



MANUAL DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

Proyecto apoyado por







ÍNDICE

CONTENIDOS

Prólogo	11
1 Introducción	13
2 Antecedentes Generales	14
2.1 Responsabilidades Legales Vinculadas con la Remediación	14
2.2 Fundamentos y Objetivos de la Remediación	15
3 La Remediación y su Eficiencia: Principales Factores	17
3.1 Características del Contaminante	19
3.1.1 Estructura Química	19
3.1.2 Concentración	19
3.1.3 Solubilidad	20
3.1.4 Coeficiente de Partición Octanol/Agua (Kow)	20
3.1.5 Polaridad y Carga Iónica	20
3.1.6 Volatilización	20
3.1.7 Densidad	20
3.2 Características del Medio	21
3.2.1 Heterogeneidad del Suelo	21

3.2.2	Densidad Aparente	21
3.2.3	Permeabilidad	21
3.2.4	pH	21
3.2.5	Humedad	22
3.2.6	Composición	22
3.2.7	Condiciones Redox y Contenido de Oxígeno	23
3.2.8	Disponibilidad de Nutrientes	24
3.2.9	Microflora Presente	24
3.3	Interacciones entre Contaminante y Medio	25
3.3.1	Difusión	25
3.3.2	Sorción	25
3.3.3	Biodisponibilidad	25
3.3.4	Toxicidad	26
3.3.5	Biodegradación	27
3.3.6	Formación de Residuos No-Extraíbles (NER)	28
3.3.7	Reacciones Abióticas y Bióticas	29

ÍNDICE

CONTENIDOS

4 Tecnologías de Remediación	31
4.1 Clasificación de Tecnologías de Remediación	33
4.2 Principales Tecnologías de Remediación Según Tipo de Tratamiento	34
4.2.1 Tratamientos Biológicos	36
4.2.2 Tratamientos Físico Químicos	39
4.2.3 Tratamientos Térmicos	45
4.2.4 Tratamientos Mixtos	49
5 Fichas de Tecnologías de Remediación	51
6 Tipos de Remediación Ejecutados en Chile	103
6.1 Excavación, Transporte y Disposición	104
6.2 Fitorremediación	105
6.3 Biorremediación	106
6.4 Electrorremediación	109
7 Referencias Bibliográficas	110

ÍNDICE

TABLAS

TABLA 1	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS CLASIFICADAS SEGÚN EL TIPO DE TRATAMIENTO	34
TABLA 2	PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN, CLASIFICADAS DE ACUERDO AL TIPO DE TRATAMIENTO	35
TABLA 3	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	36
TABLA 4	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS FÍSICO-QUÍMICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	39
TABLA 5	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS TÉRMICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	45
TABLA 6	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS MIXTAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	49
TABLA 7	TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DESCRITAS EN FICHAS DE CONSULTA	53

ÍNDICE

FIGURAS

FIGURA 1	ESQUEMA DE PASOS PREVIOS QUE DAN ORIGEN A UN PLAN DE REMEDIACIÓN	15
-----------------	--	-----------

FIGURA 2	PRINCIPALES FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA REMEDIACIÓN	18
-----------------	--	-----------

FIGURA 3	NIVEL ENERGÉTICO DE ALGUNAS REACCIONES REDOX CLAVES EN BIORREMEDIACIÓN	23
-----------------	--	-----------

FIGURA 4	HIFAS DE HONGOS, ACTÚAN COMO VECTORES DE TRANSPORTE PARA BACTERIAS DEGRADADORAS DE PAHS (EN VERDE)	24
-----------------	--	-----------

FIGURA 5	ESQUEMA DE CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	33
-----------------	---	-----------

FIGURA 6	CONTENIDOS DE FICHAS DE INFORMACIÓN PARA LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN SELECCIONADAS	52
-----------------	---	-----------



PRÓLOGO

Los sitios contaminados, causados principalmente por la actividad humana, representa para la mayoría de los países un desafío ambiental y económico que puede alcanzar importantes proporciones, concitando gran preocupación en naciones desarrolladas en los últimos 20 años, en donde para asegurar el desarrollo sustentable y la competitividad de los sectores productivos se ha desarrollado una batería de herramientas y normativas para su prevención y control.

En nuestro país sin embargo, la gestión de sitios y suelos contaminados está considerada dentro de las políticas públicas, recientemente por los organismos sectoriales. Es así que esta materia ha sido reconocida con la promulgación, en enero del año 2010, de la Ley 20.417, que modifica la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, y que introduce al ordenamiento jurídico, nuevas competencias legales al Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Específicamente, en el artículo 70, letra g, establece que es deber del Ministerio de Medio Ambiente “Proponer políticas y formular normas, planes y programas en materia de residuos y suelos contaminados, así como la evaluación del riesgo de productos químicos, organismos genéticamente modificados y otras sustancias que puedan afectar el medio ambiente”. De esta forma, el MMA adquirió nuevas competencias legales en materia de gestión de suelos, las que vienen a establecer, en un nuevo ámbito, el contenido de la garantía constitucional de vivir en un ambiente libre de contaminación.

Anteriormente, el instrumento que se refirió a este aspecto fue la Política Nacional para la Gestión de Sitios con Presencia de Contaminantes (PNSPC), aprobada por el Consejo Directivo de CONAMA (antecesor del MMA) en agosto del año 2009. En el marco de dicha Política, se inició el desarrollo de algunos instrumentos de gestión, tales como: la evaluación de riesgo ambiental, planes de remediación, entre otros.

Un hito relevante y reciente en esta materia, es la aprobación por parte del MMA de la Resolución Exenta N° 1690 en diciembre de 2011, que aprueba la Metodología para la Identificación y Evaluación Preliminar de Suelos Abandonados con Presencia de Contaminantes. En este documento se define el procedimiento para llevar a cabo las distintas fases que deben ejecutarse cuando se investiga un suelo de este tipo, para ser aplicado en el territorio nacional.

El futuro de Chile seguirá teniendo como componente fundamental, el uso de sus recursos naturales, por lo que, tanto para aumentar la competitividad del sector como para contribuir al desarrollo sustentable del país, es necesario que, tanto el sector público como privado cuenten con las herramientas necesarias para tomar decisiones respecto a la temática de sitios contaminados.

En relación a la temática, nuestra institución ha estado trabajando por más de 10 años en la identificación, evaluación, monitoreo y remediación de Sitios Contaminados, desarrollando proyectos asociados a Evaluación de Riesgos, Remediación Ambiental, Spill Management, Auditoría Ambiental Independiente y Evaluación Ambiental de Riesgos Operacionales.

Este Manual forma parte de las diferentes herramientas que se han desarrollado durante los últimos años por Fundación Chile, las cuales tienen por objetivo estandarizar y apoyar la toma de decisiones de los actores clave en la Gestión de Sitios Contaminados en Chile, contribuyendo finalmente a buscar el equilibrio entre desarrollo industrial, bienestar social y respeto de nuestro entorno.

Juan Ramón Candia
Gerente de Agua & Medio Ambiente
Fundación Chile



1. INTRODUCCIÓN

En el país existen rubros y actividades históricas consideradas como fuentes potencialmente contaminantes, algunas de las cuales han causado daño o presentan riesgos al medio ambiente y a la salud de las personas. Existen casos de contaminación de sitios naturales y urbanos debido principalmente a la mala disposición de materiales peligrosos en terrenos abandonados, áreas industriales, botaderos, vertederos, rellenos sanitarios, así como a fugas de tanques y contenedores subterráneos, fugas de tuberías y ductos, lixiviación de materiales en sitios de almacenamiento, aplicación de agroquímicos y derrames accidentales de sustancias químicas durante su transporte y/o manipulación.

Entre las actividades productivas o fuentes características con potencial de contaminar aguas subterráneas o suelos en Chile se pueden mencionar las siguientes:

- Actividad Agrícola, principalmente en la zona centro sur.
- Actividad Minera, principalmente en el norte y centro del país.
- Actividad Industrial, particularmente en la zona central y sur.
- Actividad Forestal, en la zona sur del país.
- Actividad Petrolera, que incluye las etapas de refinación, almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo en todo el territorio.
- Actividad Gasífera, que incluye las etapas de regasificación, almacenamiento, transporte y distribución.
- La disposición incontrolada de residuos, a lo largo del territorio.
- El almacenamiento, transporte y distribución de sustancias peligrosas, a lo largo del territorio.

En particular, estas fuentes presentan un mayor factor de riesgo cuando se trata de instalaciones antiguas o pequeñas, o bien, aquellas que no han sido sometidas a regulaciones específicas.

Las actividades antes mencionadas tienen el potencial de generar sitios contaminados, que son definidos como lugares delimitados geográficamente en los que mediante una evaluación de riesgo ambiental se ha determinado que existe un nivel de riesgo relevante para las personas o al medio ambiente. Habitualmente dicho nivel de riesgo es llevado a niveles aceptables a través de la implementación de medidas de remediación, lo que constituye una fase importante en la gestión de estos sitios.

El presente Manual constituye un material de consulta sobre alternativas de tecnologías de remediación aplicables a diferentes situaciones de riesgo, y se espera sea una herramienta práctica de ayuda para el desarrollo de los planes de gestión de sitios contaminados en el país.

El Manual se ha estructurado según los siguientes contenidos: en una primera parte se aborda de forma general las responsabilidades legales en Chile vinculadas a la remediación, y los objetivos y fundamentos que rigen las actividades de remediación. Posteriormente se detallan los principales factores que inciden en su aplicación, selección y éxito. Luego se presenta un resumen general de tecnologías de remediación para suelos y aguas, para lo cual se han seleccionado aquellas con mayor posibilidad de aplicación a la realidad nacional, considerando aspectos relativos a sus principios de aplicación, campo de acción, ventajas y desventajas, estimación de costos asociados, esquemas básicos de operación, entre otros aspectos. Finalmente se presentan algunos ejemplos nacionales de proyectos y estudios vinculados con la remediación que se han desarrollado durante los últimos años.

Cabe señalar, que el presente Manual ha sido elaborado en el marco del proyecto Innova Corfo, Desarrollo de Herramientas y Estándares de Calidad para la Identificación, Confirmación y Control de Sitios Contaminados, Aplicación Piloto en la Región de Magallanes y Antártica Chilena: Sector Hidrocarburos N°09CN14-5896, donde el Ministerio de Medio Ambiente participa como entidad mandante y oferente, Fundación Chile como desarrollador, la Universidad de Magallanes como co-desarrollador, y la Seremi del Medio Ambiente Región de Magallanes y la empresa ENAP Magallanes como interesados.

2. ANTECEDENTES

2.1 Responsabilidades Legales Vinculadas con la Remediación

Con la reforma de la institucionalidad ambiental (Ley 20.417), las principales instituciones públicas con responsabilidad en la evaluación y posterior administración de sitios contaminados son: (i) el Ministerio del Medio Ambiente (formular programas de suelos contaminados, y evaluación de riesgo); (ii) el Servicio de Evaluación Ambiental (evaluación de proyectos de saneamiento ambiental); (iii) la Superintendencia de Medio Ambiente (aprobación de planes de reparación, daño ambiental); (iv) el Servicio Nacional de Geología y Minería (faenas mineras, y protección de trabajadores); (v) el Ministerio de Salud (salud pública, reglamento de residuos peligrosos); y (vi) las Municipalidades (nuevas atribuciones en medio ambiente, incluyendo ordenanzas ambientales). Consecuentemente, la gestión ambiental de los sitios tiene un carácter interinstitucional e involucra, además, a los generadores de los daños ambientales involucrados.

En términos normativos, la Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300) en su Título III define un sistema de responsabilidad por daño ambiental, destinado a que, quien cause un daño al medio ambiente, lo repare conforme a la ley.

Para ello, es fundamental determinar la magnitud o extensión del daño causado, de manera de poder exigir al autor del mismo, medidas de reparación que comprendan todos los componentes alterados, con miras a restituir el medio ambiente a una condición similar a la existente antes de producido el daño.

De acuerdo a lo anterior, en materia de responsabilidad civil por daño ambiental, el ordenamiento jurídico contempla la existencia de dos acciones: “la acción indemnizatoria” y “la acción ambiental” lo cual persigue la reparación material del medio ambiente dañado a costa del causante del daño, como acciones compatibles entre sí las cuales pueden deducirse simultánea o sucesivamente.

Mediante la “acción indemnizatoria” puede exigirse el resarcimiento económico de los perjuicios ocasionados por el daño ambiental, tratándose de una acción de índole estrictamente patrimonial. Por su parte la “acción ambiental” puede exigir la reparación del medio ambiente dañado, entendiéndose por “reparación”, a estos efectos, “la acción de reponer el medio ambiente o uno o más de sus componentes a una calidad similar a la que tenía con anterioridad al daño causado, o en caso de no ser ello posible, restablecer sus propiedades básicas”.

Para el caso que no existe responsable del daño o deterioro, la Ley de Bases Sobre el Medio Ambiente no establece explícitamente, mecanismos para controlar, sanear o recuperar áreas con presencia de contaminantes o de deterioro y pérdida de patrimonio ambiental.

A pesar de lo anterior, y en el marco de las nuevas atribuciones que le confiere la nueva institucionalidad ambiental, el Estado ha definido instrumentos adecuados que permitan realizar una gestión costo eficiente.

Cabe señalar que en Chile, a pesar que la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente establece en su artículo 39 que “La ley velará porque el uso del suelo se haga en forma racional, a fin de evitar su pérdida y degradación”, a la fecha no se ha dictado una ley que regule este recurso natural, a objeto de propender a su conservación y remediación, en caso de producirse su deterioro por la contaminación derivada de actividades contaminantes.

Un instrumento de gestión que el Ministerio del Medio Ambiente y el de Salud han estado trabajando es la evaluación del riesgo, que consiste en un proceso que tiene como objetivo asignar magnitudes y probabilidades a los efectos adversos de la contaminación. En consecuencia, es un instrumento que puede utilizarse para definir si un sitio contaminado merece ser intervenido ambientalmente, dado que permite establecer si el grado de contaminación presente en un sitio genera efectos nocivos. Entre mayor sea el riesgo de que la contaminación afecte a los seres vivos (humanos y biota), mayor será la necesidad de instrumentar programas de restauración.

Respecto a los proyectos de remediación que se han desarrollado en Chile, gran parte de éstos se han ejecutado en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Desde la entrada en vigencia del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA, D.S. N° 95/2001 del MINSEGPRES), los nuevos proyectos o modificaciones deben someterse a una evaluación de sus impactos, incluyendo la descripción de la etapa de cierre de los proyectos, así como los planes de seguimiento ambiental y de emergencia. En particular, los proyectos de saneamiento ambiental que comprenden la reparación o recuperación de terrenos contaminados mayores a 1 Há son evaluados sobre la base del documento guía de apoyo elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente.

2.2 Fundamentos y Objetivos de la Remediación

El objetivo final de la gestión de sitios contaminados es remediar aquellos sitios que presenten un riesgo significativo a la salud de las personas o el bien que se desea proteger. Las medidas de remediación y las tecnologías de tratamiento a aplicar dependerán de los riesgos para la salud y el medio ambiente detectados, así como de los usos futuros que se asignen a las áreas que se espera recuperar.

Es importante tener en cuenta que el término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante, a través de acciones químicas, físicas o biológicas, de manera que reduzca la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001).

La evaluación del riesgo proporciona la información para establecer objetivos y prioridades en los planes de remediación, siendo estos particulares para cada caso. Estos planes deben elaborarse sobre la base de la implementación de medidas de control costo eficientes.

Entonces, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, para reducir el riesgo de un sitio específico será necesario contar con un instrumento que permita abordar la problemática mediante la implementación de medidas específicas y sobre la base de un objetivo de remediación establecido.

