad, el color y la dinámica del agua.

Textura del suelo. Se refiere a la cantidad en porcentaje del volumen total de grava, arena, arcilla y limo en un suelo, que están diferenciados por el tamaño de las partículas sólidas. En un suelo, por lo general, se encuentran diferentes tamaños de partículas, algunas en mayor cantidad que otras, y que también están distribuidas ya sea uniformemente o no, lo que en conjunto determina la textura de un suelo (Brown, 2003). Esta propiedad física condiciona la cantidad y flujo de agua en un suelo. De acuerdo al Sistema Universal de Clasificación del Suelo (USDA, 2013), las partículas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Tabla. Clasificación de partículas sólidas del suelo de acuerdo al tamaño.

Textura del suelo	Tamaño de partícula (mm)	Abreviación
limo	< 0.002	c
arcilla	0.002 a 0.05	si
arena fina	0.05 a 0.1	fs

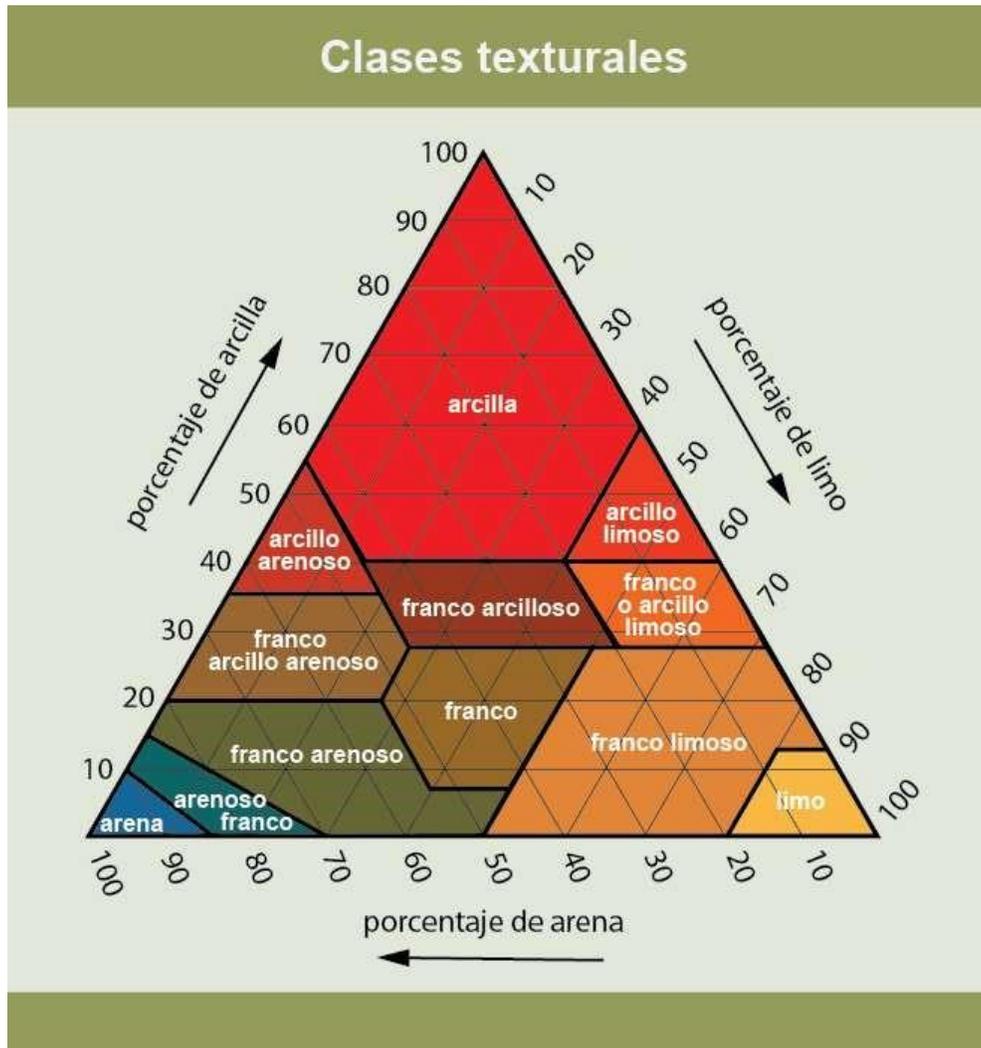


arena media	0.1 a 0.5	ms
arena gruesa	0.5 a 1.0	cos
arena muy gruesa	1.0 a 2.0	vcos
grava	2.0 a 762.0	g
guijarro	> 762.0	gb

Basado en USDA, (2008).

Para facilitar su estudio, la USDA ha creado un diagrama que, con base en el porcentaje de cada partícula, nombra al suelo:

Textura del suelo.





Tomado de la edafología. net, (2011).

En el esquema anterior podrás observar que en una textura fina como los suelos de limo, arcillo limoso, franco arcillo limoso, el agua es fuertemente retenida principalmente por la fuerza de adsorción, como fue visto en el subtema Fase líquida; entonces, esta agua retenida no permite que sea aprovechada por las plantas. En un suelo de textura media, por ejemplo, suelos franco arcilloso, limoso arenoso, arcillo arenoso, tienen la capacidad de filtración y retención media de agua, lo que favorece el desarrollo de plantas y la disponibilidad de nutrientes. En contraste, los suelos con textura gruesa como franco arenoso, arena, facilitan una rápida infiltración de agua, que es un factor para el transporte de sustancias como los contaminantes.

Otro factor que afecta tanto a la textura como la capacidad de filtración de agua es el grado de compactación del suelo inducida por el hombre; de esta manera, un suelo de textura media o gruesa puede pasar a textura fina e impedir la infiltración, flujo y aprovechamiento de agua, así como de sustancias disueltas en él; sin embargo, puede ser una barrera para el paso de contaminantes.

Estructura del suelo. La estructura del suelo se refiere a la forma en que están arregladas las partículas en él. Por lo general se estudian los grumos o agregados que se forman a partir de su grado (diferenciación entre grumos cohesivos y adhesivos) y forma de los agregados (esférico, prismático, plano) (USDA, 1999). De esta manera, los suelos se pueden clasificar por el grado, forma y tamaño de la estructura, como a continuación se muestra en las tablas:

Tabla. Clasificación de suelos por el grado de su estructura.

Grado	Abreviación	Descripción
sin estructura	0	no se observa agregación de materiales
débil	1	agregados pobremente formados
moderado	2	agregados bien formados
fuerte	3	terrones consolidados

Basado en Henry y Forth, (1984).

Tabla. Clasificación de suelos por la forma de su estructura.

Forma	Abreviación	Descripción
granular	gr	relativamente no poroso, no se une a otros agregados
migagoso	cr	relativamente poroso, no se une a otros agregados

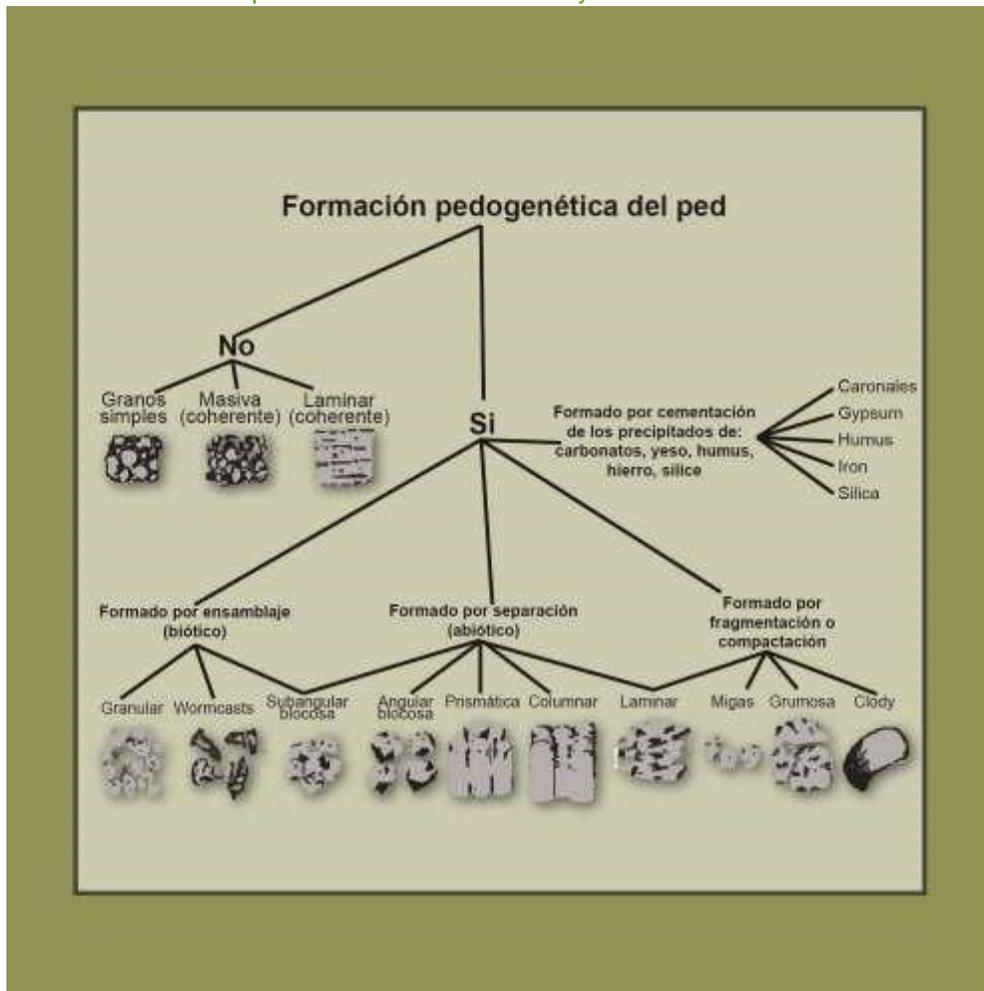


laminar	pl	agregados en forma laminar, son permeables
bloque	bk	agregados en forma de bloque que se unen y rompen
bloque angular	abk	agregados en forma de bloque angular que se unen
prismático	pr	forman columnas y pirámides
columnar	cpr	forman columnas que se superponen
granuloso	sg	partículas que no tienden a adherirse a otras
masivo	m	se observa un conjunto único

Basado en Henry y Forth, (1984).

En la siguiente imagen podrás observar los tipos de estructura del suelo y su formación.

Tipos de estructura del suelo y su formación.

