



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

**“INTRODUCCION A LA INGENIERIA AMBIENTAL PARA
LA INDUSTRIA DE PROCESOS”**

DR. CLAUDIO ALFREDO ZAROR ZAROR
PROFESOR TITULAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Concepción – Chile

3.3) CONTAMINACIÓN DEL SUELO

3.3.1) Principales características del suelo:

El suelo constituye el soporte material y la fuente de alimentos para el desarrollo de los seres vivos que habitan en él. El suelo es una mezcla variable de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. Se origina debido a la desintegración física de las rocas subyacentes, en un proceso de erosión muy lento, disgregándose en pequeños fragmentos. Los cambios de temperatura y pH ayudan al desarrollo de este proceso dinámico, cuyo resultado final es la liberación de los diferentes nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas y otros organismos que habitan allí.

Los residuos orgánicos generados por la actividad viviente se van mezclando con los componentes originales del suelo, incrementando el contenido orgánico de éste. Un suelo maduro se forma después de cientos de años en que los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos logran un contenido de materia orgánica significativo, mezclado con las finas partículas provenientes de la roca madre. Los espacios entre las partículas están llenos de agua y gases. La porosidad y la textura del suelo son características fundamentales y determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas y animales del suelo.

Una composición típica del suelo, muestra un contenido de sólidos de aproximadamente 50% en volumen, mientras que el resto es una mezcla de agua y aire. Lejos de tener una estructura homogénea, existe un perfil vertical de composición química y estructura física que, en forma simplificada, puede considerarse compuesto por:

- En la zona superior, de un espesor que en general es de unos pocos centímetros, se encuentra la mayor fracción de materia orgánica (llamado *horizonte A*). Consta de los restos de plantas y otros organismos que están siendo lentamente degradados a materia orgánica finamente dividida, en un proceso de formación de *humus*, a través de la acción de microorganismos saprófitos (bacterias y hongos) y de artrópodos. Su espesor es de unos pocos centímetros, usualmente en el rango de 5 a 25 cm, con un contenido de carbono orgánico entre 1 y 6%. En suelos maduros, este horizonte presenta estratos que reflejan diferentes grados de progreso en el proceso de degradación de los organismos muertos.
- Bajo la capa superior se encuentra el *horizonte B* o *subsuelo*, formado por los productos de las alteraciones de las rocas, además de material orgánico y mineral que lixivia desde la zona superficial. Además, se encuentran compuestos inorgánicos que se han derivado de la descomposición de la materia orgánica. Su espesor está en el rango 30 a 100 cm.
- La capa más profunda, llamada *horizonte C*, está formada por material disgregado procedente del fondo rocoso, con un alto contenido mineral. En

muchos casos esta materia madre pudo haber sido transportada desde otros sitios por gravedad (depósitos coluviales), por las aguas (depósitos aluviales), por glaciares (depósitos glaciales) o por vientos (depósitos eólicos). Los suelos transportados suelen ser muy fértiles, como lo demuestran las ricas tierras agrícolas en las zonas de delta de los grandes ríos. Su espesor puede llegar hasta unos 30 m de profundidad.

El espesor y las características de cada horizonte, dependen de las condiciones climáticas y de las distintas situaciones topográficas. En las praderas, la formación de humus es rápida, mientras que la mineralización es lenta, ya que los pastos tienen una vida muy corta, acumulándose grandes cantidades de materia orgánica que se pudre y humifica con rapidez. En los bosques, en cambio, las hojas y raíces se degradan con mayor lentitud, pero la mineralización es más rápida, por lo que la capa de humus es delgada.

Los suelos con pendientes pronunciadas, tienden a tener horizontes A y B muy delgados debido a la erosión. Por su parte, en las tierras con mal drenaje, el agua lixivia con rapidez los materiales y los lleva a capas más profundas, donde precipitan formando una capa dura de mineral impenetrable para las raíces de las plantas, para los animales o el agua.

En promedio, el agua constituye alrededor de 20 a 30% en volumen de la composición del suelo y se encuentra ligada a las partículas que están en la zona superior del suelo, o bien como agua libre en las zonas inferiores (es decir, agua subterránea). Se debe tener presente que el contenido de agua del suelo puede variar significativamente desde una condición casi seca hasta la saturación, dependiendo de las condiciones climáticas. Por otra parte, el aire contenido en el suelo se encuentra en pequeños poros existentes en los horizontes A y B, con un significativo contenido de CO_2 y alrededor de 15% de O_2 , producto de la actividad respiratoria de los microorganismos del suelo. Una parte importante del CO_2 generado se disuelve en el agua del suelo, acidificándola; ello contribuye a la disolución de algunos carbonatos presentes en el subsuelo, principalmente, CaCO_3 . En los horizontes más profundos, la ausencia de O_2 favorece el desarrollo de los procesos anaerobios que generan CH_4 , H_2S , CO_2 y ácidos orgánicos.