Una vez tomada la decisión de implementar acciones de remediación se debe proceder a definir los objetivos de dicha tarea, en base a los tres eslabones básicos necesarios para que se manifieste un riesgo: la(s) fuente(s) de contaminación, vía(s) de exposición y los receptores expuestos. De acuerdo a este enfoque, la remediación se puede llevar a cabo para cumplir con los siguientes objetivos:

a) Eliminar la fuente de contaminación: Consiste en eliminar o reducir la concentración (biodisponibilidad) de las sustancias peligrosas existentes en un medio hasta niveles que permitan concluir que no constituirán riesgo.

b) Cortar la ruta de interacción: Consiste en impedir la interacción entre los receptores con la fuente a través de la confinación de los contaminantes a una matriz, para impedir que éstos se movilicen y lleguen a los receptores.

En la Figura 1 se esquematiza un resumen de los pasos que dan origen a un proceso de remediación.

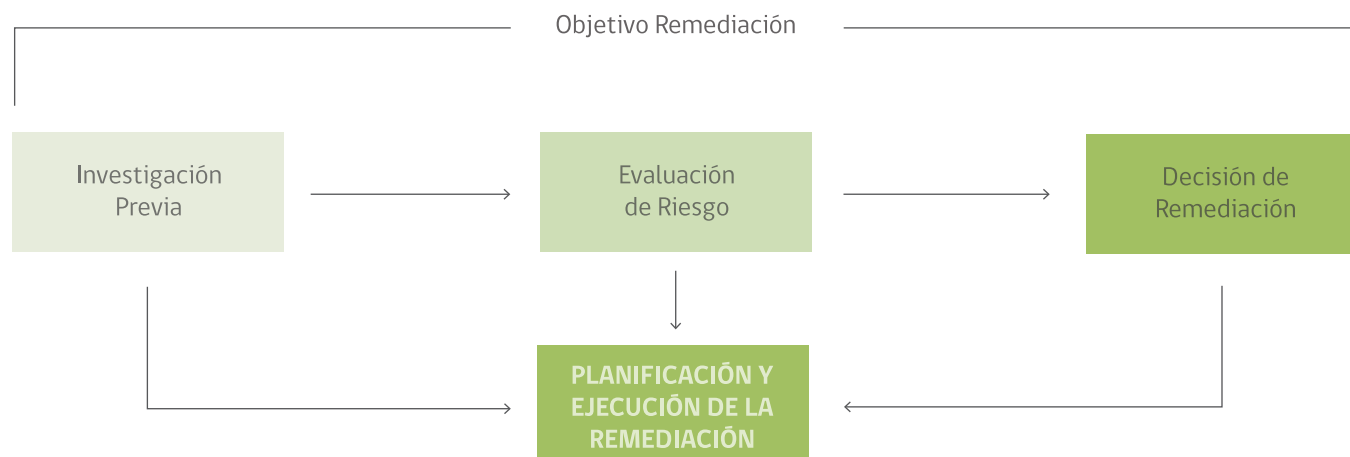


FIGURA 1 Esquema de pasos previos que dan origen a un plan de remediación.

3. LA REMEDIACIÓN Y SU EFICIENCIA: PRINCIPALES FACTORES



3. LA REMEDIACIÓN Y SU EFICIENCIA: PRINCIPALES FACTORES

Los principales factores que inciden en la eficiencia de un proceso de remediación de contaminantes son: el tipo de contaminante, las características del medio (condiciones geológicas y químicas) y tipo de interacciones existentes en el medio (Ver Figura 2).

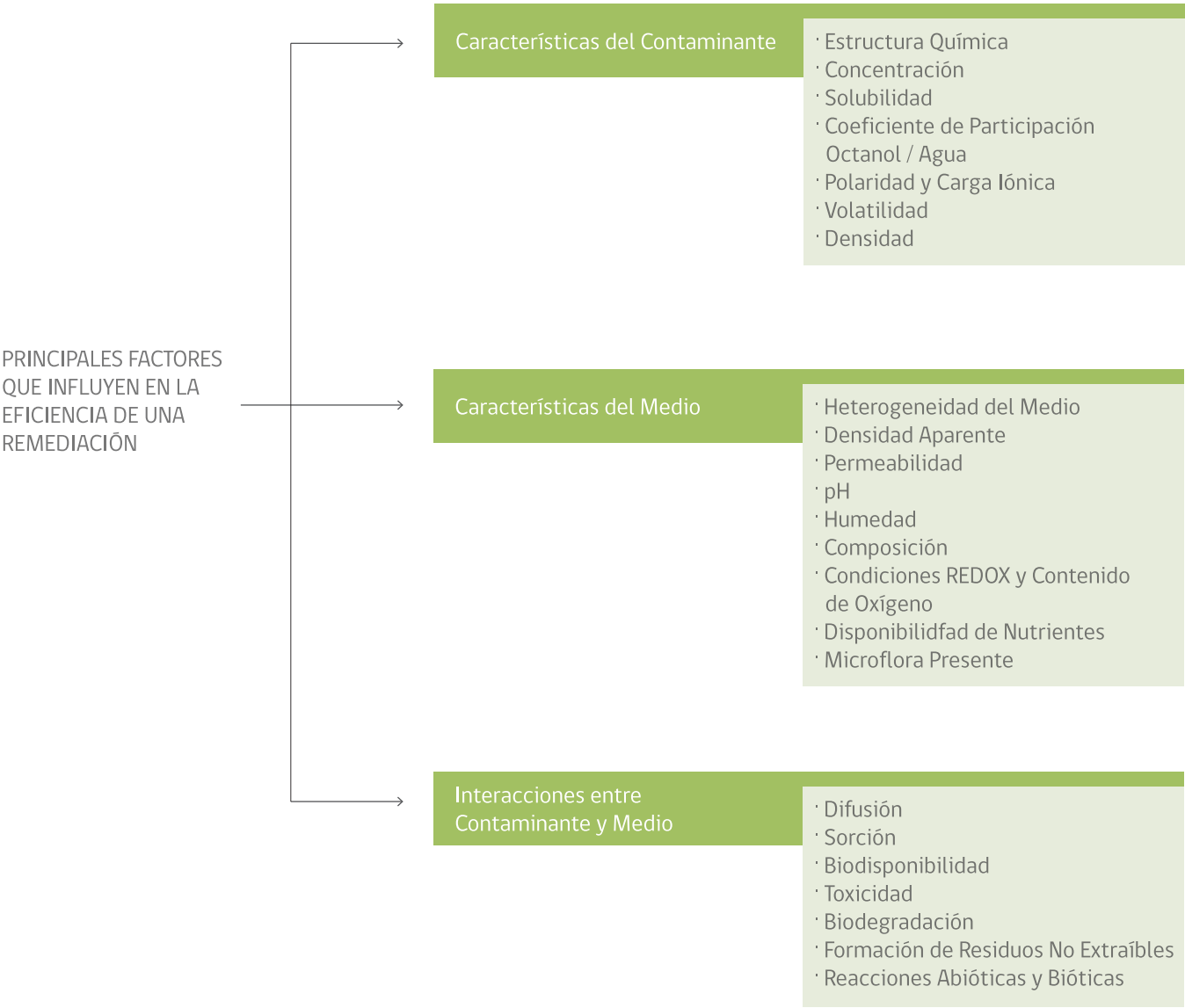


FIGURA 2 Principales factores que inciden en la eficiencia de una remediación.

A continuación se describen cada uno de los componentes de estos factores.

3.1 Características del Contaminante

3.1.1 Estructura Química

Cada compuesto químico posee características únicas que controlan su movilidad y degradación. Independiente de la naturaleza del contaminante, su estructura química determina su polaridad, solubilidad, volatilidad y capacidad para reaccionar con otras sustancias. Algunos compuestos son altamente resistentes a la transformación, mientras que otros son completamente química o bioquímicamente reactivos (Alexander, 1994; Eweis y col., 1998; Sellers, 1999).

La estructura química de un compuesto determinará sus interacciones con el medio. Por ejemplo, la hidrofobicidad (repelencia al agua) de un compuesto está asociada a la persistencia de este en el ambiente, por lo tanto, mientras más hidrofóbico es un compuesto, menos biodisponible estará.

En cuanto a la biodegradación, no todas las estructuras o grupos químicos funcionales son susceptibles a ella. Por ejemplo, la presencia de un halógeno (F, Cl entre otros) o un grupo nitrógeno (NO_2), en un grupo sulfo (SO_3H) o en un compuesto, disminuye la susceptibilidad de este a ser biodegradado.

Igualmente, la posición del sustituyente en la molécula será de gran importancia. Mientras mayor es la complejidad de una molécula menor será su potencial de biodegradación. La ramificación de hidrocarburos disminuye su potencial de biodegradación.

3.1.2 Concentración

La concentración de un compuesto es un factor de gran importancia para definir si la remediación puede efectuarse a través del uso de tecnologías biológicas, o si es necesario utilizar tecnologías fisicoquímicas o térmicas. Por ejemplo, compuestos tolerados a bajas concentraciones por muchos microorganismos, pueden ser tóxicos a concentraciones mayores (Alexander, 1994).

En caso de que las concentraciones sean demasiado altas, los contaminantes podrán ejercer plenamente sus efectos tóxicos en los microorganismos, obstaculizando así su degradación. En caso de concentraciones demasiado bajas, las enzimas de degradación no serán inducidas. Por otra parte, las bacterias normalmente tenderán a utilizar primero el sustrato más fácilmente biodegradable y sólo cuando este se haya agotado, se inducirá la producción de enzimas para degradar sustratos de mayor complejidad (diauxia).



3.1.3 Solubilidad

Es la cantidad de un compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida. En general, la solubilidad disminuye al aumentar el tamaño de la molécula y los compuestos polares son más solubles que los no polares.

Por otra parte, para que la transformación biológica de un compuesto se lleve a cabo, es necesario que este se encuentre en solución, por lo tanto la biodegradación y persistencia de un compuesto depende de su solubilidad (Alexander, 1994; Eweis y col., 1998; Sellers, 1999). Normalmente la biodegradación tiene lugar en fase acuosa, donde la transferencia de masa entre un compuesto y un microorganismo no se ve limitada (Alexander, 1994). Asimismo, la solubilidad afectará directamente la sorción y el potencial de migración de un compuesto.

3.1.4 Coeficiente de Partición Octanol/Agua (Kow)

Es la relación entre la concentración de un compuesto en una fase de octanol y una fase acuosa en un sistema octanol/agua. En otras palabras, el Kow es una medida de la tendencia de un compuesto para separarse entre una fase orgánica y una acuosa. Está determinado por la estructura del compuesto e indica su capacidad de adsorción o su potencial de bioconcentración o bioacumulación en tejidos grasos. Este coeficiente entrega una medición de la hidrofobicidad de un compuesto, a mayor coeficiente, mayor hidrofobicidad.

De acuerdo a lo anterior, este coeficiente está directamente relacionado con la solubilidad, movilidad, potencial de metabolización y biodegradación. Un valor bajo de Kow (<10) indica probable movilidad y transporte de ese material debido a su alta solubilidad, fácil metabolización y biodegradación. Un valor alto de Kow (>104) indica posible adsorción en tejidos grasos, suelo (materia orgánica) y sedimentos y, por ende, poca movilidad. Por tanto, es probable que este compuesto tienda a bioacumularse y podría generar toxicidad.

3.1.5 Polaridad y Carga Iónica

La polaridad es uno de los determinantes de la solubilidad de un compuesto. A mayor polaridad, mayor solubilidad en agua y por ende, mayor potencial de migración. Compuestos apolares tienden a absorberse o a adsorberse en la materia orgánica del suelo (Khan, 1987; Pignatello, 1989; Gevaio et al., 2000).

Por otra parte, la carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido. Compuestos con carga positiva se adsorben normalmente a los minerales de la arcilla.

3.1.6 Volatilización

Es el proceso en el que un compuesto se moviliza desde una fase líquida o sólida a una gaseosa. La volatilidad de un compuesto es una función de su concentración, su presión de vapor y su solubilidad. En el suelo, esta depende del tipo de compuesto, de la temperatura, el contenido de humedad, de la porosidad del suelo, del contenido de materia orgánica y arcillas (Eweis y col., 1998). En remediación, la volatilización de contaminantes puede ser promovida y utilizada como estrategia de remediación.

3.1.7 Densidad

La densidad determina la tendencia de un contaminante de baja solubilidad a flotar o sumergirse y por consiguiente el lugar en donde este quedará concentrado (Bouwer y Zehnder, 1993).

3.2 Características del Medio

3.2.1 Heterogeneidad del Suelo

Los suelos son cuerpos naturales, cuya complejidad intrínseca deriva de su naturaleza como un conjunto de componentes sólidos, líquidos, gaseosos, orgánicos, inorgánicos y biológicos.

En términos de remediación, un suelo demasiado heterogéneo puede conllevar a una descontaminación ineficiente al utilizar tecnologías *In Situ* que dependen del flujo de un fluido. Pueden crearse canales de fluidos no deseados en las capas arenosas y arcillosas, perjudicando así el tratamiento (Van Deuren y col., 1997). Además, la heterogeneidad del suelo conlleva a una distribución también heterogénea de la contaminación, así como de la microbiota degradadora, generando parches de alta concentraciones del contaminante y zonas en donde no se encuentran potenciales microorganismos degradadores.

3.2.2 Densidad Aparente

Esta corresponde al peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo el agua y la fase gaseosa. Es importante considerar que el suelo se compone de sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su contenido de agua o humedad. Este parámetro es de gran utilidad a la hora de realizar cálculos de transporte del material o sustancias (Van Deuren y col., 1997).

3.2.3 Permeabilidad

En la remediación de aguas subterráneas y suelos, además de las condiciones fisicoquímicas y biológicas del medio, los parámetros mecánicos del suelo y las características hidrogeológicas del sitio juegan un papel muy importante en el proceso.

Debido a que el transporte de sustancias (nutrientes, contaminantes) representa uno de los procesos dominantes en remediación, se podría desear una alta o baja permeabilidad neumática y/o hidráulica dependiendo del caso. Por ejemplo, en el caso de una contaminación de suelo con metales pesa-

dos, no sería conveniente que la permeabilidad del suelo fuera alta, ya que esto permitiría que los metales pesados migren hacia las aguas subterráneas contaminando también la napa y aumentando así el riesgo asociado a la contaminación. Contrariamente, en el caso de querer implementar un sistema de remediación de un acuífero por bombeo, se desearía una alta permeabilidad del suelo ($> 10^{-4}$ m/s).

El estudio de la estructura y textura del suelo puede entregar los primeros indicios sobre la permeabilidad de un sitio. Adicionalmente, existen técnicas que determinan la permeabilidad, como:

a) Permeabilidad Neumática: Técnica de radón.

b) Permeabilidad Hidráulica: Ensayos de bombeo.

c) Desviaciones verticales de la permeabilidad hidráulica: Mediciones de flujo.

3.2.4 pH

Los procesos de degradación bacteriana ocurren preferiblemente a un rango de pH aproximados entre 6 y 8. En el caso de biodegradación con hongos, un pH de aproximadamente 5 es el más adecuado.

Por otra parte, el pH del medio, dependiendo de las características de los contaminantes, podrá afectar significativamente la movilidad de estos, permitiendo, por ejemplo, su infiltración desde el suelo a las napas subterráneas o en caso contrario su inmovilización. La movilidad de los contaminantes es un aspecto crítico en el destino y persistencia de éstos en el ambiente.



3.2.5 Humedad

Por razones obvias, este parámetro aplica solo para el caso de suelos. Normalmente el contenido óptimo de agua para reacciones de degradación en la zona insaturada del suelo estará entre 40 y 60% de la capacidad de retención de agua del suelo. En suelos más secos, las velocidades de degradación serán menores. En suelos más húmedos, se formarán zonas parciales saturadas de agua (microcompartimentos) donde el suministro de oxígeno será menor y, por lo tanto, la tasa de degradación también disminuirá.



3.2.6 Composición

La composición del medio (suelo, sedimento o acuoso) afectará directamente la eficiencia de un proceso de remediación.