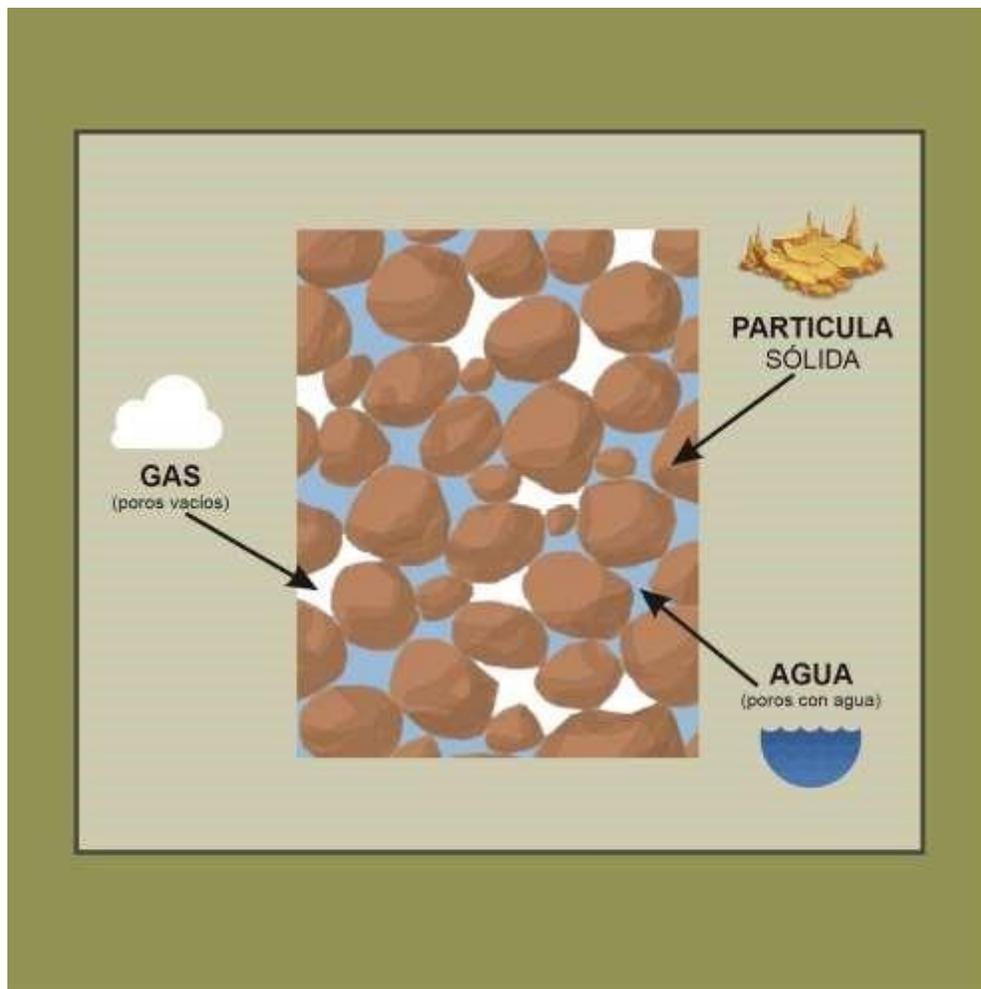


FAO, (2009).



Porosidad. Retomando lo anterior, un suelo está conformado por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa, presenta una estructura y textura de acuerdo a la cantidad y forma de las partículas sólidas, y entre ellas se encuentran espacios que pueden ser ocupados ya sea por líquidos (agua y sustancias diluidas en ésta) o por gases (observa la siguiente figura), de tal forma que al porcentaje total de espacios o poros que existe en un suelo se le llama *porosidad*, que es otra propiedad física del suelo y cuya importancia radica en que, entre mayor porosidad, mayor actividad biológica puede presentar un suelo (Donahue, et al., 1977; Kellog, 1957).

Porosidad del suelo.



Tomada de Madrimasd.org, (2007).

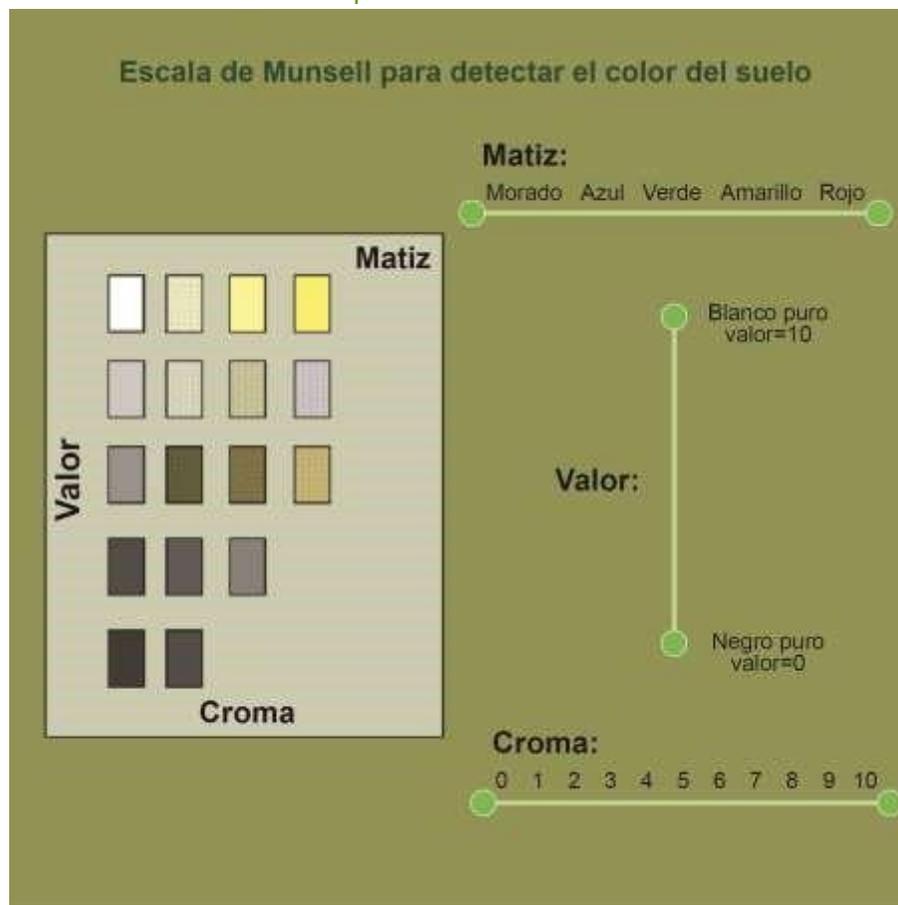
Así que la capacidad de retención del agua también es una función del tamaño y cantidad de poros en el suelo, que es importante para el desarrollo de los vegetales o



para permitir el flujo de agua y, por tanto, de sustancias como pueden ser contaminantes.

Color del suelo. Esta característica es el reflejo principalmente de las reacciones que ocurrieron entre la materia orgánica y los minerales. El color del suelo está determinado por tres características: tono, valor y croma, que se comparan con un patrón (USDA, 2008); el más empleado es la escala de Munsell, la cual se presenta en la figura siguiente:

Escala de Munsell para determinar el color del suelo.



Tomada de: Domínguez S. et al (2012).

El tono se refiere al color dominante; el valor indica la luminosidad o brillo del tono; el croma se refiere a la pureza del tono. A continuación, se presenta una tabla de colores de suelo:



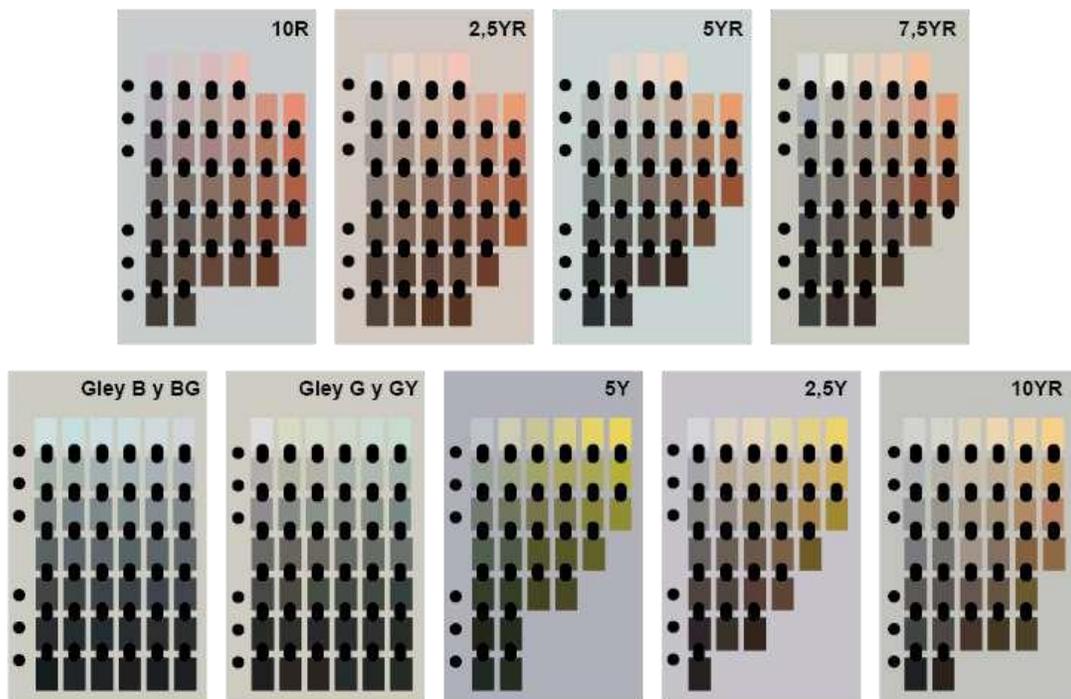
Tabla. Color de suelos.

Color del suelo	Características	Condiciones ambientales
Café a negro	Acumulación de materia orgánica, humus	Baja temperatura, precipitación elevada
Negro	Acumulación de manganeso, presencia de basalto	
Amarillo luminoso	Horizonte eluvial	Alta presencia de arcillas
Amarillo a rojo	Hierro oxidado	Suelos bien aireados
Gris a verde azulado	Hierro reducido	Suelos con poco drenaje
Blanco a gris	Acumulación de sales	

Basado en Fanning y Balluff, (1989).

A continuación, revisarás el color de los suelos según la tabla anterior.

Color de los suelos.





