



Basel Convention Coordinating Centre
Stockholm Convention Regional Centre

URUGUAY



Ministerio de Vivienda
Ordenamiento Territorial
y Medio Ambiente

MVOTMA

Sitios Contaminados

Capacitación Regional en Residuos Peligrosos

30 de setiembre – 2 de octubre de 2014

San José, Costa Rica



RED de CENTROS

Convenio de Basilea
Latinoamérica & Caribe

Convenio de Estocolmo

NETWORK of CENTRES

Basel Convention
Latin America & the Caribbean

Stockholm Convention

Sitios Contaminados

- **¿Qué son y como se generan?**
 - Los sitios contaminados son lugares donde han habido depósitos, enterramientos y/o vertidos de sustancias tóxicas persistentes o residuos que las contienen, vinculados a actividades industriales, comerciales, agrícolas y domésticas (antropogénicas).
 - En un sitio contaminado, estas sustancias están concentradas, superando los niveles de seguridad recomendados para un uso determinado (agrícola, residencial, comercial, industrial).
 - Las sustancias tóxicas persistentes, una vez en el ambiente, afectan la calidad del suelo, agua y aire, pudiendo también ocasionar daños a la salud.
 - Por esta razón es importante identificar los sitios contaminados, de tal forma de prevenir riesgos para la salud que deriven de un uso inadecuado de los mismos, o daños al ambiente por el transporte de las sustancias desde el sitio hacia el entorno.

Estructura del Suelo

- El suelo es la capa fina superior de la corteza terrestre. Es un sistema vulnerable y susceptible de alterarse, perdiendo su equilibrio natural.
- La composición media del suelo, en porcentaje en volumen, es la siguiente:
 - 50% de materia sólida.
 - 20-30% de disolución acuosa .
 - 20-30% de aire edáfico.

Estructura del Suelo

Disolución Acuosa

- Actúa de intermediaria entre la litosfera y los organismos vivos, y contiene los solutos necesarios para el desarrollo de la vegetación existente en el mismo.
- El tipo de iones presentes y su concentración depende, fundamentalmente del tipo de suelo y de la época del año. Mayoritariamente iones Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Ca^{+2} , en menor cantidad Mg^{+2} , H_3SiO_4^- , K^+ , Na^+ y Mn^{+2} , y como minoritarios pueden estar presentes Al^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} , Cu^{+2} y H_2PO_4^- .

Estructura del Suelo

Fase Sólida

Representa aproximadamente la mitad de la composición total del suelo y está constituida en un 45% por una fracción inorgánica y en un 5% por una fracción orgánica.

- **Fracción Inorgánica**

Se encuentran partículas minerales de distintos tamaños y que de mayor a menor se denominan: gravas ($> 2\text{mm}$), arenas ($0,05\text{-}2\text{mm}$), limos ($2\text{-}50\text{ mm}$) y arcillas ($<2\text{mm}$).

Estructura del Suelo

- **Fracción Inorgánica (Cont.)**

El tamaño de las partículas que forman un suelo determinan la textura del mismo y aporta información sobre su porosidad, donde circula el aire y el medio acuoso edáfico.

También es importante el tamaño de los poros, ya que determinan la permeabilidad de un suelo, es decir, la velocidad con que el aire y el agua pueden moverse a través del mismo, desde las capas más superficiales a las más profundas.

Estructura del Suelo

- **Fracción Inorgánica (Cont.)**

Compuesta por minerales primarios y secundarios.

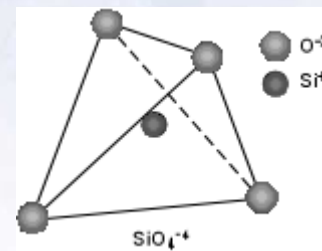
- *Primarios*: formados a elevadas temperaturas y derivados de rocas ígneas y metamórficas como cuarzo, feldestapos, micas, etc.
- *Secundarios*: se forman por reacciones a bajas temperaturas y proceden de rocas sedimentarias o por meteorización de minerales primarios como por ejemplo carbonatos, algunos óxidos, compuestos de azufre, etc.