La fase sólida del suelo está compuesta aproximadamente en un 95% por material inorgánico y solo entre 1 y 5% corresponde a materia orgánica. La materia inorgánica puede dividirse según el tamaño de las partículas que la componen en arena, limo y arcilla. La proporción relativa de cada una de estas partículas determina la textura del suelo e igualmente las propiedades físicas y químicas del suelo.

La arcilla se compone principalmente de silicatos, óxidos de metal, carbonatos y sulfatos de calcio. Las partículas arcillosas poseen una gran superficie reactiva y llevan asociada una carga eléctrica. De lo anterior, surge el concepto de capacidad de intercambio iónico (o más específicamente) catiónico (CEC), que está determinado por las cargas negativas asociadas a las partículas de arcilla, siendo éstas fundamentales en las interacciones con compuestos ionizables.

La materia orgánica se puede definir como la porción no-viva de la fracción orgánica de un medio (suelo, sedimentos, agua). Aún cuando la materia orgánica es una pequeña parte de la fase sólida que compone el medio, es de gran importancia en la definición de las propiedades fisicoquímicas y superficiales del medio. Debido a sus propiedades hidrofóbicas, la materia orgánica gobierna la interacción del medio con compuestos no ionizables. Principalmente, se encuentran grupos funcionales como COOH , OH , NH_2 que pueden interactuar con ácidos carboxílicos, aminas, amidas, fenoles, quinonas, éteres, esterres, entre otros.

De lo anterior, se desprende que la composición de un suelo (agua y sedimento) afectará directamente la sorción de contaminantes a las partículas del medio y, por ende, su comportamiento y destino ambiental. Asimismo, algunos procesos de degradación abiótica pueden ser catalizados por la superficie de la fase sólida del medio. Por ejemplo óxidos de metal y/o superficies arcillosas pueden catalizar numerosas transformaciones, tales como hidrólisis, reacciones redox y polimerizaciones. De la misma forma, la materia orgánica, debido a la presencia de numerosos grupos reactivos, a su fuerte capacidad reductora y a la presencia de radicales libres moderadamente estables, puede catalizar transformaciones abióticas de contaminantes (e.g. hidrólisis, solubilización y fotodegradación).

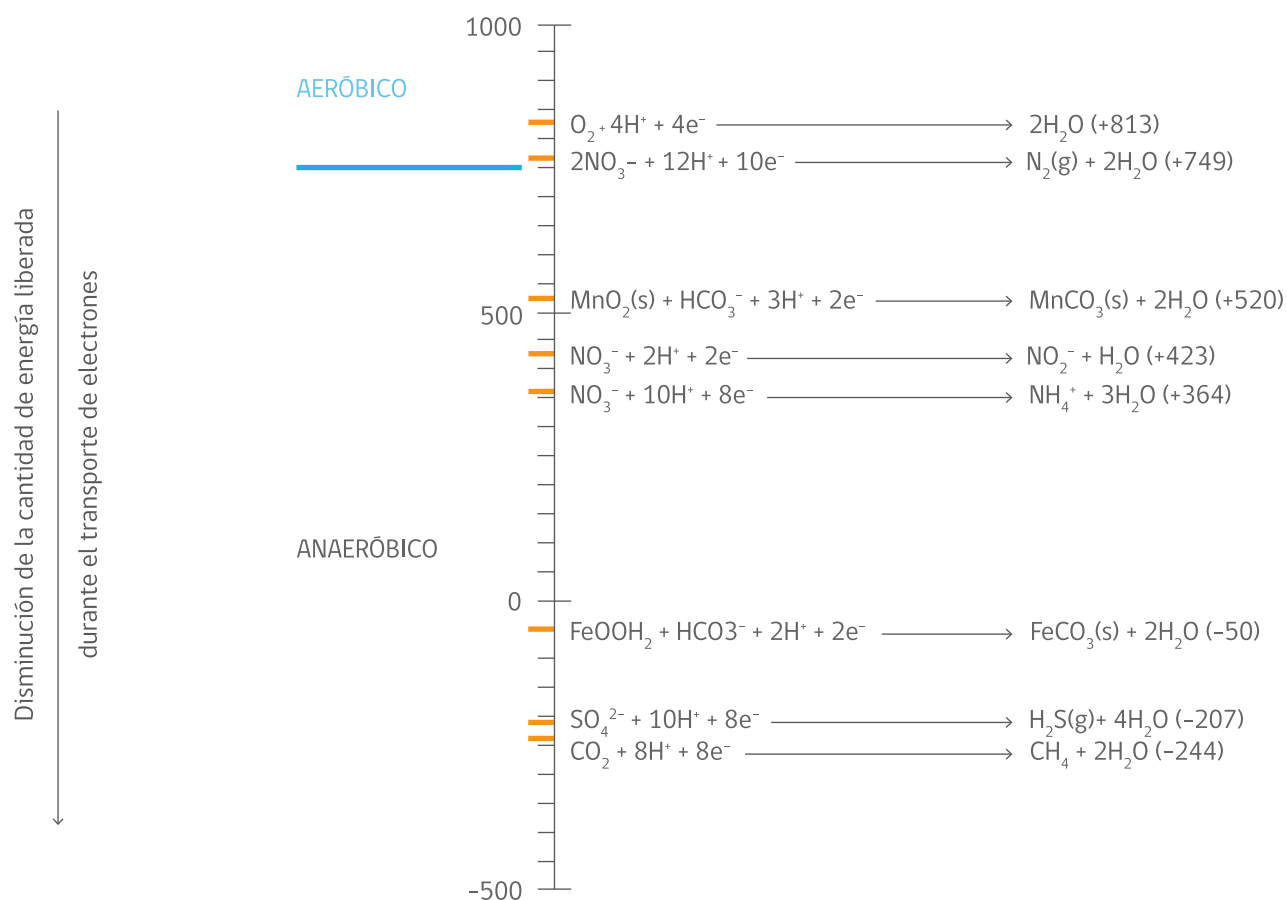
3.2.7 Condiciones Redox y Contenido de Oxígeno

Estos parámetros determinan condiciones oxidantes o reductoras del medio contaminado. A partir de estos parámetros se puede vislumbrar si las condiciones apropiadas están dadas o si se podrían alcanzar para el desarrollo del proceso de biorremediación.

Estas llamadas condiciones apropiadas dependen del tipo de degradación requerida (reacciones oxidativas o reductoras). A modo de ejemplo, ciertos hidrocarburos sólo se degradarán rápidamente en condiciones aeróbicas y otros comenzarán a degradarse una vez que se hayan alcanzado condiciones reductoras en el medio, es decir, cuando el oxígeno se haya agotado producto de la degradación del primer compuesto.

Como regla, sólo si el proceso redox marcado por un mayor nivel de energía ya no puede continuar porque el aceptor respectivo se ha consumido, el proceso redox siguiente se iniciará. Esta secuencia estará acompañada por una disminución del potencial redox. En otras palabras, a medida que el nivel de energía de un proceso disminuye (tendiendo a potenciales reductores), la tasa de crecimiento de los microorganismos y por lo tanto, la degradación se hará más lenta.

En la Figura 3, se presenta el nivel energético clave de algunas reacciones redox.



Fuente Wiedemejer et al.1999

FIGURA 3 Nivel energético de algunas reacciones redox claves en biorremediación.

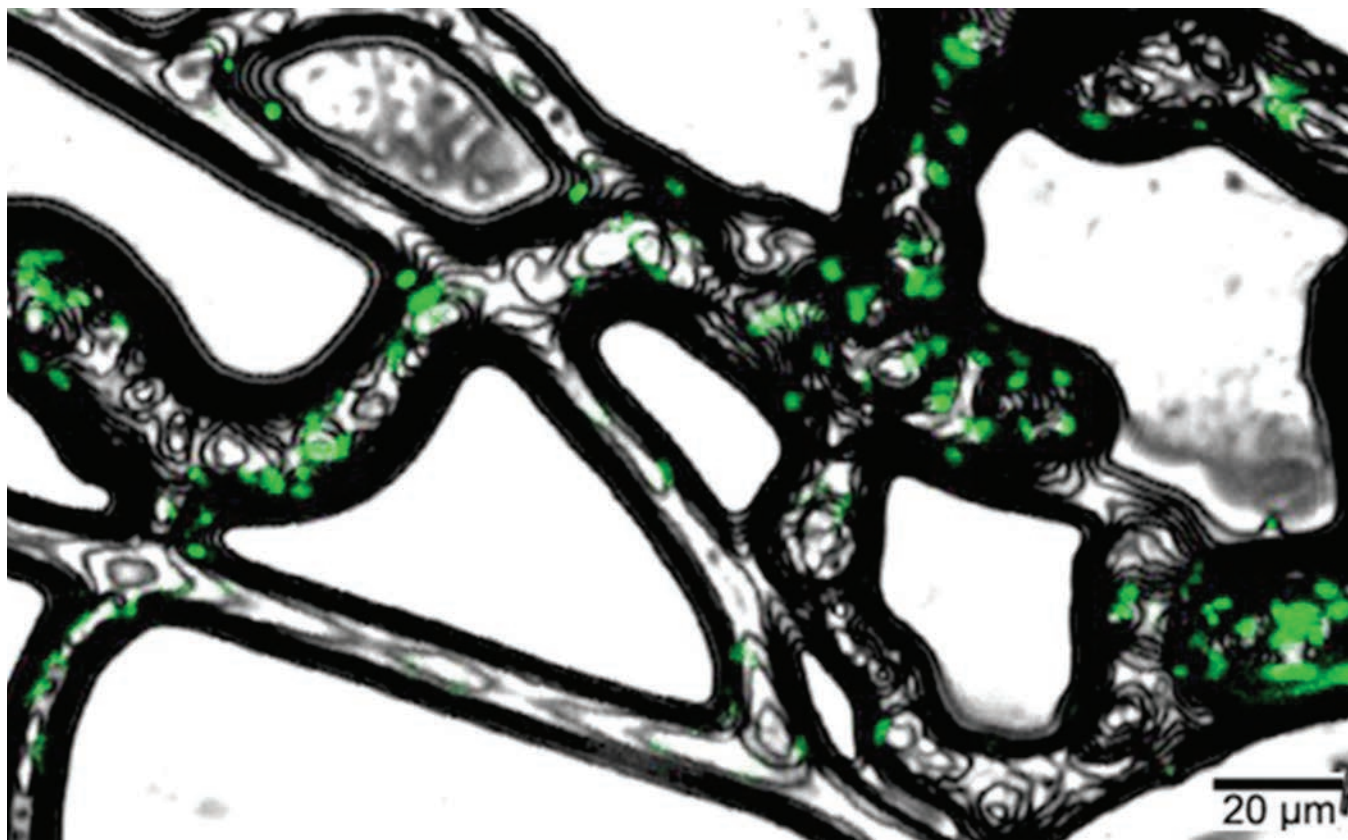
3.2.8 Disponibilidad de Nutrientes

En una situación de carencia de nutrientes (dadores y aceptores de electrones y sales nutrientes), la degradación del contaminante estará limitada por lo tanto, para posibilitar o acelerar el proceso de degradación, será necesario agregar nutrientes. Principalmente, serán nitrógeno y compuestos fosforados (macronutrientes) porque los micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, Mo) se encuentran frecuentemente disponibles en cantidades suficientes en suelos y aguas subterráneas.

3.2.9 Microflora Presente

Bacterias y hongos son los principales responsables de las transformaciones bioquímicas en el medio ambiente por lo tanto, tienen un papel crucial en el destino y la mitigación de los numerosos contaminantes (Pepper et al. 1996). La interacción de estos organismos, facilitan los procesos de biodegradación de contaminantes en el suelo.

Por ejemplo, bacterias del suelo pueden movilizarse a través de la red de hongos facilitando el acceso de las bacterias a los contaminantes (Figura 4) (Furuno et al. 2010). Por lo tanto, la estimulación específica de hongos autóctonos puede ser un método prometedor para movilizar bacterias degradadoras de contaminantes y así mejorar la biorremediación de suelos *In Situ*.



Fuente: Furuno et al., 2010

FIGURA 4 Hifas de hongos, actúan como vectores de transporte para bacterias degradadoras de PAHs (en verde)

3.3 Interacciones entre Contaminante y Medio

3.3.1 Difusión

La difusión es el mecanismo de transporte más importante en zonas de baja permeabilidad tales como capas de limo y arcilla, agregados porosos o partículas, así como en la transferencia de masa en la interface entre el aire del suelo y el agua subterránea y entre fases líquidas no acuosas y el agua subterránea o el aire del suelo.

La difusión de un contaminante, así como también la de nutrientes hacia dentro y fuera de los poros del suelo, controlará la degradación del contaminante. La difusión es uno de los procesos abióticos que compite más efectivamente con los microorganismos por el sustrato (Alexander, 1994). Una vez en el subsuelo, el movimiento de un contaminante es proporcional a su concentración y su coeficiente de difusión.

3.3.2 Sorción

La sorción de un compuesto, o mejor dicho, la adsorción, es el proceso de adhesión de un compuesto a la superficie de una partícula (ejemplo: suelo o sedimento). Numerosos mecanismos como la transferencia de carga, la formación de enlaces iónicos y de hidrógeno, el intercambio de ligandos (iones o moléculas que rodean a un metal), las fuerzas de Van der Waals¹ y la interacción hidrofóbica, son responsables de la adsorción de un contaminante a una partícula (Khan, 1987; Pignatello, 1989; Gevaio et al., 2000). El grado de adsorción en el equilibrio se cuantifica por el coeficiente de adsorción (Kd).

En consecuencia, propiedades de los contaminantes como solubilidad en agua, presión de vapor, tamaño molecular, Kow, y la carga de la molécula; afectan en gran medida la sorción. Por otra parte, las tasas de adsorción también se ven afectadas por las propiedades del medio como el contenido de materia orgánica, el pH, la humedad, la presencia de óxidos metálicos hidratados, minerales de arcilla, y el coeficiente de intercambio iónico (Katayama et al., 2010).

3.3.3 Biodisponibilidad

Los contaminantes en el suelo o en sedimentos no podrán ser biodegradados a menos que se encuentren biodisponibles. La biodisponibilidad se puede definir como "la cantidad de un compuesto químico que puede ser tomado o utilizado por un(los) organismo(s) en un tiempo y medio ambiente definidos" (Katayama et al., 2010). Químicos disueltos o vaporizados suelen estar completamente biodisponibles, sin embargo, si un químico está en contacto con sedimentos o material particulado, su biodisponibilidad puede verse disminuida.

La biodisponibilidad se ve afectada por numerosos factores, tales como las propiedades de los compuestos y de los suelos, la sorción, el tiempo de envejecimiento en el suelo, la formación de NER, el clima y el organismo de interés (Katayama et al., 2010). Esta es el resultado de una serie de procesos dinámicos incluyendo sorción/desorción, disolución, difusión, dispersión, convección, y consumo. No obstante, la interacción más significativa entre suelos y químicos que afecta la biodisponibilidad es la sorción, seguida por la formación de residuos no extraíbles. Por lo tanto, la biodisponibilidad de un compuesto puede verse reducida si el compuesto está adsorbido a partículas de suelo, atrapado en la matriz de suelo, o disuelto en un solvente no-acuoso. (Hatzinger and Kelsey, 2005). Asimismo, dado que los compuestos generalmente tienen que estar en una fase acuosa para ser biodegradados, la sorción a menudo aumenta la resistencia de los contaminantes al ataque microbiano.

El envejecimiento de compuestos en el suelo se refiere a la disminución de la biodisponibilidad debida a una contaminación prolongada (aumento del tiempo de contacto entre el químico y el suelo) del suelo y es también el resultado de reacciones químicas y de la lenta difusión química del contaminante dentro del microporo del suelo (Pignatello and Xing, 1996; Dec and Bollag, 1997; Katayama et al., 2010). Por lo tanto, este se refiere a un fenómeno lento de secuestro en comparación con la adsorción, que es un proceso de corto plazo y reversible (Gevaio et al., 2000). El envejecimiento de contaminantes hace menos disponibles los contaminantes para que puedan ser consumidos por organismos, menos probable que los contaminantes puedan ejercer su efecto tóxico, menos susceptibles los contaminantes a la biodegradación y contribuye a la irreversibilidad del proceso de ligación.