Las partículas inorgánicas del suelo, principalmente aquellas de unos pocos μm , presentan una gran área superficial para adsorber agua y nutrientes. Generalmente, las partículas más pequeñas están compuestas por arcillas (es decir, óxidos de silicio y aluminio hidratados). Los iones metálicos, como el Ca^{+2} , K^+ , Na^+ , Mg^{+2} y otros iones esenciales, que están presentes en las partículas del suelo, son liberados cuando se encuentran presentes iones H^+ , en un proceso de intercambio iónico que es muy importante en el suministro de iones para las plantas. Los principales minerales que componen el suelo son silicatos que provienen de la disgregación de las rocas ígneas y metamórficas. Otros minerales que también se encuentran en grandes proporciones son los óxidos de hierro, óxidos de manganeso, titanio, aluminio, zinc, etc., y los carbonatos (principalmente de calcio).

La materia orgánica del suelo consiste de plantas parcialmente degradadas, organismos microscópicos y humus, resultante de la acción de hongos y bacterias sobre los materiales lignocelulósicos.

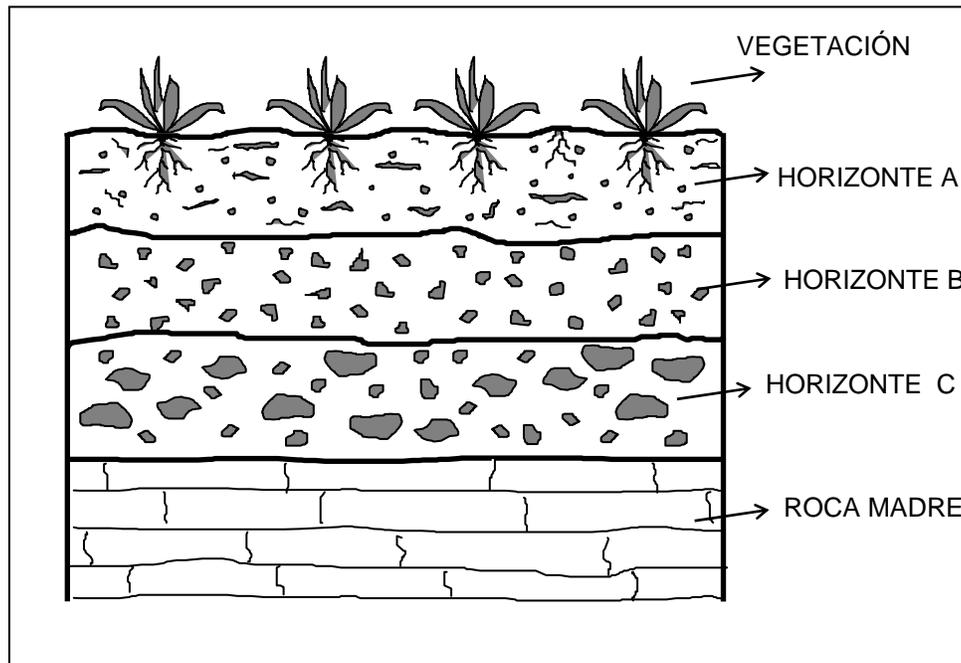


FIGURA 3.12: PERFIL ESQUEMÁTICO DE UN SUELO

Erosión de suelos

La erosión es un proceso natural donde la acción del viento, el agua y otros agentes meteóricos, tiende a modificar el relieve estructural y, finalmente, a destruirlo. El agente principal de erosión es el agua corriente, debido a su alta capacidad como solvente, como medio para transporte de material de energía.

Los factores que condicionan la erosión son:

- El clima, ya que determina las cantidades de agua que circulan por el suelo, así como los regímenes de viento.
- Las condiciones estructurales de un terreno, que fijan las pendientes e influyen sobre la dirección de escurrimiento del agua.
- La naturaleza de las rocas sobre las que ejerce la acción, el agua y el aire.

La erosión del suelo genera una reducción de su capacidad productiva potencial, ya que se elimina el soporte que permite la supervivencia de las comunidades bióticas terrestres. Generalmente, los suelos comienzan a erosionarse debido a la eliminación de su cubierta vegetal protectora, como resultado de procesos naturales o acciones humanas (incendios forestales, tala abusiva, deforestación intencional, pastoreo abusivo, agotamiento y abandono de tierras agrícolas, actividades industriales y mineras, etc.). La recuperación de un suelo erosionado, es difícil y lenta, requiriendo cientos o miles de años para que se formen unos pocos centímetros de suelo. En este sentido, la reforestación intensiva de áreas erosionadas ha demostrado ser muy efectiva para detener los procesos erosivos y recuperar terrenos improductivos.