Estructura del Suelo

- **Fracción Inorgánica (Cont.)**

Aunque la composición química de las fracciones inorgánicas de los suelos es variable, mayoritariamente se encuentran en todas ellas silicatos minerales.

La unidad estructural es SiO_4 .



Estructura del Suelo

- **Fracción Orgánica**

Representa un porcentaje en peso muy pequeño de la composición global del mismo, es de vital importancia para determinar su fertilidad, porque es una fuente de alimentos para microorganismos, participa en diversos procesos químicos edáficos y afecta a sus propiedades físicas.

Procede mayoritariamente de residuos vegetales en fase de descomposición, y en menor proporción, de organismos vivos y de la materia orgánica resistente a la degradación biológica y química.

Estructura del Suelo

- **Fracción Orgánica (Cont.)**

En el suelo existe también materia orgánica muy difícilmente degradable, denominada fracción húmica.

El humus está constituido mayoritariamente por ácidos húmicos y fúlvicos, que son una mezcla compleja de macromoléculas. La fracción húmica está enriquecida en nitrógeno con respecto a la materia vegetal inicial y una parte importante de la misma es insoluble en agua, por lo que se acumula en las capas más superficiales del suelo.

Estructura del Suelo

• Fracción Orgánica (Cont.)

Los efectos beneficiosos de la materia orgánica del suelo podría resumirse en los siguientes aspectos:

- Contribuye al crecimiento vegetal, aportando bionutrientes esenciales en proporción importante: nitrógeno (casi en su totalidad), fósforo (entre el 50-60%) y azufre (del orden del 80%).
- Regula la disponibilidad de muchos cationes metálicos, por absorción de los mismos, y que actúan como micronutrientes o elementos tóxicos, según los casos.
- Ejercen una acción tamponante, manteniendo el pH del suelo, debido a la presencia de funciones ácidas en sus moléculas.
- Regulan la humedad del suelo, debido a su capacidad de retención del agua, interaccionando, en muchos casos, con los silicatos.
- Mejoran la estructura granular del suelo, beneficiando la permeabilidad y la aireación, por interacción con las partículas minerales, favoreciendo la agregación de partículas.