La adición de surfactantes (sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases) permite en algunos casos aumentar la biodisponibilidad de los contaminantes.

1 Fuerza atractiva o repulsiva entre moléculas (o entre partes de una misma molécula) distintas entre sí, debido al enlace covalente o a la interacción electrostática de iones con otros o con moléculas neutras



3.3.4 Toxicidad

La toxicidad de un compuesto está determinada por la exposición de un organismo a un compuesto químico y en dosis-dependiente. La toxicidad disminuye las reacciones metabólicas y con frecuencia impide el crecimiento de la nueva biomasa necesaria para estimular la rápida eliminación de contaminantes. Una alta toxicidad es resultado de una transferencia de masa más rápida que la capacidad de los mecanismos de eliminación.

Asimismo, la toxicidad es especie-dependiente, es decir, una molécula que es tóxica para un organismo puede que no lo sea para otro ya que dispone de mecanismos de destoxificación o incluso que posee enzimas que le permiten degradarlo. Normalmente, y debido a una mayor biodisponibilidad, la toxicidad de un compuesto es mayor en agua que en suelo.

En suelo, la limitada transferencia de masa del compuesto tóxico permite a los mecanismos de destoxificación competir con la transferencia de masa y eliminar, en cierta medida, el tóxico de la célula, viéndose reducida la toxicidad del compuesto.

La ecotoxicidad de un compuesto químico está determinada por su biodisponibilidad y toxicocinética y, por ende, ambos tienen que tenerse en cuenta en el contexto de la evaluación del riesgo de un compuesto. Esta afectará directamente en la potencialidad de que un compuesto sea abatido por biodegradación.



3.3.5 Biodegradación

Generalmente bacterias y hongos son los principales motores de transformación bioquímica en el suelo y tienen un papel crucial tanto en el destino como en la mitigación de muchos contaminantes (Pepper et al., 1996). Estos microorganismos biodegradan de preferencia compuestos de similares características moleculares a las moléculas naturales.

A. En Sistemas Acuáticos

Debido a la alta biodisponibilidad de los compuestos en este medio, la transferencia de masa del compuesto a la célula o bacteria no se ve significativamente restringida. Por lo tanto, si los factores abióticos necesarios (temperatura, O_2 , pH, actividad del agua, salinidad y nutrientes) no son limitantes, la biodegradación dependerá principalmente de la presencia de los microorganismos degradadores, de la concentración del compuesto y su toxicidad (Katayama et al., 2010).

B. En Sedimentos o Suelos

Como se mencionó anteriormente, muchos factores abióticos controlan la degradación microbiana de contaminantes. Sin embargo, el nivel de humedad o mejor definido, la actividad del agua del suelo o sedimento es de especial importancia en estos compartimentos. La actividad del agua puede variar de 0,0 hasta 0,99 en los suelos, en contraste con los sistemas acuáticos, en los que tiene un valor estable de 0,98. A medida que el contenido de humedad (o actividad del agua) disminuye, se registra un incremento en la duración de la Fase Lag² (o Fase de retraso), una significativa disminución de la actividad metabólica microbiana, una reducción en la tasa específica de crecimiento y en el tamaño máximo de la comunidad, lo que finalmente implica una reducción en la tasa de biodegradación de los contaminantes (Orchard and Cook, 1983).

La actividad microbiana en suelos está también directamente relacionada con la actividad enzimática. Las enzimas en el suelo no sólo dependen de la biomasa microbiana, ya que a menudo se encuentran atrapadas en coloides orgánicos e inorgánicos del suelo (enzimas extracelulares) (Paul y Clark, 1989). Las enzimas extracelulares son excretadas fuera de la célula para degradar sustratos (es decir, contaminantes) de alto peso molecular. Mediante su actividad, los microorganismos controlan la disponibilidad y el reciclaje de nutrientes tales como Carbono, Nitrógeno, Azufre y Fósforo.

Estudios realizados en las últimas décadas revelaron que los productos químicos en el suelo no están completamente biodisponibles (Alexander, 1995; Geva et al, 2003) debido a que generalmente la sorción y envejecimiento del contaminante reduce su biodisponibilidad. Por lo tanto, su biodegradabilidad y toxicidad se verán normalmente disminuidas en esta matriz (Katayama et al., 2010).

² Corresponde al período de tiempo el que el inoculo se adapta a las condiciones del medio fresco sobre el que se ha sembrado.



3.3.6 Formación de Residuos No-Extraíbles (NER)

Los residuos no extraíbles (a veces conocidos como residuos ligados) en los suelos, se definen, según la IUPAC (Applied Chemistry Division, Commission on Pesticide Chemistry of the International Union of Pure and Applied Chemistry), como productos químicos que no pueden ser extraídos de la matriz donde se encuentran por métodos que no produzcan una alteración de la naturaleza química de estos residuos.

En general, la formación de los NER puede derivar del compuesto de origen, de los metabolitos, de la biomasa (residuos biogénicos) y/o de la fijación de CO_2 (Capriel et al, 1985; Kastner et al, 1999; Berns et al, 2005; Miltner et al, 2005; Jablonowski et al, 2009; Miltner et al, 2009).

Los factores que rigen la formación de los NER son:

- a) Las propiedades moleculares del compuesto.
- b) El aumento de peso del compuesto molecular, del K_{ow} y del coeficiente de partición carbono orgánico del suelo-agua o K_{oc} (Northcott y Jones, 2001).
- c) Las propiedades del suelo, como el contenido de agua en el suelo, la temperatura, el pH, la actividad biológica del suelo y la cantidad de materia orgánica del suelo.

La formación de NER se considera normalmente como un proceso que contribuye a la disipación de los contaminantes, disminuyendo la movilidad y la biodisponibilidad del contaminante en el suelo.

La disminución de la biodisponibilidad implica tanto un aumento en la persistencia del compuesto (Barriouso et al., 2008) como a la vez, una baja de su toxicidad (Girardi et al. 2011).

Sin embargo, bajo ciertas condiciones, estos residuos pueden ser removilizados. La liberación de NER puede ser importante porque al estar nuevamente biodisponibles pueden tener implicaciones ecotoxicológicas y también migrar hacia las aguas subterráneas. La liberación de NER puede ser, por ejemplo, consecuencia de reacciones fisicoquímicas y microbianas, o de la actividad de lombrices (Barriouso et al., 2008). En consecuencia, es de gran importancia considerar la formación de NER al evaluar el riesgo y la remediación de una contaminación y de remediación de suelos y/o aguas subterráneas.

3.3.7 Reacciones Abióticas y Bióticas

En el ambiente, los contaminantes son sometidos a procesos de degradación, tanto bióticos como abióticos. La contribución de las reacciones abióticas en la transformación de compuestos químicos en el medio ambiente tiene gran relevancia y debe ser tomada en consideración. En muchos casos, los procesos abióticos y bióticos, son complementarios. Por ejemplo, para algunos herbicidas, la primera etapa de degradación es una reacción de hidrólisis abiótica, que es seguida por la degradación microbiana del producto intermedio (Neilson y Allard, 2008). Las reacciones abióticas más importantes son las transformaciones fotoquímicas y las transformaciones químicamente mediadas como la hidrólisis, oxidación y reducción.

Las principales reacciones microbianas de degradación que ocurren en el suelo son oxidación, hidroxilación, N-desalquilación, B-oxidación, descarboxilación, división éter, acoplamiento oxidativo, rompimiento del anillo aromático (el tipo de enlace, la posición específica y número de sustituyentes determina la susceptibilidad a la escisión), escisión de anillo heterocíclico, sulfoxidación, reducción (por ejemplo de enlaces dobles o triples, de grupos nitro, reducción de sulfóxido y deshalogenación reductiva), reacciones hidrolíticas, y reacciones sintéticas (conjugación y condensación). Los dos últimos tipos de reacción están a menudo involucradas en la degradación de moléculas tóxicas (Yaron et al., 1996).



4. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN





4. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación de suelos y/o aguas subterráneas abarcan todas aquellas operaciones que tienen por objetivo reducir la toxicidad, movilidad o concentración del contaminante presente en el medio, mediante la alteración de la composición de la sustancia peligrosa o del medio, a través de acciones químicas, físicas o biológicas.

Actualmente se dispone de un amplio abanico de tecnologías de remediación de sitios contaminados, algunas de aplicación habitual y otras aún en fase experimental, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes. Su elección depende de las características intrínsecas del medio y del contaminante, de la eficacia esperada para cada tratamiento, de su factibilidad técnico-económica y del tiempo estimado para su ejecución.

4.1 Clasificación de Tecnologías de Remediación

Las tecnologías de remediación normalmente pueden agruparse en función de sus características de operación o finalidad, según los siguientes criterios: (i) Objetivo de la remediación, (ii) Lugar en que se aplica el proceso de remediación y (iii) Tipo de tratamiento utilizado. Además de los criterios anteriores, también pueden clasificarse en base al grado de desarrollo técnico en el que se encuentran.

En función de los objetivos de remediación se puede distinguir las técnicas de contención, que aíslan el contaminante en el medio, sin actuar sobre él, las técnicas de confinamiento, que actúan mediante la alteración de las condiciones fisicoquímicas del medio reduciendo la movilidad del contaminante, y las técnicas de descontaminación, enfocadas en la disminución o eliminación de la concentración de contaminantes presentes en el medio.

Según el lugar de aplicación del proceso de remediación, se habla de tratamientos *In Situ*, cuando las tareas de remediación se realizan directamente en el sitio contaminado, y de tratamientos *Ex Situ*, cuando se requiere de la extracción del medio contaminado para su tratamiento posterior, ya sea en el mismo lugar (On Site) o en instalaciones externas (Off Site).

En la clasificación de las tecnologías según el tipo de tratamiento aplicado se pueden distinguir los tratamientos biológicos, que están enfocados en la degradación, transformación y/o remoción de contaminantes mediante la actividad metabólica natural de ciertos organismos, los tratamientos físico químicos, que logran la destrucción, separación y/o contención de contaminantes aprovechando las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio, y los tratamientos térmicos, que utilizan altas temperaturas para volatilizar, descomponer o fundir los contaminantes.

Finalmente, según su grado de desarrollo, son clasificadas como Tecnologías Tradicionales aquellas utilizadas comúnmente a gran escala, de probada efectividad y cuya información acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso. Aquellas tecnologías propuestas más recientemente y que se encuentran en etapas de investigación y/o desarrollo son clasificadas como Tecnologías Innovadoras y la información en cuanto a su aplicación, costos y efectividad es aún limitada.

El esquema presentado en la Figura 5 presenta los distintos criterios expuestos para la clasificación de las tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas.

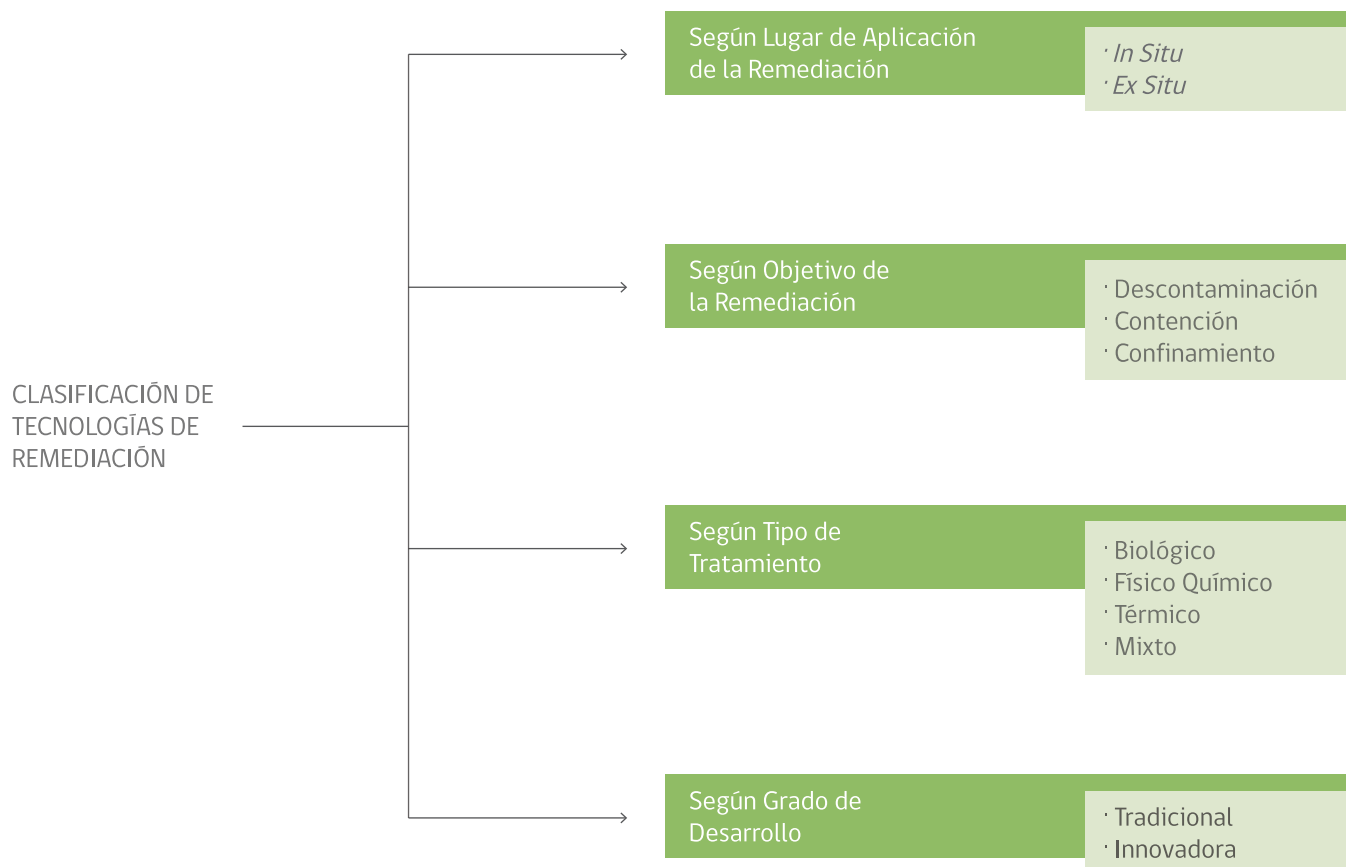


FIGURA 5 Esquema de criterios para la clasificación de tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas.

A continuación, se presentan algunas de las tecnologías de remediación más utilizadas para tratar aguas subterráneas y suelos contaminados, en base al tipo de tratamiento (biológico, fisicoquímico, térmico y mixto).

4.2 Principales Tecnologías de Remediación Según Tipo de Tratamiento

La Tabla 1 presenta un resumen de las principales tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas agrupadas según el tipo de tratamiento aplicado.

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS
· Bioaumentación · Biodegradación Asistida · Biotransformación de Metales · Bioventing · Compostaje · Fitorremediación · Landfarming · Lodos Biológicos · Pilas Biológicas	· Calentamiento por Conducción Térmica · Calentamiento por Radiofrecuencia · Calentamiento por Resistencia Eléctrica · Desorción Térmica · Incineración · Inyección de Agua Caliente · Inyección de Aire Caliente · Inyección de Vapor · Pirólisis · Vitrificación	· Adición de Enmiendas · Barreras de Suelo Seco · Barreras Físicas (Verticales/Horizontales) · Barreras Hidráulicas · Barreras Permeables Activas · Electrocínética · Estabilización Físico Química · Extracción de Agua · Extracción de Aire · Flushing · Inyección de Aire Comprimido · Inyección de Solidificantes · Lavado de Suelos · Oxidación UV · Pozos de Recirculación · Sellado de Suelos
TRATAMIENTOS MIXTOS		
· Extracción Multifase · Atenuación Natural		

TABLA1 Principales tecnologías de remediación de suelo y agua subterránea clasificadas según el tipo de tratamiento.