Dinámica del agua. Como fue estudiado en los subtemas anteriores, el agua en el suelo puede circular o ser retenida, lo cual depende de la textura, estructura y porosidad, y también por fuerzas que actúan en ella. Estas fuerzas pueden ser de retención: succión, osmótico y matricial (adsorción y capilaridad); o bien, desplazamiento, que es la gravitacional. El que el agua circule o no a través del suelo, condiciona algunos fenómenos (FAO, 2012). Entre los más importantes se pueden destacar:

Fenómenos del agua en el suelo.

Costra superficial	Permeabilidad	Densidad aparente	Perfil hídrico	Balance hídrico
<ul style="list-style-type: none"> •Capa seca en los horizontes superiores que protege de la evaporación 	<ul style="list-style-type: none"> •Representa la facilidad de circulación del agua en el suelo 	<ul style="list-style-type: none"> •Es de partículas sólidas y toma en cuenta el volumen de poros 	<ul style="list-style-type: none"> •Es el gradiente de humedad en los horizontes 	<ul style="list-style-type: none"> •Valoración del agua en el suelo a través del año

Basado en FAO, (2013).

Se han repasado las principales propiedades físicas que presentan los suelos, las cuales ayudan a caracterizarlos y a entender en forma clara las propiedades fisicoquímicas que a continuación se muestran. Esto te ayudará en tu experiencia profesional a elegir, posteriormente, la técnica de remediación más apropiada para la disminución de la contaminación en este medio.

1.2.2. Propiedades fisicoquímicas y biológicas

Las propiedades fisicoquímicas de un suelo explican el comportamiento y la relación entre las fases sólida y líquida, es decir, las reacciones que ocurren entre los minerales, la materia orgánica (humus) y el agua. Esto sucede a nivel molecular, siendo las principales las reacciones de solubilización para formar coloides y, posteriormente, la adsorción al interactuar estos últimos con otras sustancias como pueden ser contaminantes. En este subtema estudiarás la formación de coloides en el suelo, el intercambio iónico, el pH y el potencial de óxido-reducción.

Coloides en el suelo. Como ya se mencionó en el subtema Composición del suelo, la relevancia de la mezcla entre la fase sólida y la líquida que desplaza a la gaseosa radica, para el curso de Ingeniería ambiental de suelos, en la capacidad de un suelo de retener o transportar sustancias, en particular, contaminantes. Esta acción está condicionada



por la presencia de coloides. En el suelo existen coloides llamados suspensiones, que están formados por partículas sólidas (fase dispersa) que son relativamente más grandes que las sustancias líquidas (fase dispersante), en donde se unen. Existen dos tipos de suspensiones, las estables (las partículas sólidas y las sustancias líquidas están en equilibrio y separadas), y las floculadas (cuando las partículas sólidas y las sustancias líquidas están unidas); además, tienen una carga eléctrica negativa, lo que las hace capaces de unirse con otras sustancias por medio de cargas positivas o viceversa (unión de cationes) (Bolt y Bruggenwert, 1978). Por lo general los coloides en el suelo están formados por minerales de arcilla e hidróxidos de hierro y aluminio (coloides inorgánicos), y las sustancias húmicas (coloides orgánicos), puesto que presentan una gran superficie específica.

Como ya se mencionó, y los has visto en la materia de Química ambiental, los coloides tienen una carga eléctrica que se modifica por el pH y por la concentración de hidrógeno, así como también forman una llamada *doble capa eléctrica difusa*. El que ésta sea positiva o negativa condiciona la unión del coloide con otros iones, ya sea de minerales del mismo suelo o de sustancias exógenas, es decir, contaminantes. Lo anterior se denomina intercambio iónico, y constituye el principal fenómeno entre sustancias que ocurre en el suelo.

Intercambio iónico. Son los procesos por los cuales las partículas sólidas del suelo adsorben iones (cationes o aniones) de la fase líquida, liberando al mismo tiempo, otros iones en cantidades equivalentes, estableciendo un equilibrio entre ambas fases. Este es un proceso dinámico que se desarrolla en la superficie de las partículas del suelo, que se origina por el desequilibrio eléctrico de las partículas, lo que induce la neutralización al adsorber iones que se pegan a la superficie de estas partículas, las cuales quedan débilmente retenidas y se pueden intercambiar con la solución del suelo. Entonces, cuanta más superficie tenga el material y más desequilibrada se encuentre, más iones se fijarán.

En el suelo son varios los materiales que pueden cambiar cationes. Esto lo puedes observar en la siguiente tabla. Los principales cambiadores son las arcillas y la materia orgánica (los dos materiales presentan propiedades coloidales). Las causas de la capacidad de cambio de cationes de las arcillas son: sustituciones atómicas dentro de la red, existencia de bordes, disociación de los OH de las capas basales, enlaces de Van der Waals. Las causas de la capacidad de cambio de materia orgánica son: disociación de los OH y de los COOH.



Tabla. Capacidad de cambio catiónico (CCC) de algunos materiales.

Naturaleza de la partícula	CCC, meq/100g
cuarzo y feldspatos	1-2
óxidos e hidróx. Fe y Al	4
caolinita	3-15
ilita y clorita	10-40
montmorillonita	80-150
vermiculita	100-160
materia orgánica	300-500

Basado en Molina et al., (2013).

En cuanto a los factores que hacen que un suelo tenga una determinada capacidad de cambio de cationes, éstos son el tamaño de las partículas (cuanto más pequeña sea la partícula, más grande será la capacidad de cambio), la naturaleza de las partículas (la composición y estructura de las partículas influirá en las posibilidades de cambio de sus cationes), el pH (en un nivel bajo los hidrogeniones están fuertemente retenidos en las superficies de las partículas; con pH altos los H de los grupos carboxílicos primero, y de los OH después, se disocian y los H⁺ pueden ser intercambiados por cationes). Los cationes que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺, H⁺, Al⁺⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, Fe⁺⁺, NH₄⁺, Mn⁺⁺, Cu⁺⁺ y Zn⁺⁺. En los suelos ácidos predominan H⁺ y Al⁺⁺⁺, en los suelos alcalinos predominan las bases, fundamentalmente el Na⁺, y en los neutros, el Ca⁺⁺ (Molina, et al., 2013).

La importancia de la capacidad de cambio radica en el control de la disponibilidad de nutrientes para las plantas: K⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, entre otros; interviene en los procesos de floculación y dispersión de arcilla, por consiguiente, en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados; y determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo. Esto es, cuando al suelo se vierten aguas residuales que contienen una gran cantidad de sustancias tóxicas, en primera instancia, el suelo trabaja como un filtro que retiene los contaminantes, ya que se presenta un intercambio iónico, lo que impide su transmisión a los vegetales y su paso a nivel subterráneo; sin embargo, puede alcanzar un nivel en donde sobrepasa la capacidad de retención del suelo (capacidad de intercambio catiónico) y comienza la contaminación. Esto último sucede con mayor rapidez cuando se vierten cationes metálicos (metales pesados) y exceso de nutrientes y sustancias para la actividad agropecuaria (fitosanitarios), lo cual se tratará a detalle en el tema 1.3 Contaminación del suelo.



Con lo visto anteriormente, resalta el término de capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo, el cual es un indicador de la capacidad de retención de sustancias, que, en lo que atañe a este curso, son sustancias contaminantes. La CIC es el resultado del producto entre la superficie específica (S en m^2/g) y la densidad de carga (ρ en m_{eq}/m^2) de un determinado mineral. Así que, para diferentes tipos de arcilla y para el humus, se tienen los valores a continuación mostrados en la tabla:

Tabla. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) para materiales coloidales en suelo.

Material	CIC (cmol/kg)
óxidos coloidales	1 a 5
caolinita	10
ilita	20 a 40
montmorillonita	80 a 120
humus	200 a 400

Basado en Molina et al. (2013).

La CIC se modifica en un suelo por la estructura misma, ya que el suelo está formado por diversos minerales y materia orgánica; además, puede alterarse por cambios en el pH y cantidad de nitrógeno que, a su vez, se modifican por la influencia del clima, biomasa, y sobre todo, por la actividad humana; esta última por labores agropecuarias, mineras y vertidos de sustancias directamente al suelo.



Si requieres mayor información sobre el intercambio iónico en suelos, consulta el sitio llamado *Spectrum Analytic*, el cual podrás encontrar en la sección *Para saber más*.



Otro artículo, llamado “*Cation Exchange Capacity (CEC)*”, que puedes consultar sobre el mismo tema, es publicado por *Coronel University Cooperative Extension*; lo puedes consultar en la sección *Para saber más*.

pH. Esta propiedad mide la concentración en hidrogeniones y condiciona el grado de acidez o de basicidad de un suelo. Por lo general se dice que el suelo muestra una fuerte resistencia a cualquier modificación de pH, y a esto se le llama poder de taponamiento (Bolt y Bruggenwert, 1978; Brady y Weil, 1999). Sin embargo, existen factores que pueden modificar este valor; entre los principales se encuentran:

Factores que modifican el pH en un suelo.

Material original

- Según la naturaleza de la roca madre puede originar reacciones ácidas o básicas.

Factor biótico

- Los residuos de la actividad orgánica y el proceso de humificación son de naturaleza ácida.

Lluvia

- Tienden a acidificar al suelo al intercambiar los H⁺ del agua de lluvia por los Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺.

Complejo adsorbente

- El suelo se torna más o menos ácido en función del tipo de iones adsorbidos, ya sean cationes o aniones.

Basado en Brady y Weil, (1999).



La importancia del pH en los suelos radica principalmente en que influye en el resto de las propiedades físicas y fisicoquímicas. Por ejemplo, con pH muy ácidos (< 5.5) hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. Para pH alcalino (> 7.3), la arcilla se dispersa, se destruye la estructura, y se reduce la asimilación de nutrientes del suelo, porque se espera que las mejores condiciones del desarrollo de plantas ocurran con pH entre 6.0 y 7.5 (Brady y Weil, 1999).

Potencial de oxidación – reducción. Esta propiedad es de gran importancia porque interviene directamente en las etapas de formación del suelo, fundamentalmente en la alteración química. De esta manera, la composición de un suelo está regulada principalmente por esta propiedad, como se puede ver en la transformación de la materia orgánica que tiende a oxidarse por la presencia de oxígeno; en contraparte, con la presencia de agua, al saturarse el suelo, éste tiende a reducirse (Bolt y Bruggenwert, 1978).

Los procesos de oxidación-reducción involucran a diferentes elementos que pueden actuar con diferentes valencias, y entre ellos se encuentran: Fe, Mn, S, N. Algunos ejemplos de procesos de oxidación en el suelo son (Bolt y Bruggenwert, 1978):

- **Oxidación:** Del hierro, formando óxidos e hidróxidos; del manganeso; la oxidación de azufre para formar sulfatos; la nitrificación o sea la transformación de NH_4 en nitritos y nitratos.
- **Reducción:** La desnitrificación, la desulfuración, la formación de compuestos Fe^{+2} y Mn^{+2} .