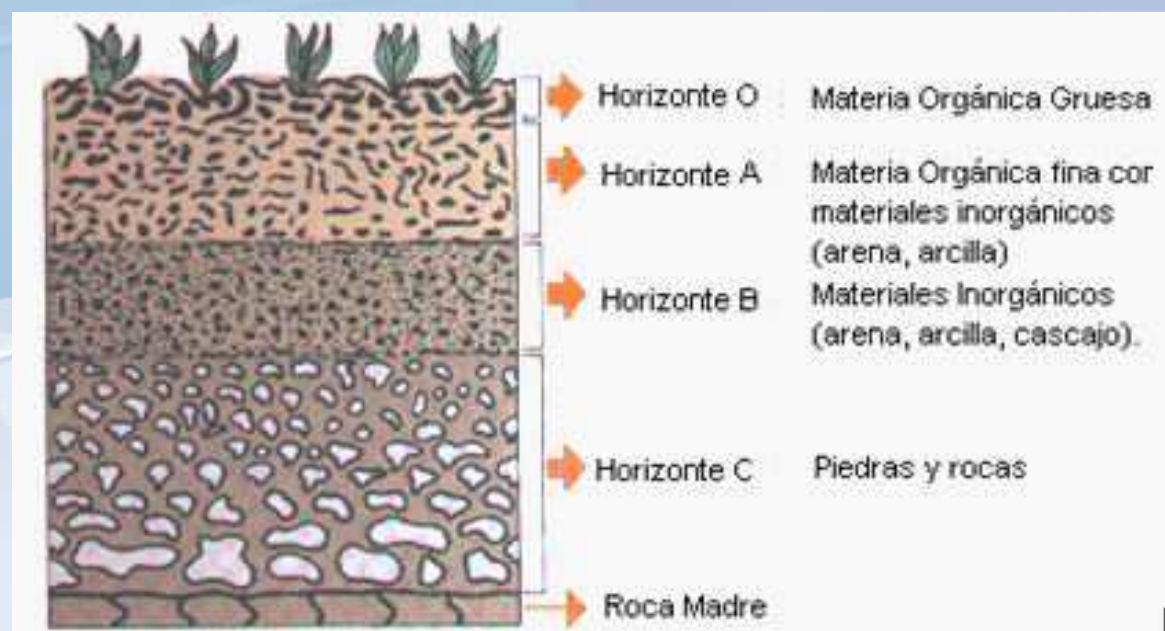
Estructura del Suelo

El suelo presenta una estructura secuencial. Pueden observarse distintas capas u horizontes según la profundidad, que tienen distintas propiedades físicas y químicas en función del proceso de formación del mismo.

Básicamente, pueden distinguirse tres capas:

- La capa más superficial (horizonte A), en la que se produce una gran lixiviación de algunos de sus componentes, constituida por partículas minerales (fundamentalmente materiales silíceos) y materia orgánica procedente de organismos vivos.
- En la capa inmediatamente inferior (horizonte B), se acumulan los compuestos de lixiviación procedentes de la capa anterior. En esta zona tiene lugar la oxidación de la materia orgánica, y se encuentran presentes óxidos de hierro III.
- En la capa más profunda (horizonte C), no existe apenas lixiviación y están presentes materiales poco particulados. A medida que aumenta la profundidad, se observa disminución del oxígeno presente (debido al consumo del mismo en los procesos de oxidación de la materia orgánica y de la formación de óxidos) y un aumento paralelo de la cantidad de dióxido de carbono.

Estructura del Suelo



Estructura del Suelo



Calicata

Estructura del Suelo

En la formación de un suelo influyen los siguientes factores:

- Tiempo.
- Precipitación. Las lluvias regulan la humedad edáfica y el contenido de aire.
- Temperatura. Influye en la velocidad de las reacciones químicas, en la actividad microbiana y, por tanto, en la composición de la materia orgánica.
- Topografía del terreno. La existencia de desniveles o pendientes afecta a la retención y al drenaje del agua superficial, influyendo en la velocidad de formación del suelo.
- Vegetación. La vegetación retiene la humedad, por lo que se produce una disminución del grado de lixiviación. Además, favorece la disgregación de las rocas.

Estructura del Suelo

En la formación de un suelo influyen los siguientes factores:

- **Microorganismos.** En los suelos naturales existe una biomasa formada por microorganismos, que se denomina edafón, y que está constituida por el conjunto de bacterias, virus, hongos, algas, líquenes, protozoos y otras especies superiores. Estos microorganismos permiten el desarrollo de numerosos procesos bioquímicos, asociados a la fase acuosa del suelo, y que influyen en la estructura del mismo.
- **Material original.** La roca originaria del terreno es la que determina la composición química del suelo, porque es el material de base a partir del cual se forma. Los tipos de rocas que pueden ser material original del suelo son: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Estructura del Suelo

Las **rocas ígneas** están formadas por solidificación de un material fundido que fluye hacia la superficie. En función de la velocidad de enfriamiento de este material se formarán rocas de grano grueso (si se produce lentamente), o de grano fino cuando la solidificación es rápida.

Las **rocas sedimentarias** se forman como resultado de la sedimentación de materiales depositados por el viento, el agua, el hielo, o por gravedad. Pueden estar constituidas por sales de hierro, aluminio o silicio, por carbonatos de calcio y magnesio o por combinaciones de estos compuestos.