La Tabla 2 presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas según el tipo de tratamiento.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	· Permite tiempos rápidos de limpieza.	· Es el grupo de tratamientos más costoso. · Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. · Intensivos en mano de obra y capital.
TRATAMIENTOS TÉRMICOS	· Son efectivos en cuanto a costos. · Pueden realizarse en períodos cortos. · El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería.	· Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos. · Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.
TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS	· Son efectivos en cuanto a costos. · Son tecnologías más benéficas para el ambiente. · Los contaminantes generalmente son destruidos. · Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posteriores.	· Requieren mayores tiempos de tratamientos. · Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. · No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.

TABLA 2 Principales ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento.

A continuación se exponen las principales características de las tecnologías de remediación existente, clasificadas según cada tipo de tratamiento.

4.2.1 Tratamientos Biológicos

Los tratamientos biológicos o tecnologías de biorremediación utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para la degradación, transformación o remoción de compuestos orgánicos tóxicos, dependiendo de las actividades catabólicas de los organismos y de su capacidad natural para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía.

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras involucradas, pudiendo incluir reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción

e intercambio iónico e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales. Las tecnologías de biorremediación pueden emplear organismos propios del sitio contaminado (nativos) o de otros sitios (exógenos), pueden realizarse *In Situ* o *Ex Situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno), entre otras condiciones características.

La Tabla 3 presenta un resumen de las principales tecnologías biológicas de remediación utilizadas en suelos y aguas subterráneas.

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes Tratados
Bioaumentación Promoción de la biodegradación o biotransformación de contaminantes presentes en suelos y/o aguas subterráneas mediante la adición de microorganismos con capacidad de degradación de contaminantes orgánicos. Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado o cuando la microflora nativa es insuficiente en número o capacidad degradadora.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables
Biodegradación Asistida/ Bioestimulación Aceleración de las reacciones de biodegradación mediante la optimización de las condiciones medioambientales que favorecen el crecimiento de aquellos microorganismos que realicen la metabolización de contaminantes orgánicos presentes en suelos y/o agua subterránea.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelo Aguas subterráneas	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes Tratados
Biotransformación de Metales Inmovilización y/o transformación microbiana de metales u otros compuestos inorgánicos presentes en suelos contaminados mediante mecanismos de oxidación, reducción, metilación, dimetilación, formación de complejos, biosorción y/o acumulación intracelular, entre otros.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelo	Metales
Bioventing/Bioventilación/Biosparging Estimulación de la biodegradación natural de compuestos contaminantes en condiciones aeróbicas, mediante el suministro de aire (enriquecido en O ₂) a través de pozos de inyección, suministrando solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelo	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT)
Compostaje Estimulación de la actividad biodegradadora, aerobia y anaerobia, de microorganismos nativos bajo condiciones termofílicas (54 a 65 °C), permitiendo transformar compuestos orgánicos tóxicos en sustancias inocuas. El material contaminado es mezclado con sustancias orgánicas sólidas biodegradables (agentes de volumen: paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), mejorando el balance de nutrientes y asegurando una mejor aireación y generación del calor durante el proceso.	Descontaminación	<i>Ex Situ</i>	Suelo	Explosivos (TNT, RDX, HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo, clorofenoles y pesticidas
Fitorremediación/Fitorrecuperación Remoción, transferencia, estabilización, concentración y/o destrucción de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) presentes en suelos, lodos y sedimentos, mediante la utilización de especies vegetales. Son mecanismos de fitorremediación la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación, la fitovolatilización y la fitoestabilización.	Descontaminación Contención	<i>In Situ</i> <i>Ex Situ</i>	Suelos Sedimentos	Metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS				
Tecnología – Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes Tratados
Landfarming/Biolabranza Variación del compostaje en la cual el suelo contaminado es mezclado con agentes de volumen y nutrientes, y es removido periódicamente mediante el arado, favoreciendo su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) son controladas, optimizando la velocidad de degradación. Generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados.	Descontaminación	Ex Situ	Suelo	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano
Lodos Biológicos/Biorreactores Degradación en fase acuosa llevada a cabo mediante microorganismos en suspensión o inmovilizados en fase sólida. El tratamiento puede realizarse en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado.	Descontaminación	Ex Situ	Suelo	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes y pesticidas
Pilas Biológicas Variación del compostaje en la cual, además de agentes de volumen, se adiciona agua y nutrientes. Las pilas de suelo generalmente se cubren con plástico para controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento.	Descontaminación	Ex Situ	Suelo	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas

TABLA 3 Principales tecnologías biológicas de remediación de suelos y aguas subterráneas

4.2.2 Tratamientos Físico Químicos

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para la destrucción, separación o contención de la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación donde los contaminan-

tes pueden requerir de tratamiento o disposición final. Al igual que las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *In Situ* o *Ex Situ*.

La Tabla 4 presenta un resumen de las principales tecnologías físico-químicas de remediación utilizadas en suelos y aguas subterráneas.

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Adición de Enmiendas Reducción de la movilidad y biodisponibilidad de sales y metales pesados mediante la adición de sustancias orgánicas e inorgánicas al suelo contaminado. Las enmiendas aportan, además, nutrientes al medio; desempeñando un papel importante en la restauración de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos altamente degradados.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Fundamentalmente sales y metales
Barreras de Suelo Seco Dsecación del suelo mediante el flujo de aire seco, para aumentar su capacidad de retención de sustancias contaminantes líquidas, impidiendo así su migración hacia los reservorios de agua subterránea. El aire seco vaporiza el agua del suelo y conduce el vapor de agua hacia pozos de extracción.	Contención	<i>In Situ</i>	Suelos	Contaminantes orgánicos e inorgánicos

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS

Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Barreras Físicas/Pantallas (Verticales-Horizontales) Consisten en la introducción de paredes o barreras impermeables en el suelo de manera que evita la migración de la contaminación. Por lo general se aplican cuando la descontaminación resulta técnica o económicamente inviable mediante alguna de las demás técnicas cuando la contaminación esté muy localizada.	Contención	<i>In Situ</i>	Suelos	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras Hidráulicas Extracción de aguas subterráneas en las inmediaciones de la zona contaminada o aguas arriba para evitar su contaminación y la migración de la contaminación aguas abajo.	Contención	<i>In Situ</i>	Aguas subterráneas	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras Permeables Reactivas Adsorción, precipitación y/o degradación de contaminantes presentes en aguas subterráneas, mediante la instalación <i>In Situ</i> de una pantalla perpendicular al flujo de la pluma de contaminación, cuyo material de relleno puede adsorber, precipitar o degradar biótica o abióticamente los contaminantes.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Aguas subterráneas	Contaminantes orgánicos biodegradables, metales, nitratos, sulfatos
Enjuague/Inundación de Suelos Extracción de contaminantes mediante la anegación del suelo con agua u otras soluciones acuosas que transporten los contaminantes a una zona determinada para su captación, tratamiento y/o recicló.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Todo tipo de contaminantes especialmente inorgánicos

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Estabilización Físico Química Limitación de la solubilidad o movilidad del contaminante generalmente por la adición de materiales como cemento hidráulico, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica. El suelo contaminado recibe un pretratamiento para eliminar la fracción gruesa y luego se mezcla en tanques con agua y una serie de aditivos o agentes estabilizantes.	Confinamiento	<i>Ex Situ</i>	Suelos	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados, limitada eficacia para contaminantes orgánicos y pesticidas
Extracción de Agua/Pump & Treat Extracción de agua contaminada del suelo y subsuelo, tanto de la zona saturada como de la no saturada. Cuando se trata la zona saturada, el agua es bombeada a la superficie para su posterior tratamiento, conocido con el término de Pump & Treat. Cuando se busca actuar sobre la zona no saturada, se requiere una inyección previa de agua, por gravedad o presión, que arrastre y lave los elementos contaminantes del suelo y que los almacene en la zona saturada para ser posteriormente bombeada a la superficie.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, metales, PCBs, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, disolventes halogenados y clorados, etc
Extracción de Aire Extracción de contaminantes adsorbidos en las partículas de suelos no saturados mediante su volatilización o evaporación a través de pozos de extracción (verticales y/u horizontales) que conducen el aire con los contaminantes a la superficie, donde pueden ser tratados mediante sistemas especializados o ser degradados en la atmósfera de forma natural.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Sustancias volátiles y semivolátiles como hidrocarburos ligeros derivados del petróleo, disolventes no clorados, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos ligeros y compuestos organoclorados volátiles

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Inyección de Aire Comprimido/Air Sparging Separación de contaminantes disueltos en el agua mediante la inyección In Situ de aire comprimido a través de pozos. El aire volatiliza los contaminantes disueltos en el agua subterránea, provocando su desplazamiento en forma de vapor hacia la zona no saturada. El aire contaminado que migra a la zona no saturada debe ser extraído y depurado en la superficie, generalmente con filtros de carbón activado.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como Xilenos, Benceno, Tolueno, Tetracloruro de Carbono, Tricloroetano, Cloruro de Metilo, etc.
Inyección de Solidificantes/Solidificación/Estabilización Encapsulamiento de contaminantes mediante la mezcla de suelos con aditivos solidificantes, formando un material sólido. No involucra necesariamente una interacción química entre el contaminante y los aditivos.	Confinamiento	<i>In Situ</i> <i>Ex Situ</i>	Suelos	Fundamentalmente compuestos inorgánicos, eficacia mucho menor para compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
Lavado de Suelos Desorción y solubilización de contaminantes presentes en el suelo mediante la acción de lavado con extractantes químicos. El suelo excavado es previamente separado físicamente por tamizado, densidad o gravedad para eliminar partículas gruesas con poca capacidad de adsorción. Posterior al tratamiento, el suelo se vuelve a lavar con agua para eliminar los contaminantes y agentes extractantes residuales y es devuelto a su lugar de origen.	Descontaminación	<i>Ex Situ</i>	Suelos	Compuestos orgánicos semivolátiles, Hidrocarburos derivados del petróleo, Cianuros y metales

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Oxidación UV Destrucción de contaminantes mediante la adición de compuestos de oxígeno muy oxidantes, como el Peróxido de Hidrógeno o el Ozono, en conjunción con luz ultravioleta. Este tratamiento se lleva a cabo en un reactor, donde la oxidación de los contaminantes se produce por contacto directo con los oxidantes, por fotólisis ultravioleta (rompiendo enlaces químicos) y a través de la acción sinérgica de la luz ultravioleta y el Ozono. Si se alcanza la mineralización completa, los productos finales de la oxidación serán agua, dióxido de carbono y sales.	Descontaminación	<i>Ex Situ</i>	Suelos	Amplio espectro de contaminantes orgánicos y explosivos (Hidrocarburos del petróleo, Hidrocarburos clorados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, éteres, pesticidas, dioxinas, PCBs, TNT, RDX y HMX)
Pozos de Recirculación Separación de contaminantes orgánicos volátiles presentes en aguas subterráneas en forma de vapor. Se basa en la creación de celdas de circulación de agua subterránea en el interior y alrededores del pozo. El aire inyectado a presión en el pozo produce la ascensión del agua y una disminución de su densidad, favoreciendo la volatilización de los compuestos orgánicos. Estos son captados por un filtro en la parte superior del pozo, desde donde el agua vuelve a circular hacia abajo por gravedad, volviendo a ser captada en la parte inferior del pozo y repitiendo de nuevo el ciclo. El aire contaminado se extrae del pozo con bombas de vacío y se trata en la superficie, generalmente con filtros de carbón activado.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Tricloetileno, derivados del petróleo, compuestos orgánicos no halogenados semivolátiles, pesticidas y compuestos inorgánicos

TECNOLOGÍAS FÍSICO - QUÍMICAS				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Remediación Electrocinética Movilización de agua, iones y partículas pequeñas cargadas inducida mediante la aplicación de una corriente eléctrica de baja intensidad entre electrodos introducidos <i>In Situ</i> en el suelo contaminado. Durante el tratamiento, los contaminantes pueden ser transportados por electromigración (movimiento de iones hacia el electrodo de carga opuesta), electroósmosis (movimiento del agua respecto a la superficie cargada de las partículas del suelo), electrólisis (movimiento de iones como respuesta a una diferencia de potencial) y electroforesis.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Especialmente metales solubles o complejados
Sellado de Suelos Alteración <i>In Situ</i> de la estructura del suelo contaminado para disminuir su permeabilidad y controlar así el avance de la contaminación en profundidad.	Contención	<i>In Situ</i>	Suelos	Contaminantes orgánicos e inorgánicos

TABLA 4 Principales tecnologías físico-químicas de remediación de suelos y aguas subterráneas.

4.2.3 Tratamientos Térmicos

Al igual que las tecnologías físico-químicas y a diferencia de las biológicas, los tratamientos térmicos incluyen la destrucción, separación y/o inmovilización de los contaminantes presentes en el medio. Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos y, en ocasiones, residuos líquidos, que requieren de tratamiento o disposición final. Los procesos térmicos ofrecen tiempos rápidos de

limpieza, pero son generalmente de alto costo debido a los costos propios en demanda de energía y equipos específicos, además de ser intensivos en mano de obra. La mayoría de las tecnologías térmicas pueden aplicarse *In Situ* y *Ex Situ*.

La Tabla 5 presenta una síntesis de las principales tecnologías térmicas utilizadas en la remediación de suelos y aguas subterráneas.