Otras de las propiedades del suelo son las biológicas, conferidas por los tipos de microorganismos encontrados en el ecosistema edafológico. Entre ellas se pueden encontrar: bacterias, hongos y protozoarios. Su principal función es la aportación de nutrientes al metabolizar los componentes que existen en el suelo. Dentro de los procesos que aporta la presencia de microorganismos figuran la mineralización y la humificación. El primer proceso, mineralización, al tener interacción con los microorganismos, aporta componentes inorgánicos tales como iones amonio (NH_4^+), CO_2 , Ca, Mg, K, etc. El segundo proceso, humificación, descompone la materia orgánica y puede originar los mismos elementos inorgánicos.

Estas propiedades biológicas del suelo se encuentran ligadas con otro tipo de condiciones óptimas de humedad, temperatura, aireación, pH, y presencia de materia orgánica; si alguna de ellas se encuentra en un estado inestable, estas propiedades podrían no existir en el suelo, impactando en los ecosistemas.



Otra propiedad biológica en el suelo es la mesofauna (nematodos, acaros, moluscos), la cual brinda al suelo propiedades físicas como es la porosidad, grado de compactación, filtración, humedad y características químicas como el pH, presencia de nutrientes, entre otros. Estas propiedades participan en los ciclos biogeoquímicos porque reintegran nitrógeno, carbono, fósforo y azufre en estos ciclos.

Para revisar la importancia biológica de los suelos y el impacto que puede tener en un cultivo de caña de azúcar, **consulta** el siguiente caso llamado *Las propiedades biológicas del suelo e influencia de enfermedades para definir la zona de aplicación del laboreo localizado en los suelos arcillosos pesados*, el cual se encuentra en el aula. En éste podrás observar qué microorganismos y factores externos como el sol se tomaron en cuenta para la disminución de enfermedades; asimismo, podrás revisar los materiales y métodos utilizados en el caso, así como sus etapas, los resultados obtenidos y la discusión acerca de dicho estudio, además de las conclusiones generadas.

Para cerrar, en este tema comprendiste que las principales propiedades físicas, fisicoquímicas y biológicas de los suelos están determinadas desde el origen del suelo y pueden ser modificadas por diversos factores; además, ayudan a comprender el comportamiento de un suelo como proveedor de sustento y nutrientes para el desarrollo de las plantas y como filtro natural que retiene contaminantes. Con todo lo aprendido, a continuación, se presenta la segunda actividad de esta unidad para que la desarrolles.

1.3. Contaminación del suelo

¿Qué es un contaminante en el suelo y cómo se transporta?, ¿cuáles son los tipos de contaminantes comunes en este medio?, ¿qué efectos puede llegar a tener la contaminación por fitosanitarios y metales pesados?, son algunas de las preguntas que puedes revisar durante el desarrollo de esta temática. El objetivo de este tema es reconocer los factores que intervienen en el transporte de contaminantes y cómo son variables de acuerdo al tipo de contaminante.

También se puede decir que la contaminación del suelo se debe a la presencia de sustancias ajenas a este medio. El transporte de contaminantes involucra un proceso desde que una sustancia ajena al suelo, es decir, un contaminante, es introducida a la matriz del suelo, la cual puede ser filtrada, descompuesta, neutralizada, inactivada, o almacenada. Para entender esto, en primer lugar, se estudiarán los agentes contaminantes que son fuente de estas sustancias y, en segundo lugar, se analizarán los diferentes contaminantes fitosanitarios y contaminantes por metales pesados.



En el siguiente caso de contaminación de suelos podrás observar las pérdidas en la productividad agrícola. **Consulta** el documento *Conservation agriculture Case studies in Latin America and Africa*, que se encuentra en la sección *Para saber más*.

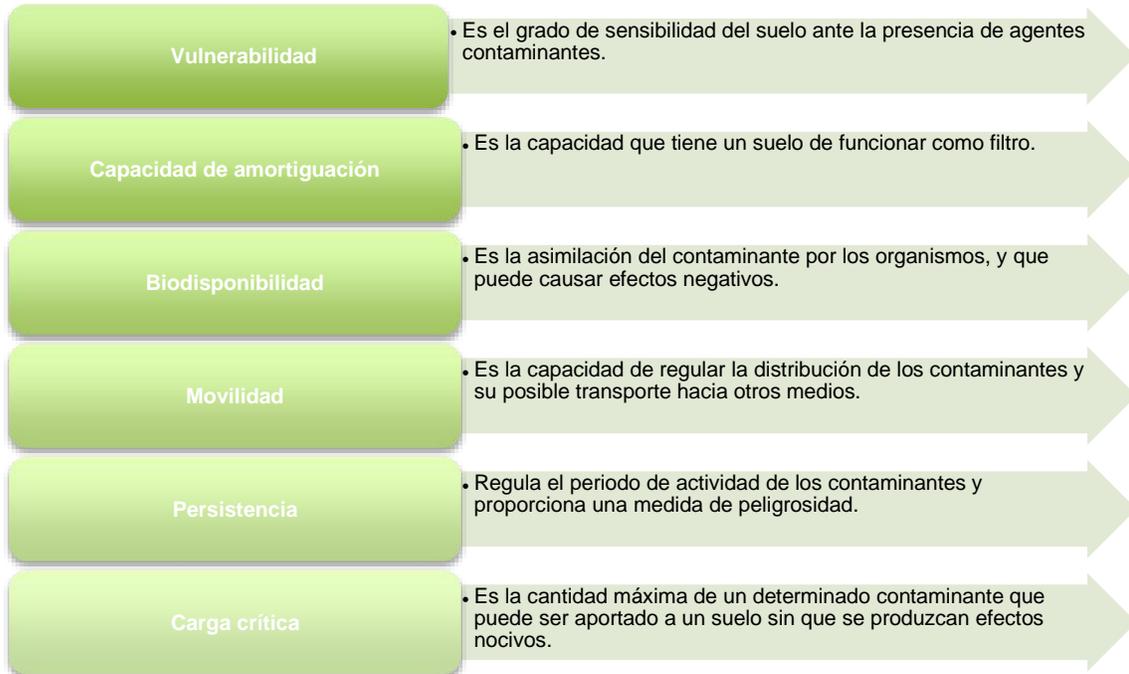
1.3.1. Agentes contaminantes

Un suelo se altera al grado de degradarse cuando sustancias contaminantes se acumulan en él. Existen dos tipos de contaminación: la natural y la generada por las actividades del hombre. Ejemplos de contaminación natural son el proceso de concentración y toxicidad que presentan algunos elementos metálicos conforme el suelo evoluciona, la alta concentración de ácidos orgánicos, y erupciones volcánicas que introducen al suelo metales pesados (EPA, 2004).

Sin embargo, la actividad del hombre es la que, por lo general, afecta de manera más agresiva a los suelos. Es por ello que en este primer tema se revisará la actividad y las sustancias que genera, para en seguida conocer la concentración de estas sustancias a partir de la cual se considera contaminante; y por último, se analizará la respuesta del suelo. Para lo anterior, se consideran algunos factores que van a aportar límites permisibles y medidas de mitigación, como técnicas de remediación de suelos, factores descritos a continuación (Dorronsoro, 2007; EPA, 2004):



Factores que intervienen en la contaminación de un suelo.



Tomado de EPA, (2004).

Se ha registrado que desde las primeras actividades del hombre antiguo se generan contaminantes a los suelos, por ejemplo, el dominio del fuego y las sustancias que genera, las labores agrícolas y ganaderas, el descubrimiento del manejo de metales. Con el surgimiento de las primeras ciudades, pero, sobre todo, con la Revolución Industrial, estas actividades se concentraron en tiempo y espacio, incrementando de manera exponencial la contaminación de suelos. Los agentes contaminantes más comunes, sus fuentes y algunas características, son presentados en la siguiente tabla:

Tabla. Principales agentes y fuentes contaminantes para el suelo.

Agente contaminante	Fuente contaminante
Fitosanitarios	residuos domésticos, industriales y agrícolas
Metales pesados	minería, fundición y refinamiento hidrocarburos
Agua salina	riego agrícola
Emisiones atmosféricas	actividad industrial, quema de combustibles
Hidrocarburos	actividades de gas y petróleo

Basado en Dorronsoro, (2007).



En este tema se estudiarán con mayor detalle a los metales pesados y los fitosanitarios. En cuanto a los otros factores, las emisiones atmosféricas generan lluvia ácida que modifica el pH del suelo; por lo general lo acidifica, lo que provoca liberación de algunas sustancias tóxicas de las estructuras cristalinas. En el caso del empleo de agua salina para riego, esto produce la acumulación de sales como sodio, potasio y magnesio, que tiene una acción dispersante sobre las arcillas, y de solubilización de la materia orgánica, por lo que provoca agregados menos estables, sellado del suelo y disminución de la conductividad hidráulica.

Los estudios realizados en un gran número de casos en todo el mundo indican que existen diversos procesos químicos en los suelos, procesos responsables de la degradación y transporte de contaminantes (EPA, 2004; Dorronsoro, 2007; Bolt y Bruggenwert, 1999; Krauskopf y Bird, 1995; Henry y Forth, 1984; McLean y Bledsoe, 1992); entre los principales se pueden encontrar:

Procesos de precipitación-disolución. Ocurre cuando un sólido disuelto en una solución ya no puede ser aceptado. Se vuelve insoluble para cristalizarse y, por último, se precipita. En el suelo esto ocurre en gran medida con los metales pesados. En general, el proceso de precipitación de un metal pesado depende, en primer lugar, de las condiciones de oxidación-reducción; así, para condiciones oxidantes, es un compuesto soluble, y en condiciones reductoras, es insoluble. En segundo lugar, depende del pH, ya que se forman compuestos solubles a pH ácidos, y compuestos insolubles con pH alcalino. Y, en tercer lugar, está sujeta a la velocidad de formación de minerales; esto es, una vez que se unen metales con otros minerales, la rapidez de formación de cristales minerales condiciona la rapidez de precipitación. Ejemplo:

- La precipitación del cadmio soluble en forma de CdCO_3 debido a la presencia de carbonatos

Procesos de sorción-desorción. Cuando una fase líquida llamada *adsorbato*, que suele ser agua, interactúa con una fase sólida llamada *adsorbente*, que es un mineral y un contaminante, ocurren en tres etapas: adsorción, precipitación superficial y absorción. El desarrollo de este proceso depende principalmente de la mineralogía del suelo, en particular del área superficial, como se puede ver en la tabla:

Tabla. Área superficial de algunos minerales.