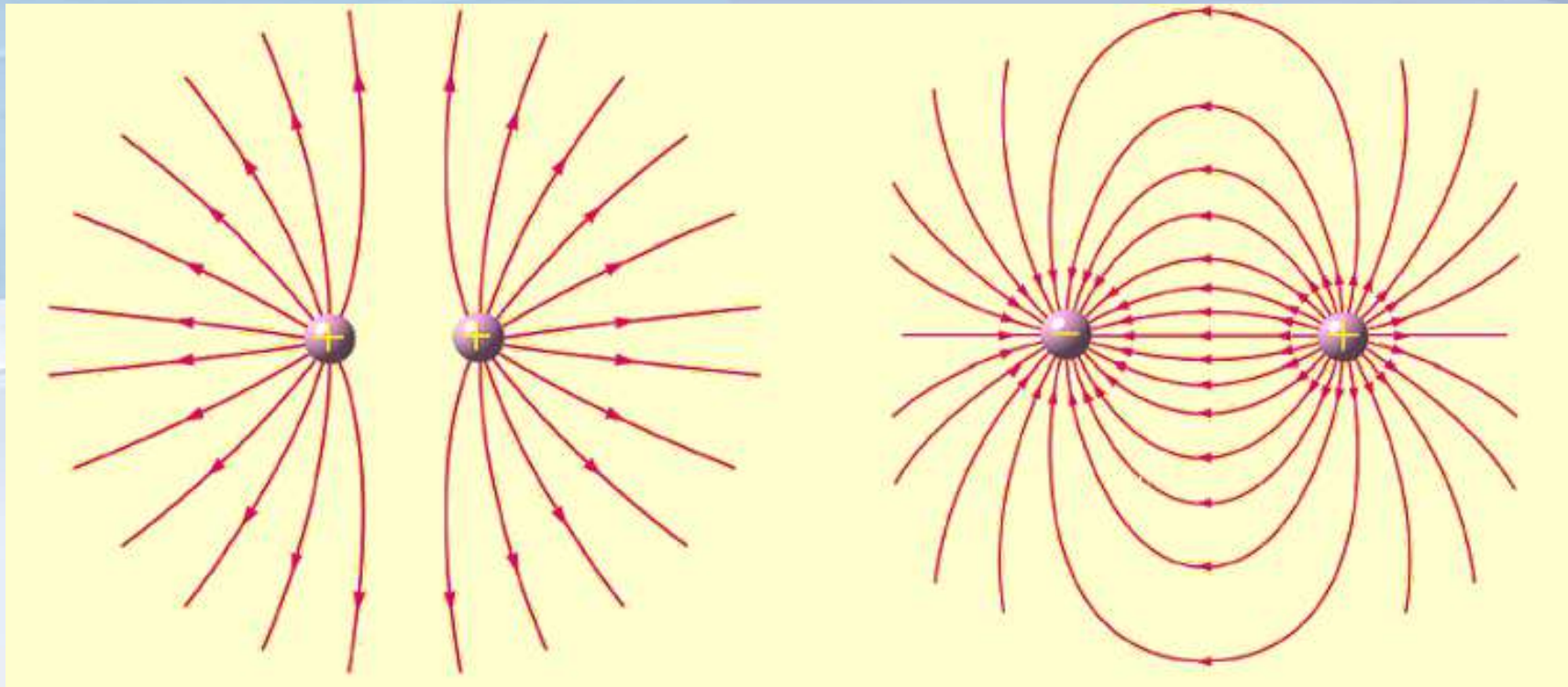
Las **rocas metamórficas** se forman por recristalización de los dos tipos de rocas anteriores cuando están sometidas a altas presiones y elevadas temperaturas. Las más conocidas son los mármoles.

Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos de Adsorción

- Los fenómenos de adsorción e intercambio iónico son muy importantes, porque son los que determinan la capacidad de los distintos compuestos solubles del suelo de participar en distintas reacciones químicas.
- En estos procesos participan las partículas de tamaño coloidal (arcillas y sustancias húmicas) que, debido a sus pequeñas dimensiones, presentan una elevada superficie específica. Este es el parámetro que más influye en los procesos de adsorción.
- Las partículas coloidales adsorben iones del mismo signo en su superficie y como consecuencia, se ejercen repulsiones electrostáticas entre ellas, pudiendo mantenerse en suspensión en la disolución del suelo. Para neutralizar la carga superficial de las partículas coloidales, en la disolución se establece una distribución de las cargas de signo opuesto.