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICA				
Tecnología - Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Calentamiento por Conducción Térmica/Desorción Térmica <i>In Situ</i> Evaporación y/o destrucción de contaminantes presentes en el suelo mediante la aplicación de calor utilizando pozos de acero o mantas que cubren la superficie del suelo. Las mantas son utilizadas para contaminación poco profunda.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Principalmente COV's y SCOV's. Adicionalmente BPC, HAP, dioxinas, pesticidas, herbicidas, combustibles, solventes clorados, lubricantes y aceites. Asimismo son útiles para tratar LFNA
Calentamiento por Radio Frecuencia Evaporación de contaminantes usando energía electromagnética para calentar el suelo y favorecer la extracción de vapores. Esta técnica aplica a un volumen de suelo limitado usando filas de electrodos verticales enterrados en el suelo, pudiendo elevar la temperatura hasta 300 °C.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos	Principalmente COV's y SCOV's. Adicionalmente BPC, HAP, dioxinas, pesticidas, herbicidas, combustibles, solventes clorados, lubricantes y aceites. Asimismo son útiles para tratar LFNA

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICA

Tecnología - Descripción	Objetivo de Remedación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Calentamiento por Resistencia Eléctrica Volatilización y movilización de contaminantes mediante arreglos de electrodos instalados en torno a un electrodo neutro central, creando un flujo de corriente hacia este punto. La resistencia eléctrica fluye a través del suelo generando temperaturas por sobre los 100 °C. Los contaminantes movilizados deben ser recuperados y tratados en la superficie.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelo Aguas subterráneas	Principalmente COV's y SCOV's. Adicionalmente BPC, HAP, dioxinas, pesticidas, herbicidas, combustibles, solventes clorados, lubricantes y aceites. Asimismo son útiles para tratar LFNA
Desorción Térmica (DT) Volatilización de contaminantes en suelos extraídos desde su lugar de origen y tratados en equipos típicamente conocidos como desorbedores. Es un proceso de separación física no destructivo que requiere que los vapores generados reciban un tratamiento posterior. La Desorción Térmica puede implementarse por inyección a presión de aire caliente, inyección de vapor o por calentamiento del suelo por ondas de radio (radio frecuencia). Basado en la temperatura de operación del equipo, el proceso puede ser categorizado en DT de alta temperatura (de 320 a 560 °C) o DT de baja temperatura (de 90 a 320 °C). Durante la DT de baja temperatura, el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, lo que hace posible que pueda conservar su capacidad para soportar futura actividad biológica.	Descontaminación	<i>Ex Situ</i>	Suelo	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, algunos compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, pesticidas y metales volátiles

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICA				
Tecnología – Descripción	Objetivo de Remedación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Incineración Oxidación y volatilización de compuestos orgánicos contaminantes, mediante la exposición a altas temperaturas de operación, entre los 870 a los 1200 °C, en presencia de oxígeno. Este proceso genera gases y cenizas residuales, orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfurados, compuestos oxigenados, compuestos aromáticos nitrogenados, etc.) e inorgánicos (metales pesados volátiles, CO ₂ , NO _x , SO _x) que deben ser depurados.	Descontaminación	<i>Ex Situ</i>	Suelos	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas
Inyección de Agua Caliente Movilización de contaminantes presentes en el suelo y aguas subterráneas mediante la inyección de agua caliente.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas Subterráneas	COV's, SCOV's, LFNA, pesticidas y combustibles, entre otros
Inyección de Aire Caliente Volatilización de contaminantes presentes en el suelo mediante la inyección de aire a alta temperatura. Los vapores generados son recuperados mediante pozos de recolección y tratados en la superficie.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Sedimentos	Orgánicos (fuel, hidrocarburos)
Inyección de vapor Movilización, evaporación y/o destrucción de contaminantes presentes en el suelo y aguas subterráneas mediante la inyección de vapor. Los vapores generados Son recuperados mediante pozos de recolección y tratados en la superficie.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	COV's, SCOV's, LFNA, pesticidas y combustibles, entre otros

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICA				
Tecnología – Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Pirólisis Descomposición química de compuestos orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y a temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperatura menor en ausencia de aire.	Descontaminación	Ex Situ	Suelos	Compuestos orgánicos semi volatiles y pesticidas, PCBs, dioxinas, desechos de alquitrán y pinturas, suelos contaminados con creosota y con hidrocarburos
Vitrificación Calentamiento del suelo contaminado a alta temperatura (1600 a 2000 °C) para conseguir su fusión y transformación en un material vítreo estable, reduciendo así la movilidad de los contaminantes inorgánicos y la destrucción de los contaminantes orgánicos por reacciones de oxidación y/o pirolisis. La vitrificación da lugar a gases tóxicos que deben ser recogidos y tratados antes de ser emitidos a la atmósfera.	Confinamiento	In Situ Ex Situ	Suelos	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y algunos orgánicos

TABLA 5 Principales tecnologías térmicas de remediación de suelos y aguas subterráneas.

4.2.4 Tratamientos Mixtos

La Tabla 6 presenta una síntesis de las principales tecnologías mixtas de remediación de suelos y aguas subterráneas.

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN MIXTA				
Tecnología Descripción	Objetivo de Remediación	Aplicación	Matriz	Contaminantes tratados
Extracción Multifase Consiste en extraer simultáneamente <i>in situ</i> mediante zanjas o pozos, sustancias contaminantes que estén presentes en el suelo en fase vapor (compuestos orgánicos volátiles), fase líquida (en disolución) y, especialmente, compuestos no acuosos en fase libre. El “bioslurping” y la “extracción dual” son ejemplos de aplicación de la extracción multifase.	Descontaminación	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Compuestos orgánicos volátiles, en disolución y compuestos orgánicos no acuosos en fase libre
Atenuación Natural/Atenuación Natural Monitoreada/Recuperación Pasiva Contención y reducción de la contaminación procedente de vertidos químicos mediante procesos naturales biológicos (biodegradación aerobia, anaerobia y co-metabólica) y físico-químicos (volatilización, dispersión, dilución, desintegración radioactiva, estabilización química y bioquímica, precipitación y sorción en partículas de materia orgánica y arcillas del suelo). Es necesario mantener un monitoreo constante durante todo el tiempo que estos procesos naturales estén actuando con objeto de eliminar riesgos para el medio ambiente y la salud humana.	Descontaminación Contención	<i>In Situ</i>	Suelos Aguas subterráneas	Compuestos BTEX (Benceno, Tolueno, Etil Benceno y Xileno), Hidrocarburos Clorados, algunos pesticidas y compuestos inorgánicos

TABLA 6 Principales tecnologías mixtas de remediación de suelos y aguas subterráneas.

5. FICHAS DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN



5. Fichas de Tecnologías de Remediación

A continuación se presenta información con mayor detalle para aquellas tecnologías de remediación consideradas de relevancia, incluyendo descripción, ventajas y desventajas, estimación de costos, diagramas de operación, ejemplos de aplicación, entre otros. Es importante aclarar que los costos que se presentan son promedios obtenidos de la aplicación de cada tecnología en algunos países. La información ha sido compilada en formato de ficha, cuyo ejemplo de contenidos puede verse en la Figura 8.

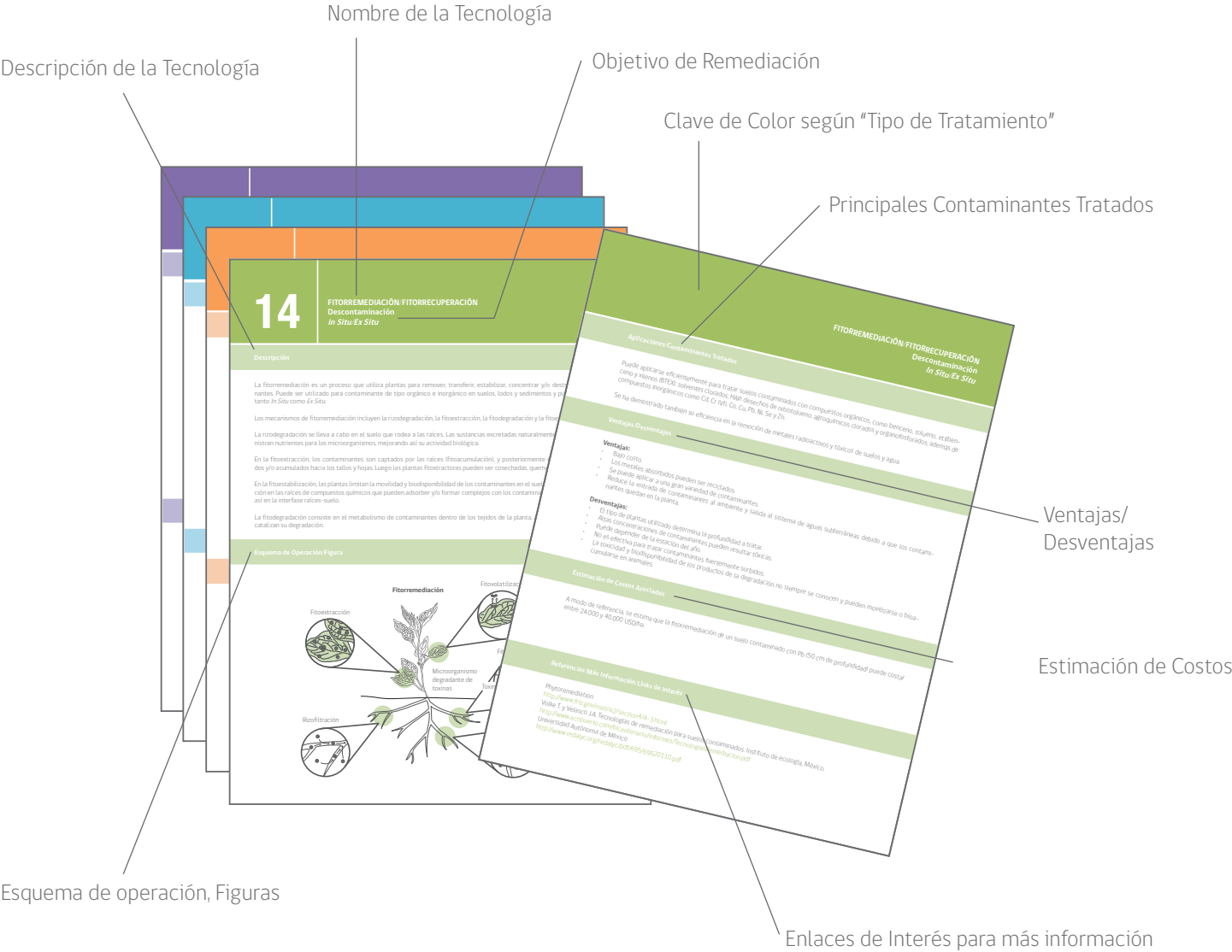


FIGURA 6 Contenidos de fichas de información para las tecnologías de remediación seleccionadas.

Las tecnologías seleccionadas se presentan en la Tabla 7.

Nº Ficha	TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO
01	Atenuación Natural/Atenuación Natural Monitoreada
02	Barreras Físicas de Contención
03	Barreras Permeables Reactivas
04	Bioaumentación
05	Bioestimulación/Biodegradación Asistida
06	Biotransformación de Metales
07	Bioventilación
08	Calentamiento
09	Compostaje (Biorremediación en Fase Sólida)
10	Desorción Térmica
11	Enjuague/Inundación de Suelos
12	Extracción de Agua/Pump & Treat
13	Extracción Multifase
14	Fitorremediación/Fitorrecuperación
15	Incineración
16	Inyección de Vapor/Aire Caliente/Agua Caliente
17	Landafarming/Biolabranza
18	Lavado de Suelos
19	Lodos Biológicos (Biorremediación en Fase de Lodos)
20	Pilas Biológicas
21	Pirólisis
22	Pozos de Recirculación
23	Remediación Electrocínética
24	Solidificación/Estabilización/Inyección de Solidificantes

TABLA 7 Tecnologías de remediación descritas en fichas de consulta.

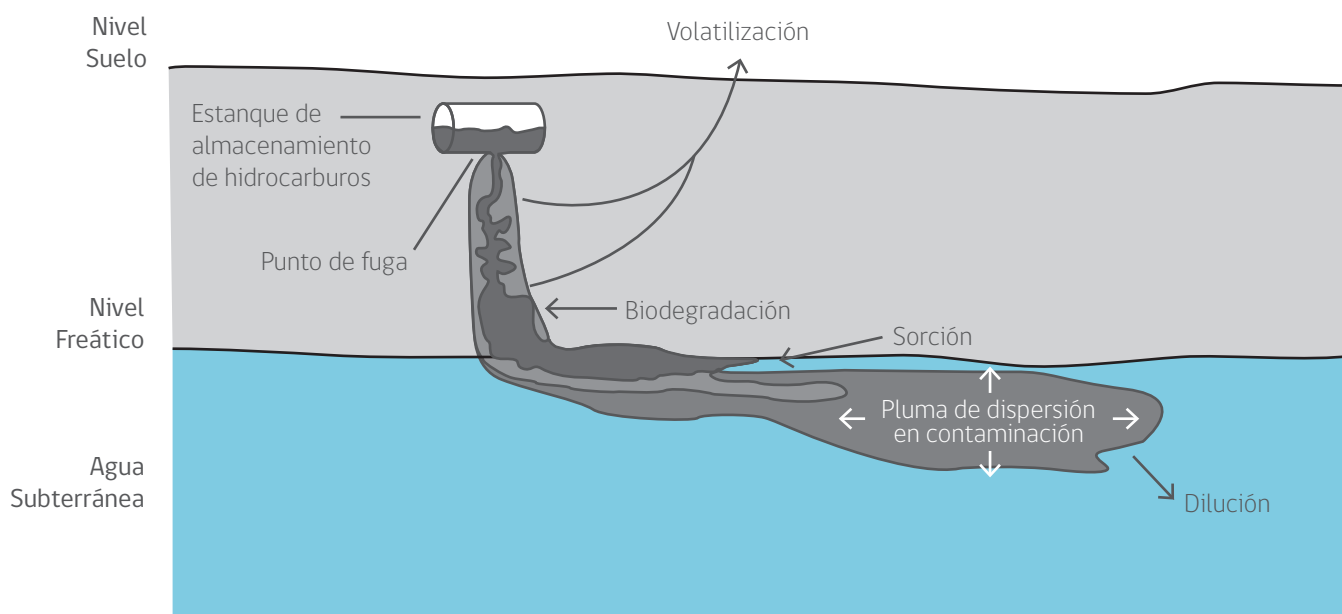
Descripción

La atenuación natural se fundamenta en la ocurrencia de procesos naturales de remoción o atenuación de la contaminación en suelos y aguas subterráneas. La atenuación natural es un proceso que tiene lugar de manera espontánea, como su nombre lo indica, hasta en los sitios más contaminados. Sin embargo, para la exitosa remoción de una contaminación, se necesita la existencia de condiciones adecuadas en el área donde se ubica la contaminación, de lo contrario, el saneamiento no será lo suficientemente rápido o acabado. El monitoreo de estas condiciones, para asegurarse que la atenuación natural puede llegar a buen fin, se define como atenuación natural monitoreada.

La atenuación natural en un sitio contaminado puede actuar a través de 4 vías principalmente:

- A través de la acción de los microorganismos presentes en el suelo y el agua subterránea, que metabolizan el contaminante a agua y gases menos tóxicos (CO_2 , CH_4 , etc.) o lo transforman a compuestos menos nocivos.
- A través de la sorción de el o los contaminantes al suelo, formación de NER y envejecimiento del suelo, procesos que limitará la movilidad del o los contaminantes.
- Por dilución de la contaminación al moverse ésta a través del suelo y el agua subterránea.
- Por evaporación de compuestos volátiles desde el agua subterránea y el suelo.

Para considerar esta opción de remediación se requiere normalmente una etapa de modelamiento y evaluación de las tasas y vías de degradación de el o los contaminantes y la predicción de la concentración del contaminante en receptores en los límites de la pluma, especialmente cuando la pluma está migrando o expandiéndose. El principal objetivo del modelamiento del sitio es demostrar que los procesos naturales de degradación reducirán las concentraciones de el o los contaminantes por debajo de los estándares de referencia o niveles de riesgo inaceptables. Es decir, el modelamiento indica si la atenuación natural, en el caso puntual de estudio, es viable como alternativa de remediación. Adicionalmente, se realiza un monitoreo a largo plazo para confirmar que la degradación de la contaminación está ocurriendo a tasas compatibles con los objetivos de remediación.

Esquema de Operación/Figura

ATENUACIÓN NATURAL/ATENUACIÓN NATURAL MONITOREADA

Descontaminación/Contención

In Situ

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Sitios contaminados con compuestos radioactivos, solventes clorados (PCE, TCE, DCE), COV y semi volátiles, hidrocarburos derivados del petróleo (BTEX, PAH, TPH, etc.), pesticidas y para la inmovilización de algunos metales pesados y metaloides (As, Cu, Cr, Hg, etc.).

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Menor generación o transferencia de residuos.
- Menos intrusivo y perturbador que otros métodos.
- Puede ser aplicada a un sitio completo o a parte de él, según los objetivos de remediación que se quieran alcanzar.
- Pueden ser combinados con tratamientos activos de remediación.
- Los costos de remediación son menores a los de una remediación activa.

Desventajas:

- Requiere tiempos de remediación mayores para alcanzar objetivos de saneamiento, comparado con los tratamientos activos. Se requiere un monitoreo regular y a largo plazo.
- La atenuación natural no es apropiada en caso de riesgo inminente por contaminación.
- En ciertos sitios, los costos asociados al monitoreo de largo plazo pueden ser excesivos.
- Si las tasas de atenuación natural son demasiado bajas, la pluma puede continuar migrando.
- La biodegradación incompleta puede generar productos secundarios aún más móviles y tóxicos que el compuesto parental.
- Usualmente es requerido el control de uso de suelo y de aguas subterráneas.

Estimación de Costos Asociados

Los costos están asociados principalmente al monitoreo, el cual incluye principalmente dos fases: la caracterización del sitio y la realización del monitoreo a largo plazo.