Mineral	Área superficial (m^2/g)
caolinita	7-30



ilita	65-100
montmorillonita	700-800
óxidos de manganeso	30-300
goethita	40-80

Basado en McLean y Bledsoe, (1992).

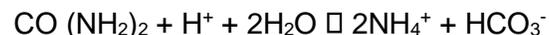
Entonces, entre menor tamaño de grano, igual a mayor superficie, y por tanto, mayor capacidad de adsorberse con un contaminante. Ejemplo de este proceso:

- La adsorción de plomo por parte de la goethita: $\text{Fe-OH} + \text{Pb}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe-OPb}^+ + \text{H}^+$

Procesos de complejación. Se refiere cuando se forman complejos, sobre todo de metales pesados, que incrementan tanto la solubilidad como la movilidad de éstos en los suelos. Para la formación de complejos se requiere una molécula llamada *ligando*. Estos pueden ser inorgánicos y orgánicos; por ejemplo:

- Complejo orgánico de metilados con mercurio: metilmercurio, dimetilmercurio
- Complejo inorgánico de cloruro con cadmio: CdCl_2 , CdCl_3 , CdCl_4

Proceso de volatilización. Es cuando una sustancia se libera a la atmósfera, en este caso, a partir del suelo, lo que generalmente ocurre, por ejemplo, con el nitrógeno sobrante por uso excesivo de fertilizantes. La reacción comienza cuando factores ambientales como temperatura, pH, humedad y actividad microbiana que genera urea, activan la hidrólisis que reduce el nitrógeno en forma de amoníaco (NH_4) y lo libera a la atmósfera.



Esta reacción se induce artificialmente al agregar a los suelos urea, práctica común en suelos agrícolas.

Bioasimilación. Se refiere a la acción llevada a cabo por los organismos presentes en el suelo que aprovechan algunas sustancias; está muy relacionado con otros procesos químicos como la oxidación, ya que de esta manera puede estar disponible como nutriente y ser asimilado por las raíces de las plantas. Tal es el caso del nitrógeno al ser introducido al suelo en forma de fertilizante (nitrato).





Estos procesos de acumulación, degradación y transporte de contaminantes en los suelos dependen del tipo de sustancia. En este curso se estudiarán los correspondientes a fitosanitarios y metales pesados, los cuales se verán en los subtemas 1.3.2 y 1.3.3, respectivamente. A continuación, se presenta la tercera actividad, en la cual se abre un foro de discusión para comentar sobre la elección de un suelo que será la primera parte de un proyecto que elaborarás durante el curso.

1.3.2. Contaminación por fitosanitarios

Los fitosanitarios más comunes son plaguicidas y fertilizantes, los cuales se emplean en forma extensiva para mejorar la productividad de los cultivos. Los fertilizantes se utilizan para proporcionar nutrientes a las plantas que ya fueron agotados del suelo, en tanto que los plaguicidas, para eliminar plagas y organismos que dañan los cultivos (López, 1993). Estas sustancias se clasifican de acuerdo a diversos criterios; a continuación, se presentan los principales (OMS y OPS, 1993).

Plaguicidas. Los plaguicidas son sustancias que se emplean para eliminar organismos que afectan cultivos, y se pueden clasificar por diferentes consideraciones (SAGARPA, 2012):

Clasificación de plaguicidas.

TOXICIDAD	NATURALEZA QUÍMICA	ACTIVIDAD BIOLÓGICA
<ul style="list-style-type: none"> •Supertóxicos. DL₅₀ < 5mg/Kg •Extremadamente tóxicos. DL₅₀ 5-50mg/kg •Muy tóxicos. DL₅₀ 50-500 mg/kg •Moderadamente tóxicos. DL₅₀ 500 - 5000mg/kg •Ligeramente tóxicos. DL₅₀ 5 - 15gr/Kg •Prácticamente no tóxicos. DL₅₀ > 15 gr/Kg. 	<ul style="list-style-type: none"> •Organoclorados •Organofosforados •Carbamatos •Derivados de la urea •Compuestos heterocíclicos •Compuestos inorgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> •Insecticidas •Acaricidas •Nematicidas •Fungicidas •Antibióticos •Herbicidas •Rodenticidas •Avicidas •Molusquicidas

Basado en SAGARPA (2012).



En donde la DL_{50} se refiere a la dosis letal media, que corresponde a la cantidad de plaguicida capaz de causar la muerte al 50% de los individuos que constituyen un lote de ensayo.

De acuerdo a las propiedades químicas tanto del plaguicida como del suelo en donde se encuentran, se presentan diferentes procesos químicos que los acumulan, degradan o transportan (López, 1993); entre los más comunes se encuentran:

Procesos de acumulación: Adsorción

La molécula de un plaguicida es retenida en el suelo debido a que forma una solución acuosa que es adsorbida por la fracción sólida del suelo, por lo general por coloides orgánicos y arcillas. La adsorción de un plaguicida con un suelo ocurre debido a (Dorronsoro, 2007):

Factores que condiciona la adsorción de un plaguicida en el suelo.

Cambio iónico

- Cuando las moléculas de los plaguicidas tienen comportamiento catiónico pueden intercambiarse con los cationes inorgánicos que saturaban inicialmente arcilla o materia orgánica.

Enlace por puentes de hidrógeno o puentes de agua

- Ocurre cuando moléculas no iónicas polares de plaguicidas se adsorben a los minerales arcillosos y a la materia orgánica.

Cambio de ligando

- El plaguicida actúa de agente quelatante fuerte, desplazando los ligandos que estaban previamente en los complejos entre iones metálicos y el suelo.

Enlace por transferencia de carga

- Algunos plaguicidas son donadores de electrones, y sucede cuando existe un receptor de ellos como las quinonas presentes en la materia orgánica.

Fuerzas de Van der Waals



- Es cuando los plaguicidas actúan como compuestos orgánicos neutros de moléculas grandes y se ligan con partículas minerales pequeñas.

Interacciones hidrofóbicas

- Existe cuando se presentan plaguicidas no polares y disolventes orgánicos.

Basado en Dorronsoro, (2007).

Procesos fisicoquímicos de degradación

Los principales procesos de degradación son fenómenos fisicoquímicos que facilitan la eliminación de plaguicidas en los suelos. Los principales se explican brevemente a continuación:

Principales procesos fisicoquímicos de degradación en un plaguicida.



Hidrólisis

- Este proceso está determinado por la reacción de un plaguicida con el agua con rotura de enlaces y es función del pH.

Deshalogenación

- Es común para plaguicidas organoclorados, y es una de las etapas de degradación del DDT.

Desalquilación

- Consiste en la eliminación de grupos alquilo. Este es un proceso que se da con frecuencia en derivados de la urea, en plaguicidas triazínicos y en derivados amídicos.

Hidroxilación

- Corresponde al ataque del grupo OH-, principalmente a grupos aromáticos. Es un proceso frecuente en plaguicidas organoclorados.

Condensación

- Este proceso tiene lugar entre compuestos diferentes y, en particular, entre un compuesto amínico y otro ácido.

Oxidación

- Ocurre en los organofosforados al pasar el enlace P=S a P=O. También se pueden formar epóxidos a partir de compuestos con doble enlace.

Reducción

- Los procesos de reducción se concentran en la conversión del grupo nitro.

Fotodescomposición

- Afecta especialmente a los grupos -OH, -SH, C=O, -Cl, -N=, así como a dobles enlaces, sobre todo si están conjugados.

Basado en Dorrnsoro, (2007).



Procesos microbiológicos de degradación

De igual forma, pueden ocurrir fenómenos microbiológicos que eliminen contaminantes debido a la presencia de organismos en el suelo. Los tipos más relevantes son:

Principales procesos microbiológicos de degradación en un plaguicida.

Reacciones oxidativas

- Oxidación de sustancias xenobióticas que pasan de liposolubles a hidrosolubles.

Reacciones de reducción

- Reducción de grupos cetónicos y nitros a hidroxilos y aminas, respectivamente.

Reacciones de hidrólisis

- Hidrólisis de ésteres aromáticos o alifáticos y amidas.

- Ruptura de dos grupos hidroxilo para pasar a oxidasas.

Basado en Dorronsoro, (2007).

Ahora bien, un parámetro muy importante que se debe considerar es la persistencia, que se define como el tiempo que permanece el plaguicida en el suelo, manteniendo su actividad biológica. Las consecuencias de la persistencia pueden ser muy importantes, dependiendo de la toxicidad del plaguicida y de su disponibilidad (López, 1993). En la tabla siguiente puedes observar la persistencia de distintos grupos de plaguicidas en suelos:

Tabla. Persistencia de varios tipos de plaguicidas.

Clase	Acción	Persistencia	Proceso de degradación
Organoclorados	Insecticidas	2-5 años	Deshidrohalogenación o exoxidación
Ureas	Herbicidas	4-10 años	Desalquilación
Ácidos benzoicos	Herbicidas	3-12 meses	Deshalogenación o descarboxilación



Amidas	Herbicidas	2-10 meses	Desalquilación
Carbamatos	Herbicidas	2-8 semanas	Hidrólisis de ésteres
	Fungicidas Insecticidas		
Ácidos alifáticos	Herbicidas	3-10 semanas	Deshalogenación
Organofosforados	Insecticidas	7-8 semanas	Hidrólisis de ésteres

Tomada de López, (1993).



En México la SAGARPA, a través de la SENASICA, regula el uso de plaguicidas en la actividad agrícola. En la sección *Para saber más* encontrarás un sitio en el que puedes indagar más al respecto.



Asimismo, la FAO ha elaborado un manual sobre el uso de plaguicidas, el cual puedes consultar en la sección *Para saber más*.

Fertilizantes. Los fertilizantes son aplicados para subsanar deficiencias de nutrientes primarios (nitrógeno, fósforo y potasio), secundarios (calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes (SAGARPA, 2012). A continuación, se explica cada uno de ellos, a excepción de los últimos, por carecer de estudios que validen sus efectos tóxicos.