Principales procesos Físico Químicos



Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos de Intercambio Catiónico

- La carga negativa de las partículas coloidales del suelo retienen cationes. Esta retención es de gran importancia para el suelo, porque reduce la pérdida de algunos iones por lixiviación, a la vez que los mantiene disponibles para que sean captados por la vegetación. Los cationes suelen que ser adsorbidos son fundamentalmente Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , y Na^+ .
- Los cationes adsorbidos por las partículas coloidales pueden intercambiarse por otros iones presentes en la disolución del suelo. El proceso en el que un catión es sustituido por otro se conoce con el nombre de intercambio catiónico. La distribución de los cationes principales intercambiables en los suelos agrícolas productivos es $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ = \text{Na}^+$.

Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos de Intercambio Aniónico

- Se dan en mucha menor proporción que el intercambio catiónico y ocurre en suelos donde el coloide cambia de carga volviéndose positiva y teniendo la capacidad de retener aniones, suelos altamente meteorizados y con alta carga de metales de Al y Fe. Un ejemplo importante es la adsorción de iones fosfato, que forman compuestos insolubles y que son muy difíciles de asimilar por las plantas. Suelos de bajo pH.

Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos Acido Base

- A medida que el suelo va transformándose mediante procesos de meteorización, va sufriendo cambios en su valor de pH. Este valor depende principalmente de la presencia de determinados cationes en el suelo, que pueden proceder de la atmósfera, de residuos vegetales, de fertilizantes, de reacciones químicas, del agua de percolación, etc.

Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos Acido Base

El pH óptimo para la mayoría de los cultivos está comprendido entre 6 y 7,5, pero hay una serie de fenómenos que pueden producir una acidificación excesiva del suelo como:

- Precipitaciones ácidas.
- Acidificación por materia orgánica procedente de residuos vegetales que pueden liberar compuestos ácidos solubles.
- Uso de fertilizantes amoniacales que pueden sufrir reacciones de nitrificación.
- Disolución de CO_2 .
- Adsorción de cationes por las plantas durante su crecimiento, que son intercambiados por H^+ .
- Oxidación de sulfuros de hierro en suelos pirolíticos.

Un efecto secundario relacionado con la acidificación y aumento de la solubilidad de sales es la salinización, que se considera un importante problema de contaminación.

Principales procesos Físico Químicos

Fenómenos de Oxidación Reducción

En el suelo, debido a la presencia de especies aceptoras y donadoras de electrones, pueden producirse reacciones redox que originan cambios en los números de oxidación de elementos constituyentes de las especies orgánicas e inorgánicas que participan en las mismas.

El pH del medio influye en estos procesos redox.

El principal aceptor de electrones es el oxígeno presente en el aire edáfico que, fundamentalmente, procede de la atmósfera y la especie donadora más abundante es la materia orgánica del suelo.

Suelos Contaminados (Sitios)

El impacto ambiental que sobre el suelo está ejerciendo el hombre ha originado que la contaminación del mismo sea uno de los problemas medioambientales que está recibiendo creciente atención. Ello es debido a los riesgos directos que los suelos contaminados pueden ejercer sobre la salud humana y a razones económicas derivadas de su limitación al uso.

Se denomina suelo contaminado a una porción de terreno, superficial o subterránea, cuya calidad ha sido alterada.

Las alteraciones producidas son diversas y el origen puede deberse a diferentes causas: resultado de actividades industriales, agrícolas o de servicios, ya sean actuales o pasadas.

Suelos Contaminados (Sitios)

Los contaminantes pueden provocar:

- Contaminación de las aguas subterráneas a través de lixiviados.
- Contaminación de aguas superficiales a través de la escorrentía.
- Contaminación del aire por combustión, evaporación, sublimación o arrastre por el viento.
- Envenenamiento por contacto directo.
- Envenenamiento a través de la cadena alimentaria.
- Fuego y explosión.