Estudios indican que los costos de remediación, por ejemplo, de una pluma de solventes clorados en aguas subterráneas por atenuación natural (alrededor de 900.000 USD) corresponden a un 50% de los requeridos por un sistema convencional de bombeo y tratamiento.

Asimismo, en India, los costos asociados a la remediación por atenuación natural de aguas subterráneas contaminadas por perclorato (1.100.000 USD) demuestran ser entre un 50% y 1/3 más económicos que alternativas convencionales como biobarreras pasivas, biobarreras activas y/o bombeo y Tratamiento.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (ASR), Tenth Edition, EPA 542-R-01-004

http://www.clu-in.org/download/remed/asr/11/main_body.pdf

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-32.html>

Technologies Development Fourm (RTDF). 1999. In Situ Bioremediation Work Team Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater: Principles and Practices.

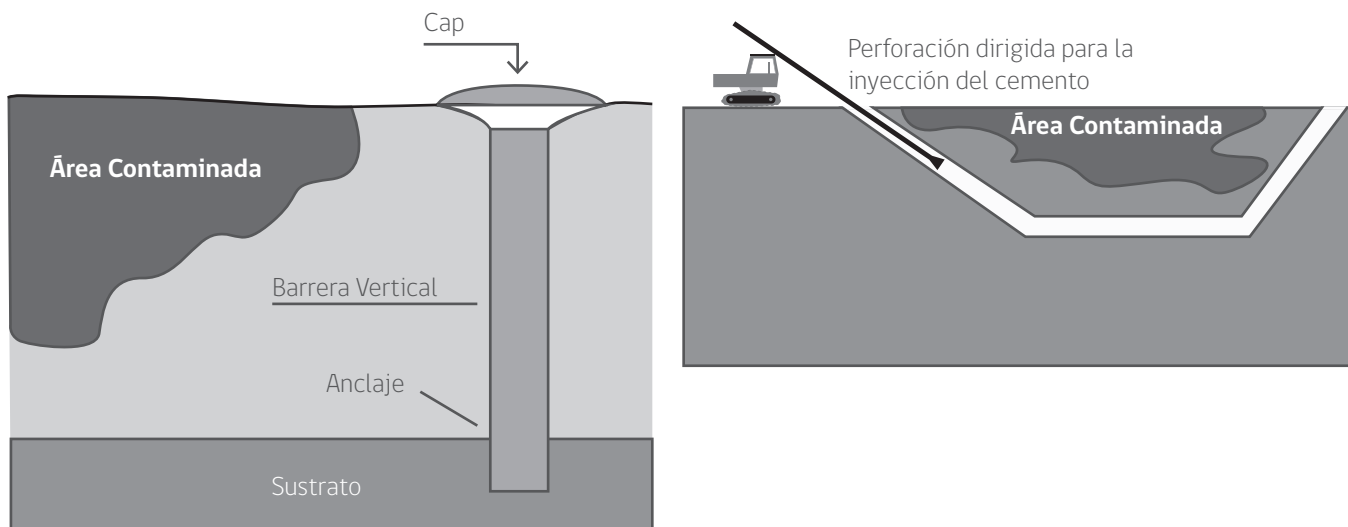
U.S. Department of Defense, Environmental Security Technology Certification Program. 2010. Monitored Natural Attenuation of Perchlorate in Groundwater. Project: ER-200428

Descripción

Las técnicas de contención mediante barreras físicas se utilizan para prevenir o reducir significativamente la migración de los contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos y aguas subterráneas.

Los tipos básicos de barreras empleados se describen a continuación:

- **Barreras verticales:** Se emplean *In Situ* con objeto de reducir los movimientos laterales de los contaminantes, ya sea a través de lixiviados o por disolución en las aguas subterráneas. Incluyen la instalación de muros pantalla, la inyección vertical a presión de lechada de cemento o cemento-bentonita a través de sondeos y el uso de tableros metálicos.
- **Barreras de suelo seco:** Se basa en la desecación del suelo para aumentar su capacidad de retención de sustancias contaminantes líquidas, impidiendo así su migración hacia los reservorios de agua subterránea. El aire seco vaporiza el agua del suelo y conduce el vapor de agua hacia pozos de extracción.
- **Sellado superficial:** Su finalidad es evitar la exposición directa del suelo a la contaminación, limitar la infiltración de agua de lluvia en el suelo contaminado y controlar la volatilización de ciertos contaminantes a la atmósfera. La superficie del suelo se puede sellar *In Situ* con materiales naturales que reducen la permeabilidad, con aglomerados asfálticos u hormigones y/o con láminas sintéticas.
- **Sellado profundo:** Consiste en alterar *In Situ* la estructura del suelo contaminado para disminuir su permeabilidad y controlar así el avance de la contaminación en profundidad. Normalmente se inyectan materiales plastificantes en forma de lechadas (cemento-bentonita, silicato sódico o mezclas de bentonita con resinas orgánicas).

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Contaminantes orgánicos e inorgánicos. Las barreras físicas de contención no están orientadas a ningún grupo particular de contaminantes.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Se pueden abarcar superficies extensas.
- Efecto de contención independiente del tipo de contaminante.
- Bajo costo y relativamente rápida implementación.

Desventajas:

- La mayoría de estas técnicas implican la construcción de obra gruesa de envergadura.
- Estas técnicas sólo contienen contaminantes dentro de un área específica.
- Algunos materiales de relleno no son capaces de resistir el ataque de los ácidos fuertes, bases, soluciones salinas y algunos productos químicos orgánicos. Algunas mezclas pueden ser desarrolladas para resistir productos químicos específicos.
- Existe la posibilidad de que las paredes de lechada estén sujetas a degradación o deterioro con el tiempo.
- El uso de esta tecnología no garantiza que la reparación en el futuro puede no ser necesaria.

Estimación de Costos Asociados

A modo de ejemplo, los costos asociados al diseño e instalación de una barrera física de bentonita en suelo estándar es de alrededor de 540 a 750 USD por metro cuadrado. Este rango de valores no incluye los costos variables necesarios para los análisis químicos y/o pruebas de factibilidad técnica. Los costos de estas pruebas dependerán en gran medida de factores sitio-específicos.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Técnicas de recuperación de suelos contaminados:

http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Physical Barriers

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-53.html>

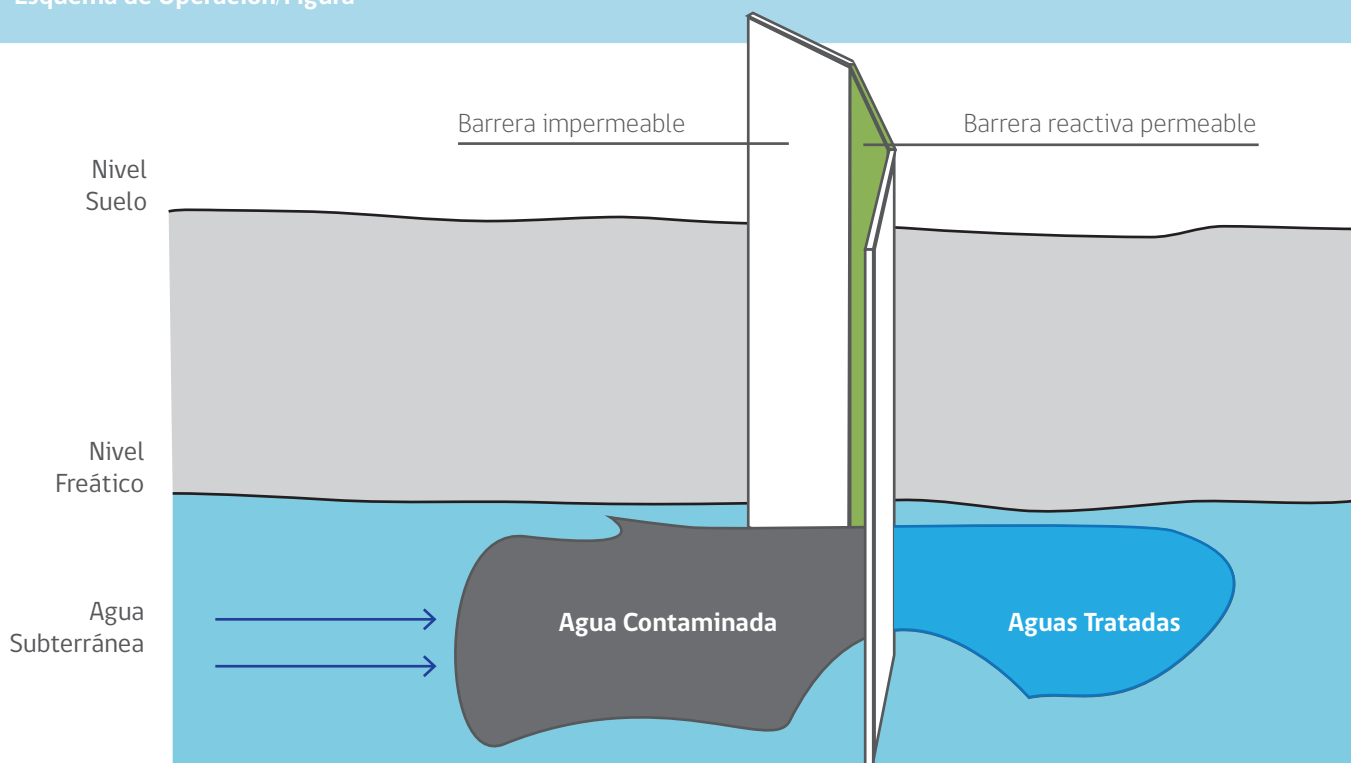
Descripción

Constituye una técnica *In Situ* de descontaminación diseñada para interceptar el paso del agua subterránea, eliminando así los contaminantes presentes en ella mediante procesos físicos, químicos o biológicos. Se trata de un sistema reactivo complementado por un sistema que conduce el flujo de agua hacia la barrera. La zona de tratamiento se puede generar directamente usando materiales reactivos tales como Hierro 0-valente (ZVI), o indirectamente, usando materiales diseñados para estimular procesos secundarios (por ejemplo, la adición de sustrato de carbono y nutrientes para mejorar la actividad microbiana). Su construcción puede consistir en unidades permanentes, semi-permanentes o reemplazables. La configuración más comúnmente usada es la de una zanja continua en la que se rellena con el material de tratamiento. Esta zanja es perpendicular a la intersección con la pluma y el flujo del agua subterránea. Otra configuración frecuente es llamada "embudo y puerta", en la que paredes de baja permeabilidad (embudo) dirigen las aguas subterráneas hacia una zona de tratamiento permeable (puerta).

A medida que el agua subterránea contaminada traspasa pasivamente la pared de tratamiento, los materiales de relleno o compuestos reactivos pueden eliminar los contaminantes presentes en el agua mediante los siguientes mecanismos:

- **Transformación química:** las sustancias dañinas se transforman, mediante reacción química, en compuestos inocuos o inofensivos.
- **Adsorción:** Los contaminantes quedan atrapados en las paredes de la barrera permeable. Se utiliza carbón activado, que es capaz de adsorber las sustancias en su superficie.
- **Precipitación:** Utilizando agentes precipitantes, como la caliza, se induce la precipitación de los compuestos nocivos, quedando retenidos en las paredes de la barrera.
- **Biodegradación:** Mediante la estimulación del crecimiento de microorganismos que transformen, en su metabolismo, las sustancias contaminantes en CO_2 y agua.

La aplicación exitosa de esta tecnología requiere una caracterización acabada de los contaminantes, el régimen de flujo del agua subterránea y la geología del subsuelo.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Los grupos objetivo para los contaminantes para esta tecnología son principalmente COV, SCOV e inorgánicos. La tecnología se puede utilizar, pero puede ser menos eficaz, en el tratamiento de algunos hidrocarburos combustibles.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Esta tecnología permite degradar o inmovilizar los contaminantes *In Situ*, sin necesidad de bombearlos a la superficie.
- No requiere la entrada continua de energía, dado que es el gradiente natural del flujo del agua subterránea el que se utiliza para transportar los contaminantes a través de la zona de tratamiento.
- Una vez construidas, las barreras carecen de partes móviles, equipamiento y ruido. Los materiales reactivos que se sitúan en las zanjas no perjudican las aguas subterráneas ni a las personas.

Desventajas:

- Lentitud en el tratamiento, depende del flujo natural de agua subterránea.
- Dificultad de construcción y diseño (profundidad y ancho de la barrera pueden quedar limitados por los equipos de excavación disponibles).
- Las barreras de tratamiento pueden perder su capacidad de reacción, lo que requiere la sustitución del medio reactivo.
- La permeabilidad de la barrera puede disminuir debido a la precipitación de sales.
- La actividad biológica o precipitación química pueden limitar la permeabilidad de la barrera.

Estimación de Costos Asociados

A modo de ejemplo, los costos asociados al diseño e instalación de una barrera permeable reactiva es de alrededor de 1.200 a 2.600 USD por metro cuadrado de barrera de tratamiento, dependiendo de la elección final del material reactivo a utilizar y del ancho de la pluma a tratar.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Guía del Ciudadano para las Barreras Reactivas
<http://clu-in.org/download/citizens/prb-sp-12-6.pdf>
Technology Evaluation Report: Treatment Walls
http://www.clu-in.org/download/remed/tmt_wall.pdf
Permeable Reactive Barrier: Technology Update
<http://www.clu-in.org/download/techfocus/prb/PRB-5-ITRC.pdf>
Detail Cost estimated for Passive-Reactive Treatment Walls
<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/Passive-Reactive-Treatment-Walls.pdf>

Descripción

El principio de la bioaumentación es la utilización de microorganismos altamente especializados para incrementar y mejorar la capacidad de degradación de la población microbiana natural presente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y suelos.

Consiste en inocular cepas microbianas (autóctonas e incluso cepas que podrían estar genéticamente modificadas y con mayor capacidad para restaurar entornos con alta concentración tóxica) que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación.

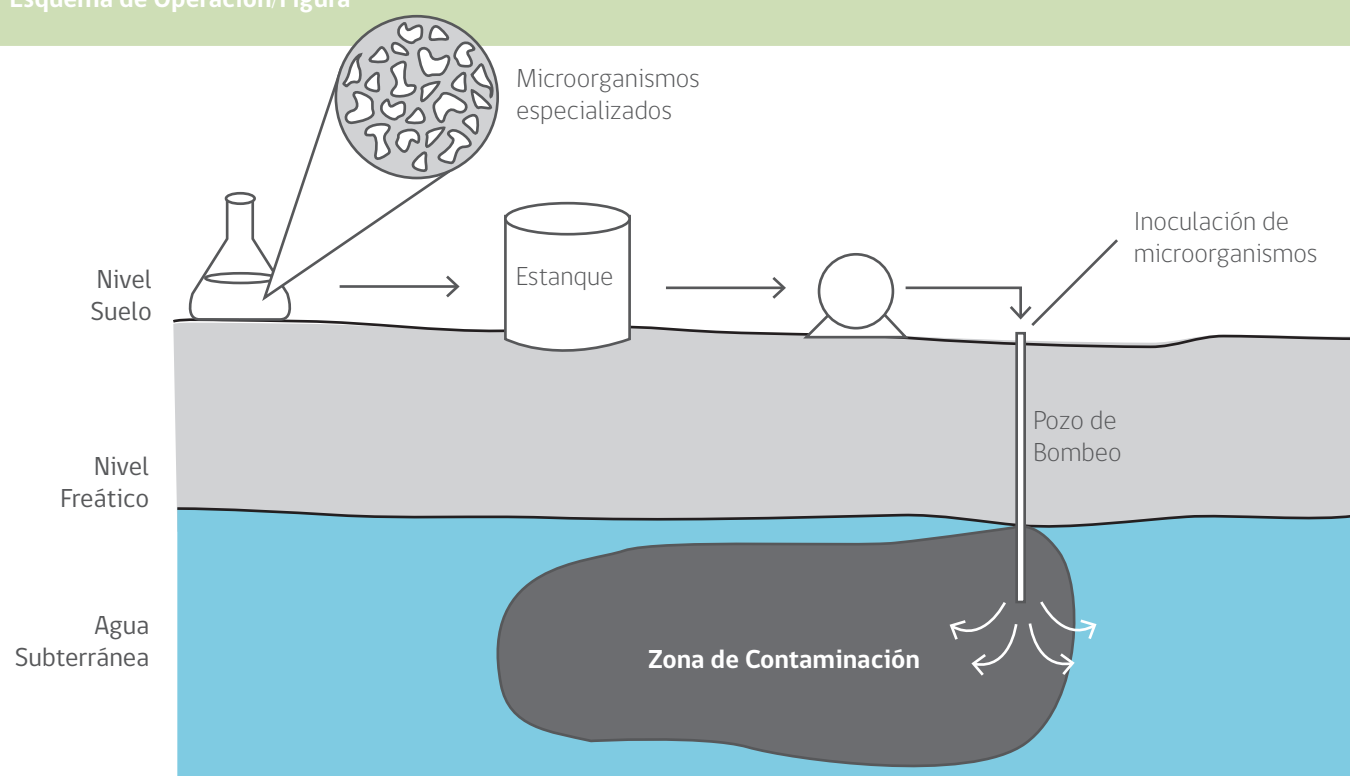
Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora.