Nitrógeno. Es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, ya que es un constituyente de las proteínas. Es absorbido por las raíces generalmente bajo las formas de NO_3^- (nitrato) y NH_4^+ (amonio). Los nitratos se absorben por microorganismos y plantas o se degradan por volatilización y lavado. El amonio se adsorbe sobre las superficies de las arcillas. Los principales impactos de fertilizantes de nitrógeno en los suelos son (Killpack y Buchholz, 1993):

- Aportación de otros nutrientes como: S, Mg, Ca, Na y B
- Variación de la reacción el suelo (acidificación o alcalinización)
- Incremento de la actividad biológica del suelo con importantes efectos indirectos sobre la dinámica global de los nutrientes
- Daños por salinidad y contaminación de acuíferos, causados por una dosificación muy alta
- Daños causados por las impurezas y productos de descomposición

El problema ambiental más importante relativo al nitrógeno es la acumulación de nitratos en el subsuelo que se lixivian e incorporan a las aguas subterráneas, o bien, ser arrastrados hacia los cauces y depósitos superficiales de agua. La lixiviación de nitratos hacia los acuíferos puede provocar problemas de salud al consumir agua rica en nitratos, debido a su transformación en nitritos por participación de unas bacterias existentes en el estómago y vejiga urinaria. A su vez, los nitritos se transforman en ciertos compuestos cancerígenos (nitrosaminas), que afectan al estómago e hígado. El proceso de lixiviación hacia el subsuelo se incrementa en la medida que el suelo sea permeable y más fina sea la textura; además, porque existen partículas cargadas negativamente que rechazan aniones y permiten el paso libre de nitratos. En el caso de suelos tropicales, que adquieren carga positiva y, por tanto, manifiestan una fuerte retención para los nitratos (FAO, 1992; SAGARPA, 2012).

Fósforo. Es el segundo elemento en importancia para el crecimiento de las plantas. La falta de este elemento en el suelo puede impedir que otros sean absorbidos por las plantas. De acuerdo a Filippelli (2002), desde el punto de vista químico, el fósforo puede encontrarse de forma orgánica, inorgánica, adsorbido y asimilable. El pH es el principal factor que condiciona la disponibilidad de fósforo para las plantas. Los principales impactos de fertilizantes de fósforo en los suelos son (Fillipelli, 2002):

- Aportación de otros nutrientes: S, Ca, Mg, Mn
- Aportación de sustancias que mejoran la estructura: cal y yeso
- Variación del pH del suelo
- Inmovilización de metales pesados



Potasio. Este elemento se presenta en forma de sales solubles. En la litósfera tiene una concentración media de 1.58%. Es un elemento muy adsorbido por los minerales arcillosos. según la disponibilidad del potasio en el suelo, puede ser clasificado en asimilable o no asimilable por la arcilla. Los principales impactos de fertilizantes de potasio en los suelos son (Trainor, 2008):

- Impureza en forma de aniones
- Impureza en forma de cationes
- Efecto salinizante, producido por las impurezas de los abonos potásicos, fundamentalmente los cloruros

Nutrientes secundarios. Son aquellos elementos nutritivos que las plantas necesitan absorber en gran cantidad, y que normalmente abundan en todos los suelos. A este grupo pertenece el Ca, Mg y S, cuyos efectos por su exceso en el suelo se muestran a continuación (Dorronsoro, 2007):

- El magnesio se debe evitar aplicar en grandes cantidades de $MgCl_2$ a las plantas sensibles al cloro
- El calcio se utiliza para mejorar la estructura del suelo, más que como fertilizante y para elevar el pH
- El azufre es tóxico en forma de SO_2 sobre las plantas y tiene efecto acidificante



Si deseas saber más sobre el uso de fertilizantes en la agricultura, se te recomienda **consultar** el siguiente documento:
SAGARPA. Uso de fertilizantes el cual se encuentra en la sección *Para saber más*.



Por otro lado el manejo de la FAO para los fertilizantes se te recomienda la consulta del documento *Los fertilizantes y su uso*, lo podrás **consultar** en la sección *Para saber más*.

En seguida se presentan los principales metales pesados que generan contaminación en los suelos. Éstos comúnmente tienen como fuente de origen la industria, a diferencia de los fitosanitarios, que es la actividad agrícola. Los daños ocurridos a suelos por actividad fitosanitaria pueden llegar a repercutir en otros medios como el agua y la atmósfera. Recuerda que, como parte de la actividad que desempeñarás como tecnólogo(a) ambiental, se encuentra la utilización de medidas de prevención y remediación del ambiente. El manejo y conocimiento de estos contaminantes, y saber cómo interactúan con los suelos, te permitirá aplicar metodologías adecuadas para su remediación.



1.3.3. Contaminación por metales pesados

En el suelo existen metales pesados, que son aquellos que tienen una densidad superior a 5 gr/cm^3 , sin considerar a los metales alcalinos y alcalino-térreos. Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1%. Dentro de los metales pesados hay dos grupos: los micronutrientes, vistos anteriormente, y los metales pesados sin función biológica conocida (Hogan, 2010). Estos últimos son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos. Son principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi; y su presencia en el suelo puede ser de forma natural o inducida por el hombre.

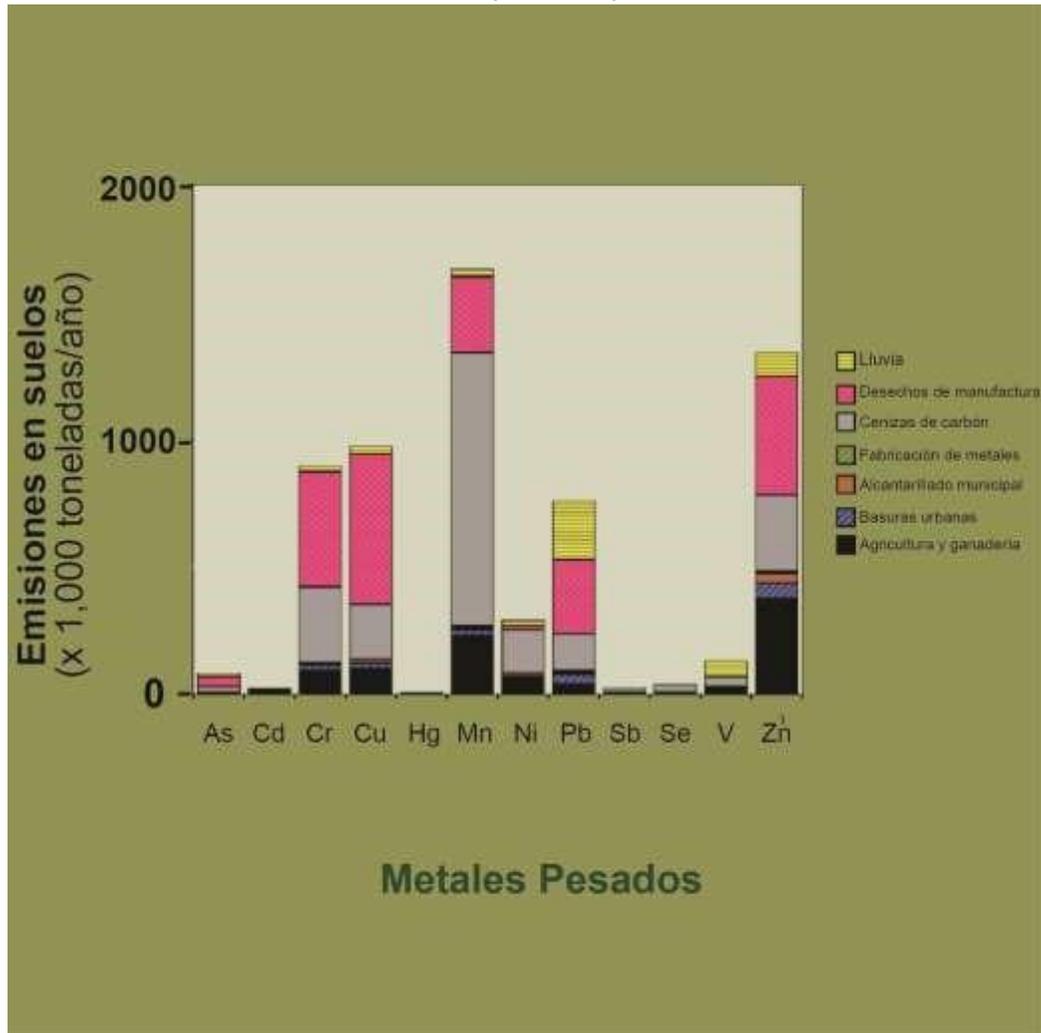
En el caso de la presencia de metales pesados en forma natural, ésta resulta de la etapa de degradación química de la roca madre, por ejemplo, el níquel que aparece en concentraciones tóxicas en suelos derivados de rocas ultra básicas, o la actividad volcánica que emite metales pesados tales como: As, Hg, Se, entre otros. Para el caso de la forma inducida por el hombre, se han detectado que las principales actividades que incrementan la concentración y transporte de metales pesados en los suelos son:

1. Productos químicos agrícolas y lodos residuales
2. Actividades de minería y fundición
3. Generación de electricidad
4. Otras actividades industriales
5. Residuos domésticos

De acuerdo al estudio de Galán y Romero (2008), se observa que las concentraciones tóxicas de metales pesados se deben, principalmente, a la actividad humana, sobre todo a los aportes de aguas residual industrial, de actividades mineras, de la aplicación de plaguicidas. En la figura que se muestra en seguida observa un resumen de la concentración de metales pesados por actividad humana.



Concentración de metales pesados por actividad humana.



Tomado de Dorrosoro, (2007).

Asimismo, basado en los estudios de Galán y Romero (2008) y de Dorrosoro (2007), en un balance a finales de la década de los años 80, se estimó que la cantidad anual de vertidos de metales en suelos ascendía a unos cinco mil billones de kilogramos. El 74% de esta cantidad corresponde a las cenizas procedentes de la combustión de carburantes, principalmente carbón. Observa lo anterior en la siguiente tabla.



Tabla. Contribución de metales pesados en suelos por fuente.

Fuente	Contribución (%)
Cenizas de combustión	74
Desechos urbanos	9
Turba	6
Residuos metalurgia	6
Residuos materia orgánica	3
Fertilizantes	2

Basada en Dorronsoro, (2007).

Los autores anteriores también estudiaron que los elementos que han experimentado mayores incrementos en su producción en los últimos años son: Al, Ni, Cr, Cd y Vn, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla. Cambios en la producción primaria de algunos metales.