Suelos Contaminados (Sitios)

La contaminación se suele dividir en dos tipos:

- Contaminación endógena: si se producen desequilibrios en los constituyentes del suelo, provocando variaciones de algunas especies a concentraciones nocivas para los seres vivos:
 - Movilización de metales a causa de procesos de acidificación.
 - Aumento del porcentaje de Na^+ en el suelo, produciendo salinización, la que influirá en la capacidad de su producción.
- Contaminación exógena: Provocada por distintos tipos de vertidos o productos agrícolas en exceso (metales, hidrocarburos, plaguicidas, fertilizantes, etc.) componentes ajenos a la composición original del suelo.

Principales Contaminantes

Metales Pesados

- Se pueden encontrar formando parte de la estructura de las partículas del suelo, pero su peligrosidad se debe cuando se presentan en la disolución del suelo y por lo tanto se comportan como micronutrientes.
- Las principales fuentes son vertidos industriales, actividades mineras, residuos, plaguicidas, tráfico, etc.
- Los metales vertidos en mayor cantidad son Mn, Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, Cd, y Hg, siendo muchos de ellos altamente tóxicos.
- Se puede producir contaminación con metales en las aguas (superficiales y subterráneas) por percolación.

Principales Contaminantes

Metales Pesados



Principales Contaminantes

Metales Pesados



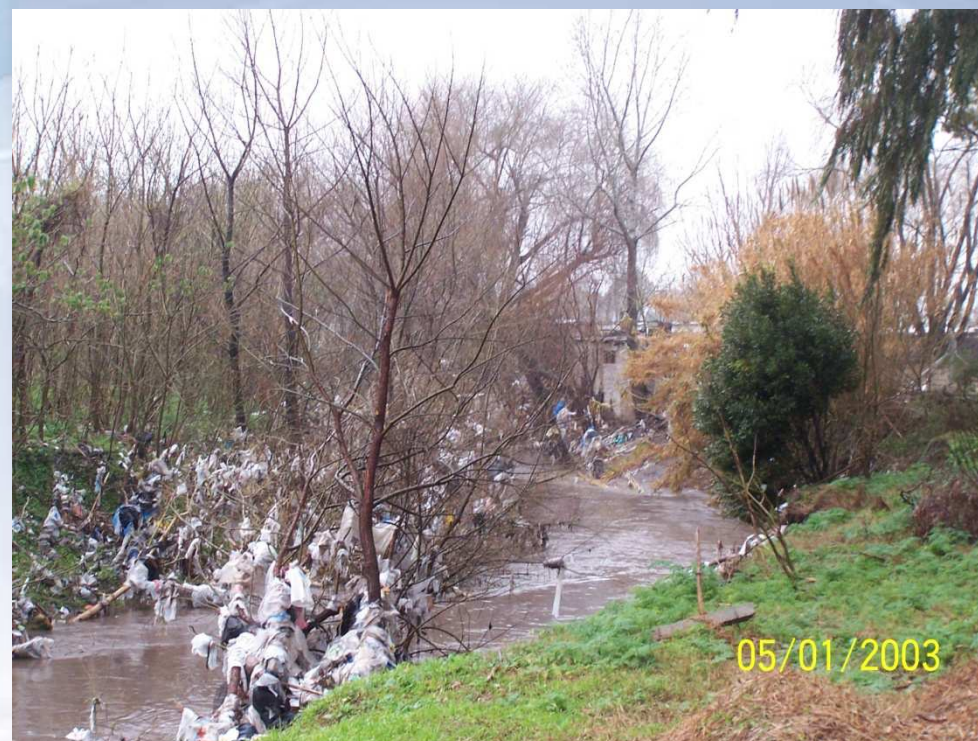
Principales Contaminantes

Compuestos Orgánicos

- Tiene como característica su gran complejidad, debido a la diversidad de compuestos orgánicos existentes y a su gran reactividad. Como contaminante principal se tienen los derivados de petróleo.
- La movilidad de estos compuestos dependerá del tipo de suelo (contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio iónico, etc.) y de las propiedades químicas de los contaminantes (solubilidad en medio acuoso, presión de vapor, etc.).
- Otro factor importante a tener en cuenta es su degradación ya que se pueden producir metabolitos más tóxicos que el producto original.