TABLA 3.9: TIPOS DE SUELOS DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
Podzol	Abundante material vegetal en el horizonte A, arenoso y ácido, con alto predominio de humus (color oscuro). El horizonte B es rico en material coloidal, que son arrastrados hacia las zonas profundas. Característico de climas fríos y húmedos.
Chernozen	El horizonte A es rico en humus y en óxidos de fierro (color pardo-amarillo). El horizonte B contiene carbonato de calcio. Característico de regiones húmedas con veranos cálidos.
Lateritas	El horizonte A es casi inexistente, mientras que el horizonte B tiene un alto contenido de óxidos de fierro y alumina (color rojizo). Característico de regiones tropicales de clima cálido y húmedo.
Suelos desérticos	El horizonte A es de color gris claro. El horizonte B contiene depósitos de carbonato de calcio. Característico de regiones con clima desértico.

TABLA 3.10: CAPACIDAD DE USO DEL SUELO(*)

CLASE DE SUELO	CARACTERÍSTICAS Y USO RECOMENDADO
I	Suelos profundos, fáciles de trabajar, casi planos; sin escurrimiento superficial; sin riesgos para cultivos. Se requiere uso de fertilizantes, cubiertas de residuos y rotación de cultivos para mantener la fertilidad y estructura del suelo.
II	Suelos productivos de pendientes y profundidad moderadas; ocasional escurrimiento superficial; pueden requerir drenaje; moderado riesgo de daños cuando son cultivados; uso de rotaciones; prácticas especiales de cultivos para controlar erosión.
III	Suelos de moderada fertilidad sobre pendientes moderadas, sujetos a erosión más severa; sujetos a severos riesgos de daños por lo que se debe mantener una adecuada cobertura vegetal.
IV	Buenos suelos de pendientes fuertes, sujetos a severa erosión; severos riesgos de daños por lo que deben ser cultivados sólo ocasionalmente
V	Tierras muy pedregosas para cultivos; sujetas a erosión suave con manejo apropiado; podrían ser usadas para praderas o forestal, pero el pastoreo debe ser regulado para prevenir que la cobertura vegetal sea destruida.
VI	Suelos delgados sobre pendientes fuertes; uso de pastoreo o forestal; pastoreo debe ser regulado. Si la cobertura forestal es destruida, el uso debe ser restringido hasta que sea restablecida.
VII	Pendientes fuertes, suelos erosionables y delgados; también incluye tierras pantanosas; severo riesgo de daños cuando es usada para pastoreo o forestal; se debe aplicar manejo forestal o pastoril estricto.
VIII	Pendientes muy fuertes; reserva para vida silvestre, recreación limitada y conservación de cuencas hidrográficas.

(*) *Sistema del U.S. Department of Agriculture (EEUU)*

3.3.2) Contaminación de Suelos

Los residuos depositados o abandonados en el suelo presentan diferentes características físicas y químicas. Más aún, los residuos se pueden encontrar ubicados sobre la superficie del suelo o enterrados bajo tierra. Una vez depositados en el suelo, los residuos están sujetos a transformaciones, debido a los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, lo que puede facilitar su transporte, dependiendo de las características de los contaminantes primarios y secundarios, y de las características geoquímicas del medio.

A continuación se describen algunos de los principales contaminantes primarios del suelo, derivados de la actividad humana.

- **Residuos Orgánicos Biodegradables**

Incluyen una amplia gama de residuos derivados de la actividad doméstica o de actividades similares donde no se generen compuestos tóxicos. Contienen restos de alimentos y otros materiales de origen animal y vegetal. Los compuestos sólidos biodegradables pueden sufrir degradación anaeróbica, debido a la acción de microorganismos, bajo condiciones de pH, temperatura y humedad adecuadas, generando compuestos volátiles, líquidos orgánicos e inorgánicos y humus.

- **Residuos Peligrosos**

Frecuentemente, provienen de fuentes industriales, hospitales, laboratorios químicos y bioquímicos, agrícolas y forestales. Incluyen compuestos sólidos, líquidos y gaseosos (presentes en contenedores) desechados en el suelo, cuya composición química, forma de disposición y concentración constituyen un peligro para la salud y seguridad de las personas y, además, representan un potencial de daño ambiental significativo. El rango de compuestos orgánicos e inorgánicos que caen dentro de esta categoría es amplísimo, y entre estos se encuentran, solventes orgánicos, biocidas, compuestos aromáticos, compuestos halogenados, metales pesados, hidrocarburos, cianuros inorgánicos, isocianatos, agentes patógenos y otros agentes biológicamente activos, etc.. Los peligros asociados a estos residuos se deben a sus propiedades químicas, físicas y biológicas, que les confieren características de toxicidad, inflamabilidad, corrosividad y reactividad. En los países industrializados existe una estricta legislación para controlar la disposición de estos residuos.