Metal	Producciones				Emisiones en suelos
	1930	1950	1980	1985	1980/90
Al	120	1.500	15.395	13.690	--
Cd	1	6	15	19	22
Cr	560	2.270	11.245	9.940	896
Cu	1.611	2.650	7.660	8.114	954
Fe	80.180	189.000	714.490	715.440	--
Pb	1.696	1.670	3.096	3.077	796
Mn	3.491	5.800	26.720	--	1.670
Hg	4	5	7	7	8
Ni	22	144	759	778	325
Sn	179	172	251	194	--

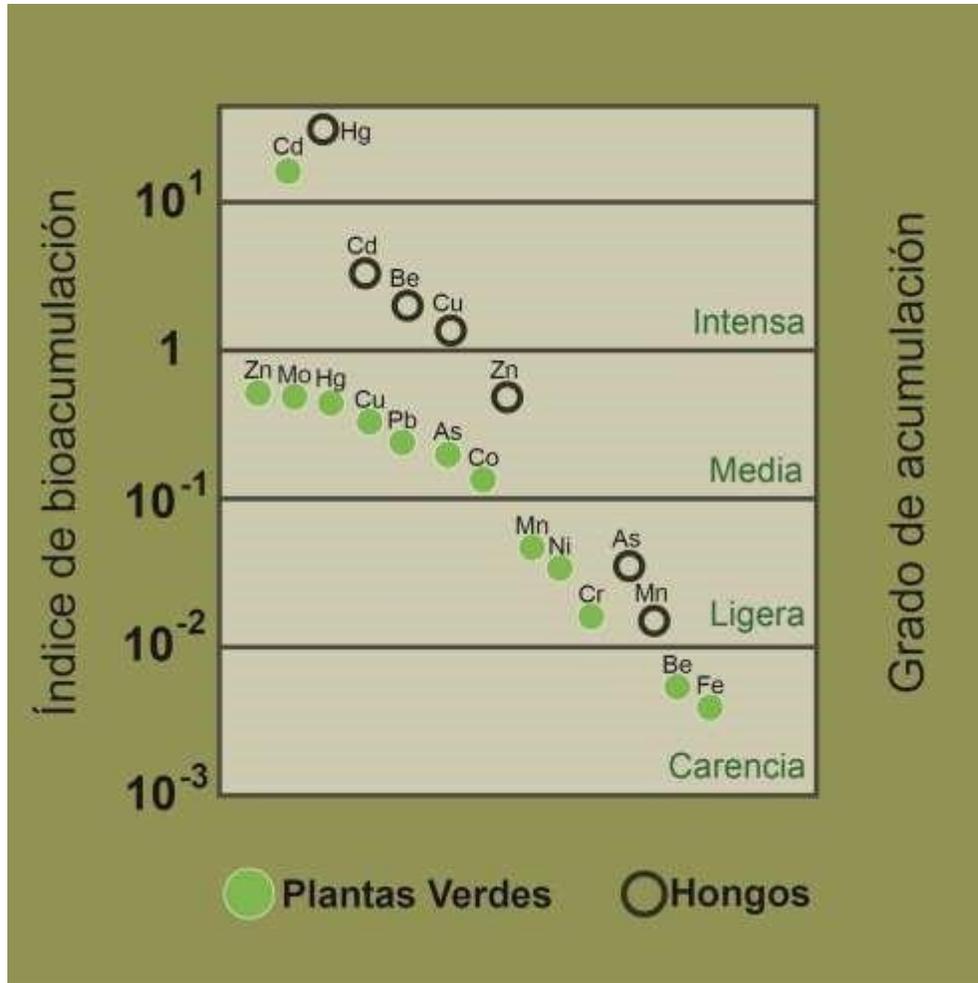


V	--	1,8	35	134	132
Zn	1.394	1.970	5.229	6.024	1.372

Basada en Galán y Romero (2008).

Como pudiste apreciar, entre más incremento de producción de metales, los riesgos producidos por los metales pesados en los suelos son la toxicidad y el carácter acumulativo de cada elemento, destacando aquellos metales que presenten un índice de bioacumulación elevado (>1). La bioacumulación se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos, y su índice se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en el organismo y la concentración de ese contaminante en el suelo (Mas y Azcue, 1993). En la siguiente figura se muestra el índice y una escala de acumulación por metal.

Índices de bioacumulación respecto a diferentes metales pesados.



Tomado de Dorronsoro, (2007).

También es importante mencionar que un suelo reacciona ante la presencia de metales pesados en función de sus propiedades físicas y fisicoquímicas, como las que a continuación se muestran (Mas y Azcue, 1993):

- **pH.** La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino.
- **Textura.** La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos.



- **Estructura.** Favorece la entrada e infiltración de la contaminación de metales pesados en el suelo.
- **Mineralogía de las arcillas.** La capacidad de cambio de cationes es mínima para los minerales del grupo de la caolinita, baja para las micas, alta para las esmectitas y máxima para las vermiculitas.
- **Materia orgánica.** Reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Los metales, una vez que forman quelatos o complejos, pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil.
- **Capacidad de cambio.** Es función del contenido de arcilla y materia orgánica, fundamentalmente. En general, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales.
- **Condiciones redox.** El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido.
- **Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.** Tienen la capacidad de retención de los metales pesados. Los suelos con altos contenidos de Fe y Mn tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y, en menor extensión, Zn, Co, Cr, Mo y Ni.
- **Carbonatos.** La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de altos valores de pH. El cadmio y otros metales presentan una marcada tendencia a quedar adsorbidos por los carbonatos.
- **Salinidad.** El aumento en salinidad puede incrementar el transporte de metales pesados por dos mecanismos. Primeramente, los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar, los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg. Además, tienden a dar suelos de pH básicos.

Por lo anterior, los metales pesados siguen diferentes procesos fisicoquímicos que condicionan su degradación o transporte en un suelo; de esto último se han identificado algunos mecanismos de retención, acumulación y transporte (Galán y Romero, 2008):

1. retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo, o bien, fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación
2. absorbidos por las plantas e incorporarse a las cadenas tróficas
3. pasar a la atmósfera por volatilización
4. movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas

En metales pesados se habla de movilidad cuando se hace referencia al transporte de ellos en suelo. Se considera que la movilidad de los metales pesados es muy baja y es más posible que se acumulen en el primer horizonte, siendo lixiviados a los horizontes



subsuperficiales en muy pequeñas cantidades en función principalmente del pH (Galán y Romero, 2008, Mas y Azcue, 1993). En la siguiente tabla se puede observar la movilidad de los metales pesados en función del pH.

Tabla. Movilidad relativa de los metales pesados según del pH de los suelos.

Movilidad	Oxidante	Acido	Neutro y alcalino	Reductor
Alta	Zn	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au		
Media	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Cd	Cd	
Baja	Pb	Pb	Pb	
Muy baja	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb

Basada de Galán y Romero, (2008).

Con todo lo consultado, te encuentras listo(a) para realizar la siguiente actividad, en la cual podrás llevar a la práctica tu conocimiento en cuanto al transporte de contaminantes en el suelo.

Se ha mencionado que la combustión de carbón es la principal fuente de metales pesados que luego se encuentran en los suelos. Punto y aparte es la actividad minera, que es muy importante en México, por lo cual a continuación se explica brevemente el mecanismo de contaminación de suelos por productos mineros.

Los recursos mineros se extraen por explotación superficial y subterránea. Las actividades mineras provocan fuertes impactos ambientales, con destrucción de los suelos naturales y creación de nuevos suelos llamados *antrosolos*, que presentan fuertes limitaciones físicas, químicas y biológicas que dificultan la reinstalación de vegetación. Se ha estudiado que, después de una explotación minera, los suelos presentan impactos negativos que, basados en el estudio de Gutiérrez y Moreno (2007), se mencionan a continuación:

- **Clase textural desequilibrada.** Las operaciones mineras generalmente producen una selección en el tamaño de las partículas, quedando materiales de un solo tamaño. Frecuentemente abundan los materiales gruesos, a veces sin apenas fracción menor de 2 mm.
- **Ausencia o baja presencia de estructura edáfica.** Se debe a la escasez de componentes coloidales, especialmente de los orgánicos. Dada la carencia de materiales coloidales y la ausencia de actividad biológica, las partículas quedan sueltas o forman paquetes masivos o estratificados.



- **Propiedades químicas muy anómalas.** Los suelos de mina son medios que pueden presentar situaciones extremas en los principales parámetros químicos. En general, se trata de sistemas que han sufrido una oxidación intensa y acelerada, lo que lleva consigo una abundante liberación de H^+ que provoca el descenso del pH del suelo (<3).
- **Acidez.** Ataca a los minerales y aparecen especies iónicas características de estos ambientes que son altamente tóxicas para los organismos acuáticos o terrestres, lo que provoca que el suelo no sea apto para el desarrollo de los organismos.
- **Escasez en el contenido de los nutrientes fundamentales.** Dado que la actividad biológica está fuertemente reducida, se presentan fuertes carencias de los principales nutrientes.
- **Ruptura de los ciclos biogeoquímicos.** Debido a que en los procesos mineros se suelen eliminar los horizontes superficiales, que son precisamente los biológicamente activos.
- **Baja profundidad efectiva.** El posible suelo tiene un espesor muy limitado.
- **Dificultad de enraizamiento.** Como consecuencia de la extrema delgadez del suelo las raíces sólo pueden desarrollarse en la fina capa superficial.
- **Baja capacidad de cambio.** Producida por la ausencia de materia orgánica evolucionada y la escasez de fracción arcilla.
- **Baja retención de agua.** Debido a las ausencias de los materiales dotados de propiedades coloidales citados en el punto anterior, y también por efecto de la ausencia de estructura.
- **Presencia de compuestos tóxicos.** Estos impiden, o cuando menos dificultan, la rápida colonización de los sitios en donde fue explotado el suelo.

Resumiendo, las actividades mineras causan intensas modificaciones en los suelos que conllevan frecuentemente a su total destrucción, dejando a los suelos con unas limitaciones tan severas que generalmente se han de tomar medidas correctoras para recuperar, por lo menos en parte, la capacidad productiva.



Cierre de la Unidad

Has llegado al final de la Unidad 1. Caracterización de suelos. Es importante mencionar que, con lo aprendido hasta el momento, puedes identificar los diferentes tipos de suelo por su formación y composición, explicar sus propiedades físicas y fisicoquímicas, además de estudiar los agentes contaminantes, en particular de los fitosanitarios, los metales pesados y actividad minera, que te han ayudado a entender los mecanismos de acumulación, degradación y transporte de estos contaminantes.

El conocimiento de tales temas es fundamental para el desarrollo de un (una) tecnólogo(a) ambiental, en primer lugar, para determinar las técnicas adecuadas de análisis de un suelo y, en segundo lugar, para conocer y aplicar las técnicas de saneamiento de los mismos. Esta tarea es muy importante para la toma de decisiones sobre el método más adecuado y viable de remediación de un suelo, que es un problema extendido en México. Esto lo podrás revisar en la siguiente unidad, pues observarás el aspecto normativo en suelos y los tipos de análisis fisicoquímico, microbiológico y toxicológico en los suelos.