Principales Contaminantes

Compuestos Orgánicos



Principales Contaminantes

Compuestos Orgánicos



Principales Contaminantes

Compuestos Orgánicos



Principales Contaminantes

Compuestos Orgánicos



Principales Contaminantes

Fertilizantes

- Los principales problemas se centran en el nitrógeno y su acumulación en forma de nitratos (NO_3^-). Los nitratos son en general muy poco retenidos en los suelos y lixiviarán, produciendo contaminación de acuíferos y aguas superficiales. El exceso de nitratos causa eutrofización y toxicidad.
- El fósforo que también forma parte de los fertilizantes, suele ser aporte de cadmio.
- El exceso de abonos orgánicos puede llevar a la salinización de los suelos, inutilizándolos.

Principales Contaminantes

Plaguicidas

- Compuestos de origen sintético, peligrosos por su persistencia y toxicidad, así como su posible bioacumulación (en el mismo organismo) y biomagnificación (cadena trófica).
- Pueden sufrir transformaciones químicas formando metabolitos más tóxicos. Su movilidad dependerá de sus características químicas.
- Se acumulan y transforman fundamentalmente en la materia orgánica de los suelos.

Principales Contaminantes

Plaguicidas



Principales Contaminantes

Acidificación

- Puede ser causada por vertidos industriales, acumulación de residuos, lluvia ácida, fertilizantes amoniacales, entre otros. Los problemas más importantes es la disolución de compuestos insolubles y liberación de metales tóxicos (biodisponibles). También se produce por cambios en las condiciones aerobias, anaerobias del suelo.

Principales Contaminantes

Salinización

- Consiste en la acumulación de sales solubles o fáciles de solubilizar en el suelo, tales como NaCl , Na_2SO_4 , CaCO_3 , MgCO_3 , etc.
- Fenómeno común en regiones áridas, en las que el agua subterránea contiene altas concentraciones de estas sales y la tasa de evaporación es alta. Cuando el nivel freático es alto, se produce un movimiento ascendente del agua salina, que al llegar a la superficie se evapora, dejando las sales en los horizontes del suelo.
- La salinización antropogénica puede deberse a vertido de compuestos industriales, uso excesivo de fertilizantes, uso de aguas de riego con alto contenido salino, al terreno, abuso de explotación del suelo.
- La salinización produce diversos problemas químicos y físicos en el suelo. Entre los químicos se destaca la reducción de la disponibilidad del hierro, fósforo, potasio y de la mayoría de los micronutrientes porque forman fases sólidas insolubles.
- Entre los físicos, la formación de costras que obstruyen los poros reduciendo su permeabilidad (agua y aire).
- El suelo no sólo se vuelve inutilizable para cultivos, sino que además fácilmente erosionable, perdiendo sus diferentes horizontes y dificultando su recuperación.

Tecnologías de Tratamiento

Para elegir el tratamiento más adecuado del suelo contaminado, éste debe estar perfectamente caracterizado.

Es importante disponer de una amplia información sobre los contaminantes, ya sean de carácter orgánico o inorgánico.

Para proceder a la recuperación, existen diferentes sistemas, que se pueden clasificar en dos categorías:

- **Técnicas in situ:** no precisan el retiro del terreno, el tratamiento se realiza en el mismo lugar.
- **Técnicas off site:** precisan el retiro del suelo y su transporte hacia la instalación de tratamiento.

Las principales técnicas de tratamiento existentes actualmente son: tecnologías térmicas, físico químicas y biológicas.

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Térmicas

- Son off site, y consiste en la destrucción de los contaminantes mediante el uso de altas temperaturas, las principales son:
 - Incineración: se suele realizar en hornos rotatorios, consiste en una combustión controlada del suelo en condiciones de exceso de oxígeno y a temperaturas del orden de 870-1200°C, con el fin de evitar formación de otros contaminantes (dioxinas y furanos). Se aplica para contaminantes orgánicos (aceite, petróleos, disolventes, etc). Presenta una gran eficiencia (eliminaciones superiores al 99,99%). Las altas temperaturas destruyen también la materia orgánica natural del suelo, por lo que éste queda biológicamente inerte.
 - Desorción Térmica: es similar a la incineración, salvo que las temperaturas no son tan elevadas (150-600°C), evitando la combustión del contaminante, éstos se desorben del suelo mediante un flujo de aire caliente. Se aplica para contaminantes volátiles o semivolátiles (ej. Disolventes).
 - Tratamiento térmico con rayos infrarrojos: es similar al horno rotatorio de la incineración, salvo que el calentamiento se produce en una unidad calentada por radiación infrarroja.