- **Residuos Estables:**

Generalmente, se originan a partir de obras de demolición, reparación y construcción de viviendas y caminos, en la actividad doméstica, en oficinas, comercio, y en algunas actividades industriales. Incluyen todos aquellos materiales, sólidos y líquidos, que presentan una alta estabilidad física y química, bajo las condiciones ambientales normales, tales como: desechos cerámicos, ladrillos, madera, vidrios, mortero, restos de cables eléctricos, restos de estructuras, papeles, cartones, plásticos, etc..

3.3.3) Transporte de los Contaminantes en el Suelo

Por sí mismo, el suelo no es un vector importante de dispersión de contaminantes, pero en combinación con la acción del aire y del agua puede constituir un importante foco de emisión de contaminación.

La movilidad y destino final de los compuestos del suelo depende de varios factores, entre los cuales destacan; la existencia, profundidad y dirección de escurrimiento de la napa freática, la porosidad, la temperatura, la capacidad de adsorción e intercambio iónico de las partículas del suelo, el contenido de agua y aire, y la presencia de organismos vivos.

Si el residuo sólido se mantiene en fase sólida y pasa a formar parte integral de la matriz del suelo, su movilidad será similar a la del resto de las partículas del suelo. Sin embargo, aquellos contaminante primarios y secundarios que estén en fase líquida o que sean volátiles bajo las condiciones ambientales, podrán ser transportados fácilmente por el agua y el aire:

- Los contaminantes solubles en agua presentes en el suelo son transportados superficialmente por las aguas lluvia hacia los ríos, lagos y el mar, o se infiltran hacia el interior del suelo hasta, eventualmente, contaminar un acuífero subterráneo. Por ejemplo, los compuestos orgánicos de bajo peso molecular (ácidos, alcoholes, aldehídos), generados por la actividad anaeróbica sobre residuos orgánicos biodegradables, son lixiviados por las aguas lluvia, constituyendo un importante foco de contaminación acuática.
- Aquellos contaminantes que sean volátiles, tales como hidrocarburos, compuestos orgánicos aromáticos, mercaptanos, aminas volátiles, NH_3 , H_2S y CH_4 , pueden ser transferidos al aire y transportados hacia otros lugares. La volatilización es favorecida por condiciones de alta temperatura y fuertes vientos. Generalmente, los compuestos volátiles son contaminantes secundarios derivados de la actividad biológica en el suelo o de procesos químicos de fotooxidación.

El transporte de los contaminantes en el aire y en medio fluvial ya fue descrito en secciones anteriores, por lo que no será revisado aquí. A continuación, se entregan antecedentes generales sobre el transporte de los contaminantes disueltos en los acuíferos subterráneos.

• Transporte Vía Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas son la mayor reserva de agua continental y una importante fuente de agua para consumo humano. Se originan debido a la infiltración directa de las lluvias, o bien a partir de las aguas de lagos y ríos que escurren a través de grietas y poros de las rocas, hasta alcanzar un nivel impermeable. La acumulación de aguas subterráneas es altamente dependiente de las características geológicas (por ejemplo, rocas porosas o fracturadas que

contienen agua) y se pueden distinguir diferentes tipos de acuíferos :

Acuíferos libres: consiste en una zona permeable saturada de agua, basada sobre un estrato impermeable. Sobre dicha zona existe una zona permeable no saturada de agua, donde los poros y grietas contienen agua y aire. El agua en la superficie del acuífero está a presión atmosférica.

Acuíferos confinados: la roca permeable saturada de agua queda confinada entre dos capas impermeables, de modo que la presión del agua en la superficie del acuífero es mayor que la atmosférica.

El transporte de contaminantes en las aguas subterráneas depende de las condiciones de flujo del sistema. El flujo volumétrico de agua subterránea, F , a través de un área transversal A , se puede modelar de acuerdo a la ley de Darcy:

$$F = K A \frac{dh}{dx}$$

donde K es la conductividad hidráulica (o coeficiente de conductividad) y dh/dx es el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica puede variar en varios órdenes de magnitud para diferentes tipos de materiales; algunos valores ilustrativos de K se presentan a continuación:

MATERIAL	K (m/día)
Arcilla	0,0004
Arena	40
Pedregoso	4.000
Caliza densa	0,04
Granito, cuarzo	0,0004

La velocidad a la cual se transporta un contaminante disuelto en un acuífero, v , se puede estimar en base a la relación de Darcy, tomando en consideración la porosidad del medio (Φ , fracción de volumen de poros respecto del volumen total):

$$v = \frac{F}{A \Phi}$$

Sin embargo, en la realidad puede existir una significativa dispersión, debido a la tortuosidad del medio poroso y a los efectos de la adsorción del contaminante con la superficie de las partículas del suelo. Estos fenómenos son difíciles de modelar, debido a su gran complejidad y a la naturaleza altamente heterogénea del suelo.