Para saber más



En el artículo *Factors of soil formation: A System of Quantitative Pedology* del Autor Hans Jeny podrás revisar los factores de formación de suelos. En el documento se explica la importancia de su origen para actividades agrícolas, así como las propiedades que presenta el suelo, con características importantes para la bioremediación.

Da clic en la siguiente liga:

<https://netedu.xauat.edu.cn/sykc/hjx/content/ckzl/6/2.pdf>



En el sitio *Spectrum Analytic* podrás conocer más sobre las interacciones físico-químicas de los suelos para predecir su comportamiento y posibles reacciones ante líquidos, así como capacidades de retención, filtración o intercambio de cationes. Para revisarlo, da clic en la siguiente liga:

http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/CEC_BpH_and_percent_sat.htm



El artículo Cation Exchange Capacity (CEC) de la Universidad de Cornell trata de las características en suelos de los cationes elementales como: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), y potasio (K^{+}), sodio (Na^{+}), hidrogeno (H^{+}), aluminio (Al^{3+}), hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), zinc (Zn^{2+}) y cobre (Cu^{2+}). Da clic en la siguiente liga para verlo: <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet22.pdf>



Existen casos que ilustran el impacto de la contaminación de suelos en el desarrollo de una comunidad; éstos pueden ir desde pérdidas en la productividad de suelo agrícola, hasta incremento de tasas de enfermedades, lo cual puede verse en el documento llamado Conservation agriculture Case studies in Latin America and Africa, que puedes consultar en la siguiente liga: <https://www.fao.org/3/Y1730E/y1730e01.htm>



En el sitio de SENASICA de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, pesca y alimentación se revisan los aspectos necesarios para la aprobación en el uso de plaguicidas, así como la injerencia de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) de la Secretaría de Salud. Da clic en la siguiente liga: <http://www.senasica.gob.mx/?id=3447>



En el sitio de la FAO podrás observar un manual de especificaciones sobre el uso de plaguicidas, considerando el aspecto de calidad para el uso con plagas y viabilidad de acuerdo al sitio en que se planea su utilización. Se sugiere una exploración general del documento para mayor conocimiento de los términos, caracterización de plaguicidas y consideraciones de acuerdo OMS.

Da clic en la siguiente liga:

<https://www.fao.org/3/I5713s/I5713s.pdf>



En el siguiente tríptico de SAGARPA podrás observar el uso de los fertilizantes. El conocimiento de las características generales de los fertilizantes será de utilidad para inferir las necesidades del suelo para rendimiento y calidad en su uso agrícola.

Da clic en la siguiente liga:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554053/triptico_uso_Fertilizantes__1__compressed.pdf



En el siguiente documento Los fertilizantes y su uso, publicado por la FAO podrás observar cómo se usan los fertilizantes y su importancia para la producción en la agricultura. En este documento podrás conocer sobre los nutrientes para las plantas, sus características en su fotosíntesis, y cómo interactúan con los suelos. Lo puedes revisar en la siguiente liga, a través del explorador Mozilla:

<https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>



Fuentes de consulta



Bibliografía básica:

1. Brady, N., y Weil, R. (2008). *The nature and properties of soils*. (14th edition). Universidad de Virginia: Prentice Hall
2. Brown, R. (2003). *Soil Texture. Fact Sheet SL-29*. Estados Unidos: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences.
3. Buol, S., Hole, F., y McCracken, R. (2003). *Soil Genesis and Classification*. (5th edition.). Iowa State Univ. Press, Ames.
4. Domínguez Soto, Julia María, Román Gutiérrez, Alma Delia, Prieto García, Francisco, & Acevedo Sandoval, Otilio. (2012). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 141-155.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000100010
5. FAO. (2012) *Soil and Water*. Italia: FAO.
<http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e03.htm>
6. FAO. (2006). *Guidelines for soil description*. (4^a. Ed.). Italia: FAO
7. FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. (4^a. Ed.). Italia: FAO; Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.
8. FAO/OMS. (2004). *Manual sobre elaboración y empleo de las especificaciones de la FAO y de la OMS para plaguicidas*. Italia: FAO; Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.



9. Filippelli, G. M. (2002). The Global Phosphorus Cycle. *Revista: Reviews in Mineralogy and geochemistry*. 48: 391 – 425.
10. Galán, H. E., y Romero, B. A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*. España: Facultad de Química. Universidad de Sevilla.
11. Gutiérrez, M., y Moreno, M. (2007). *Los residuos en la minería mexicana*. México: INE.
12. Hillel, D. (2008). *Soil in the Environment*. Estados Unidos: Academic Press
13. Hogan, C. M. (2010). *Heavy metal. Encyclopedia of Earth*. Estados Unidos: National Council for Science and the Environment. Eds. E. Monosson & C. Cleveland. Washington, D.C.
14. Jenny, H. (2011). *Factors of soil formation. A System of Quantitative Pedology*. (12th, ed.). Estados Unidos: Dover Press.
15. SAGARPA. (2012). *Uso de fertilizantes*. México: SAGARPA.
16. Whitehead, D. C., y Tinsley, J. (2006). *The biochemistry of humus formation*. Estados Unidos: Journal of the Science of Food and Agriculture.

Bibliografía complementaria:

17. Auerswald K., Stanjek, H., y Bigham, J. (1997). *Soils and Environment: Soil Processes from Mineral to Landscape Scale*. Alemania: Catena.
18. Miller, R., y Donahue, R. (1990). *Soils: An Introduction to Soils and Plant Growth*. (6a edición). Estados Unidos: Universidad de Michigan; PrenticeHall.
19. Bolt, G., y Bruggenwert, M. (1978). *Soil chemistry – A Basics elements*. Elsevier Scientific Publishing Company.
20. USDA (2008). *The Color of Soil*. Estados Unidos: Natural Resources Conservation Service.
21. Fanning. D., y Balluff, M. (1989). *Soil: Morphology, Genesis, and Classification*. Estados Unidos: Wiley.
22. FAO. (1988). *World reference base for soil resources*. Italia: FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/w8594e/w8594e00.htm>
23. Henry, D. y Forth, D. (1984). *Fundamentals of soil science*. (7th Ed). Canadá: John Wiley & Sons.
24. Kellogg, C. (1957). *Stefferd, Alfred, ed. Soil: The Yearbook of Agriculture 1957*. Estados Unidos: United States Department of Agriculture.
25. Krauskopf, K., Bird, D. (1995). *Introduction to geochemistry*. (2a. ed., pp. 647). Estados Unidos: McGraw-Hill.



26. Lindsay, W. L., y Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*. Am. Sci. Soil. 42: 421-428.
27. López, C. L. (1993). *Exposición a plaguicidas organofosforados. Perspectivas en Salud Pública No. 18*. México: Instituto Nacional de Salud Pública.
28. Margalef, R. (1992). *Planeta azul, planeta verde*. España: Prensa científica.
29. McLean, J., Bledsoe, B., United States. Environmental Protection Agency, Technology Innovation Office, Superfund Technology Support Center for Ground Water. (1992). *Behaviour of metals in soils*. Estados Unidos: Universidad de Minesota.
30. Mas, A., y Azcue, J. M. (1993). *Metales en Sistemas Biológicos*. España: PPU.
31. OMS-OPS. (1993). *Plaguicidas y salud en las Américas*. Estados Unidos: Organización Panamericana de la Salud.
32. Scheffer F., y Schachtschabel P. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde*. EnkeVerlag Stuttgart.
33. Schoeneberger P., Wysocki, D., Benham, E., y Broderson, W. (1998). *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Estados Unidos: Universidad de Virginia; National Soil Survey
34. Service - U.S. Department of Agriculture, Lincoln, Nebraska.
35. Soil Survey Division Staff (1999). *Soil Structure Handbook 18. Soil survey manual*. Soil Conservation Service. Estados Unidos: Department of Agriculture.
36. Trainor, K. L. (2008). *Potassium in Plant Nutrition*. Estados Unidos.
37. USDA. (1999). *Soil Taxonomy*. Estados Unidos: Natural Resources Conservation Service.
38. Wilding, L.P., and L.R. Drees. 1983. Spatial variability and pedology. In L.P. Wilding et al. (ed.) *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions*. Developments in Soil Science 1 1 A. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Fuentes electrónicas:

39. Coronel University Cooperative Extension. (2007). *Cation Exchange Capacity (CEC)*. College of Agriculture and Life Sciences. Cornell University, <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet22.pdf>



40. Dorronsoro, F. C. (2007). *Edafología y los suelos*. Universidad de Granada.
<http://www.edafologia.net/>
41. EPA. (2004). *Risk Assessment Guidance for Superfund, Human Health Evaluation Manual*, Washington D.C. US.
42. Edafología.uer.es. (2004). *Fases del suelo*.
<http://edafologia.ugr.es/introeda/tema02/m1solida.htm>
43. FAO. (2013). *Fenómenos del agua en el suelo*.
<http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e03.htm>
44. INEGI. (s/f). *Recursos naturales: Edafología*. México: SEMARNTA.
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccnat/edafologia/http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccnat/edafologia/>
45. Killpack, S. C., y Buchholz, D. (1993). *Nitrogen Cycle*. USA: University of Missouri. US.
<http://extension.missouri.edu/publications/DisplayPub.aspx?P=WQ252>
46. Madrimasd.org. (2007). *Porosidad del suelo*.
<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/20/61764>
47. Milton Thompson, L., y Troeh, F. (1982). Perfil de un espodosol mostrados los horizontes O, A₁, A₂, y B₂. En Milton Thompson, L. y Troeh, F. (Ed), *Los suelos y su fertilidad*. (4^a. ed., pp.21). Barcelona: Reverte.
48. Molina, N., Guevara, D., y Fernández, J. (2013). *Composición del suelo*. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.
49. NRCS. (2012). *Los Doce Órdenes de Taxonomía de Suelos*.
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_053588
50. SEMARNAT. (2012). *Suelos*. México: SEMARNAT.
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica-am/informe/acrobat/capitulo2-1-6.pdf
51. Spectrum Analytic. (2013). *Cation Exchange Capacity (CEC)*.
http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/CEC_BpH_and_percent_s_at.htm
52. USDA. (2013). *NRCS PHOTO GALLERY*.
<http://photogallery.nrcs.usda.gov/res/sites/photogallery/>
53. edafología.net. (2011). *Textura del suelo*.
<http://www.edafologia.net/introeda/tema04/text.htm>