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Físico Químicas

- **Lavado de suelos:** consiste en la extracción de los contaminantes del suelo mediante el empleo de un medio líquido acuoso (ácido, bases, agentes quelantes como el EDTA, etc.)- La inyección del disolvente acuoso aumenta la solubilidad del contaminante que se va con éste. Puede usarse in situ u off site, y para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Poco efectivo en suelos con alto contenido de arcilla.
- **Extracción in situ mediante vacío y aire:** es una técnica para eliminar compuestos volátiles. Se crea vacío en el suelo mediante bombas, produciendo migración de los compuestos volátiles a la superficie del suelo e introduciendo aire limpio. Muy usada para suelos de estaciones de servicio. Puede provocar contaminación atmosférica. También se puede usar sólo inyección de aire. El flujo debería ser dirigido hacia filtros de carbono para la retención del contaminante.

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Físico Químicas



Restauración de suelo mediante conducción térmica, Isla de St. Paul

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Físico Químicas



Fuente: <http://es.astecinc.com>

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Físico Químicas

- **Solidificación/estabilización:** puede aplicarse tanto in situ como off site. Consiste en la aplicación de un medio de fijación que reduce la movilidad de los contaminantes. Como fijadores se suelen utilizar: cemento, asfaltos, silicatos, polímeros orgánicos, etc. Se utiliza básicamente en contaminación con metales pesados.
- **Vitrificación:** puede realizarse in situ y off site. Se puede considerar como un sistema mixto de tratamiento térmico y de inmovilización. El suelo se funde (1.600-2.000°C) en una matriz silícea vítrea de muy alta durabilidad. Poco eficaz en suelos húmedos.
- **Electromigración:** Se basa en aplicar un campo eléctrico al suelo, los contaminantes migran de cátodo a ánodo. Se utiliza con metales pesado, y se puede aplicar in situ como off site.

Tecnologías de Tratamiento

Tecnologías Biológicas

Técnicas de biodegradación mediante microorganismos, aplicable a compuestos orgánicos (plaguicidas, derivados del petróleo, aceites). Las principales técnicas disponibles son:

- **Landfarming:** Técnica off site basada en la extracción del suelo contaminado y su extensión en espacios abiertos para que sea aireado mediante volteo. Se pueden generar lixiviados.
- **Compostaje:** el suelo contaminado se mezcla con material altamente biodegradable (paja, astillas de madera, etc.) y se procede a su degradación biológica aerobia en condiciones controladas.
- **Biorrestauración o biorremediación in situ:** Consiste en promover la biodegradación de los contaminantes mediante la estimulación de las poblaciones microbianas presentes en el suelo (autóctonas) o externas (alóctonas). La estimulación se consigue mediante la inyección de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y oxígeno por inyección.

Tecnologías de Tratamiento

Cuando la limpieza del suelo es inviable, se puede actuar de forma de limitar los riesgos por contacto. Para ello lo más usual es recubrir la superficie del sitio, lo que se denomina sellado con cemento, asfalto o arcillas. El sellado oficia de barrera y se consigue el confinamiento de los contaminantes en la zona recubierta.



Basel Convention Coordinating Centre
Stockholm Convention Regional Centre
URUGUAY



MVOTMA

Muchas gracias!!

Gabriela Medina

<http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/es>



RED de CENTROS

Convenio de Basilea
Latinoamérica & Caribe

Convenio de Estocolmo

NETWORK of CENTRES

Basel Convention
Latin America & the Caribbean

Stockholm Convention