En diferentes bibliografías se ha reportado que inocular cultivos con microorganismos autóctonos del sitio contaminado, realizando un cultivo enriquecido, consigue mejores resultados en relación a la degradación de compuestos orgánicos o biotransformación de elementos y/o compuestos inorgánicos, debido a que éstos presentan el mecanismo enzimático necesario para crecer bajo condiciones adversas.

El tamaño del inoculo a utilizar depende de:

- Tamaño de la zona contaminada.
- Parámetros físicos de las zonas contaminadas (porosidad).
- Dispersión de los contaminantes.
- Velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores.

Esquema de Operación/Figura



BIOAUMENTACIÓN

Descontaminación/Disminución de la Biodisponibilidad

In Situ

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Se ha usado para tratar suelos contaminados con herbicidas (2,4-D, clorofam), insecticidas organoclorados (lindano, clordano, paratión), clorofenoles y Nitrofenoles, BPC, HTP y HAP.

También se ha aplicado efectivamente para tratar suelos con concentraciones relativamente altas de metales y metaloides, con el objetivo de biotransformarlo y disminuir su biodisponibilidad.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Mejora la bioactividad.
- Reduce la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).
- Mejora la estabilidad del sistema.
- Reduce la formación de espuma.
- Mejora la sedimentación de sólidos.
- Reduce el volumen de lodos.

Desventajas:

- Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de co-metabolizar o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa.
- En el caso que el contaminante no se pueda usar como fuente de carbono, existirá una desventaja del tipo económica.

Estimación de Costos Asociados

Los costos asociados a esta tecnología están relacionados con la fuente de carbono a utilizar y la disponibilidad de recursos en la zona a remediar. Cabe señalar que su utilización no implica grandes costos de inversión.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.
<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>
ATS Meridian de México, S.A. de C.V.
<http://www.atsmeridian.com.mx/suelos.html>

Descripción

La bioestimulación es una tecnología que tiene por objetivo acelerar el proceso de biodegradación natural mediante la modificación del entorno a través de la adición de nutrientes y/o aceptadores de electrones que, de otro modo, pueden estar limitando la rápida conversión de compuestos orgánicos contaminantes a productos finales inocuos.

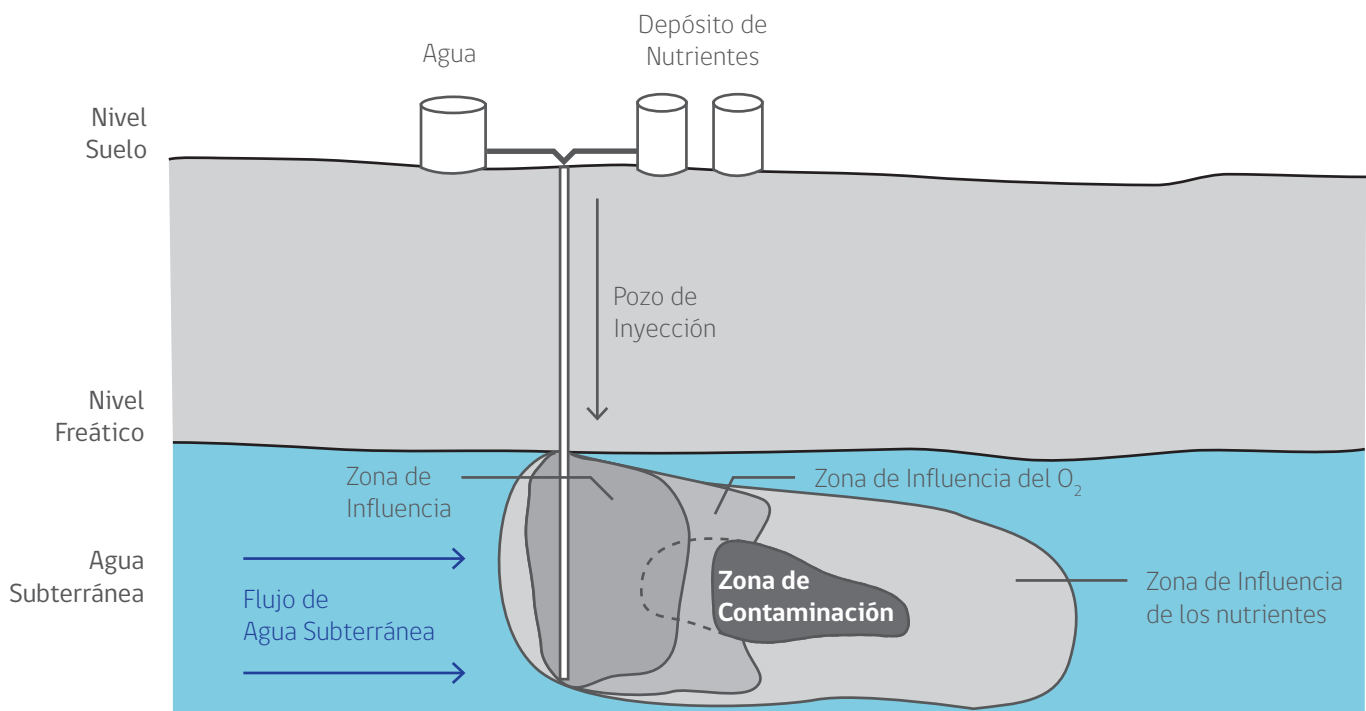
Este tratamiento implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos, o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos *In Situ*.

La aplicación de la bioestimulación en suelos suele implicar la infiltración o inyección de agua subterránea o agua no contaminada en mezcla con nutrientes y saturada de oxígeno disuelto u otra fuente de oxígeno, tales como Peróxido de Hidrógeno. Normalmente se utiliza un sistema de infiltración o riego por aspersión para suelos superficiales contaminados. Se requiere de pozos de inyección para los suelos con mayor compromiso de contaminación.

En climas fríos, la temperatura baja retarda el proceso de remediación. Para los sitios contaminados con baja temperatura del suelo, pueden ser utilizadas mantas de calor para cubrir la superficie del suelo, aumentando así la temperatura y la velocidad de degradación.

Esta técnica puede ser clasificada como una tecnología a largo plazo que puede tomar varios años para la limpieza de una pluma.

Es un método conocido y efectivo para tratar aguas y subsuelo que han padecido vertidos de hidrocarburos, como también para la bioestabilización de metales en los estratos anaerobios del suelo.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Ha sido utilizada con éxito para remediar los suelos, lodos y aguas subterráneas contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo, solventes, pesticidas, conservantes de la madera y otros productos químicos orgánicos. Estudios a escala piloto han demostrado la eficacia de la degradación microbiana anaeróbica de nitrotoluenos en suelos contaminados con residuos de municiones. Los grupos de contaminantes tratados con mayor frecuencia son los HAP, SVOCs (sin incluir los hidrocarburos aromáticos policíclicos) y BTEX.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Tecnología *In Situ*, no requiere excavación ni transporte de suelos, resultando en menos perturbación de las actividades y presentando un ahorro significativo sobre otros métodos que implican excavación y disposición.
- Tanto el agua subterránea contaminada y el suelo pueden ser tratadas simultáneamente, proporcionando ventajas adicionales de costos.

Desventajas:

- El objetivo de remediación puede verse limitado si la matriz del suelo no permite el contacto contaminante-microorganismo.
- La circulación de soluciones acuosas a través del suelo puede aumentar la movilidad del contaminante.
- La colonización microbiana en los pozos de inyección puede causar la obstrucción de los mismos.
- Caminos preferenciales de flujo pueden disminuir severamente el contacto entre los fluidos inyectados y contaminantes a través de las zonas contaminadas. El sistema no es recomendado para suelos arcillosos, subsuelo altamente estratificado o heterogéneo, debido a limitaciones en la disponibilidad de transferencia de oxígeno (o aceptor de electrones).
- Altas concentraciones de metales pesados, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos de cadena larga o sales inorgánicas son altamente tóxicos para los microorganismos.

Estimación de Costos Asociados

La limpieza de una pluma de contaminación puede tomar varios años. Su costo oscila entre 30 y 100 USD/m³. La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaugmentación podrían aumentar sus costos.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Enhanced Bioremediation

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-31.html>

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Universitat Autònoma de Barcelona

http://bioinformatica.uab.es/biocomputacio/treballs02-03/RBurgos/dades/aplicaciones_actuales.htm

Descripción

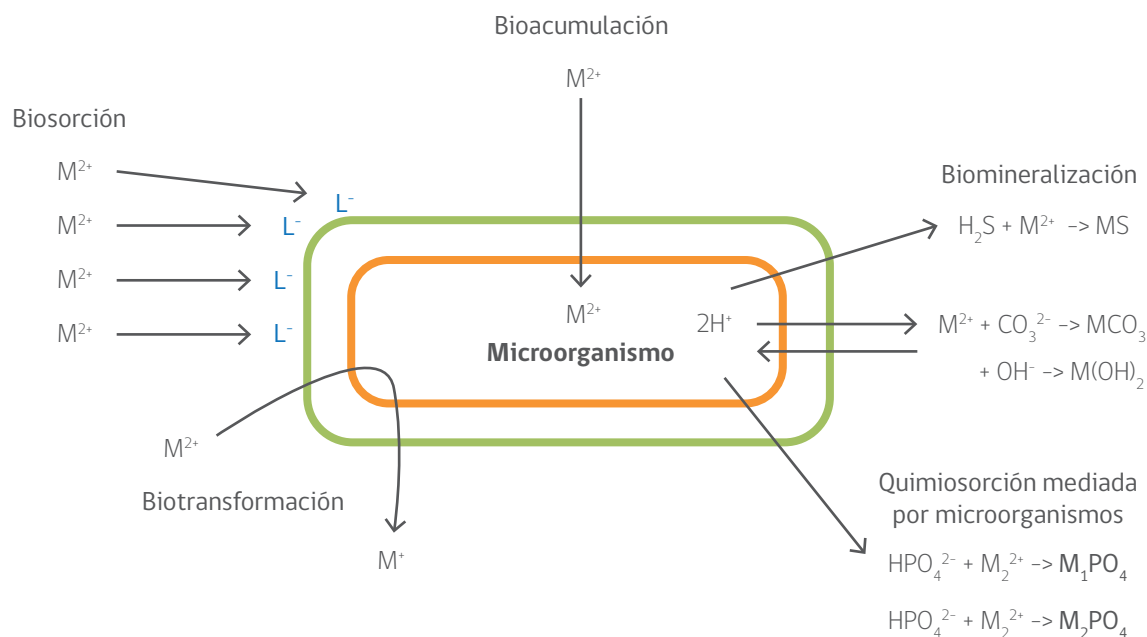
Los microorganismos están íntimamente relacionados con la biogeoquímica de los metales a través de una serie de procesos que determinan su movilidad y biodisponibilidad. Al contrario que los compuestos orgánicos tóxicos, los microorganismos no pueden degradar ni destruir metales o cualquier otro compuesto inorgánico, pero sí pueden controlar su especiación y transformación a formas más o menos tóxicas mediante mecanismos de oxidación, reducción, metilación, dimetilación, formación de complejos, biosorción y acumulación intracelular. En consecuencia, estos procesos controlan la movilización o inmovilización de metales en suelos y pueden ser utilizados para realizar tratamientos de biorrecuperación.

Los microorganismos pueden movilizar metales a través de lavado, quelación por metabolitos microbianos y sideróforos (compuesto quelante de hierro secretado por microorganismos), transformaciones bajo condiciones especiales de potenciales de óxido-reducción (rédox), metilación y consecuente volatilización. Dichos procesos pueden dar lugar a la disolución de compuestos metálicos insolubles y minerales, incluidos óxidos, fosfatos, sulfuros y menas metálicas, y a la desorción de los metales de arcillas o materia orgánica del suelo.

Los microorganismos también pueden inmovilizar metales pesados a través de su capacidad para reducir estos elementos a un estado redox más bajo, generando especies metálicas menos bioactivas y con claras aplicaciones en biorrecuperación. En este proceso, los microorganismos utilizan los metales como aceptores de electrones y acoplan su reducción a la oxidación de ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 o compuestos aromáticos, con lo que este proceso también puede contribuir a la biodegradación de compuestos orgánicos tóxicos.

La precipitación microbiológica de metales puede ser tanto el resultado de la reducción disimilatoria microbiana, en la que la forma metálica resultante termina en el medio extracelular, como la consecuencia secundaria de procesos metabólicos no relacionados con el metal en cuestión.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Las bacterias anaerobias sulfato reductoras dan lugar a la formación de sulfuros que inmovilizan metales como el Zn, el Cd o el Cu y han sido utilizadas con éxito en el tratamiento de aguas y lixiviados en biorreactores y estudios piloto en laboratorio. La mayoría de los estudios relacionados con la precipitación en forma de fosfatos se ha realizado con la bacteria *Citrobacter*, aislada de un suelo contaminado con metales, que posee potencial para ser utilizada en tratamientos de biorecuperación. Asimismo, determinados hongos producen oxalato cálcico, que controla la disponibilidad de fosfato, y otros oxalatos metálicos capaces de secuestrar diferentes metales como Cd, Co, Cu, Mn, Sr y Zn.

Se ha empleado también la modificación genética de bacterias para promover la inmovilización *In Situ* a través de biosorción de metales pesados, como el Cd, en suelos moderadamente contaminados que podrían volver a ser utilizados con fines agrícolas y se está explorando el biotratamiento conjunto de metales y compuestos orgánicos tóxicos, contaminantes que frecuentemente coexisten en suelos.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- El sistema se auto-restablece debido al aumento de la población bacteriana.
- Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados.
- La actividad metabólica puede ser la única forma de lograr cambios en estado de valencia o degradar compuestos orgánico-metálicos.
- Se puede emplear dos o más organismos de una manera sinérgica.

Desventajas:

- Sólo se pueden tratar metales a bajas concentraciones debido a su toxicidad (dependiendo de la resistencia de los microorganismos).
- Se necesitan nutrientes (como fuente de carbono) para el crecimiento.
- Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales impidiendo la precipitación.
- La recuperación de los metales por desorción es limitada, debido a que pueden formar uniones intracelulares.

Estimación de Costos Asociados

Al ser esa técnica una biorremediación, sus costos pueden variar entre 25 - 105 USD/m³ de suelo. Dependerá el costo de esta tecnología de los costos de la fuente de carbono.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Ortiz I, et al. Técnicas de recuperación de suelos contaminados

<http://www.madrimasd.org>

Universidad de Buenos Aires

<http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/Actualizaciones/metales/metales.htm>

Revista Latinoamericana de Microbiología

<http://es.scribd.com/doc/30772035/Biosorcion-de-metales-pesados-mediante-el-uso-de-biomasa-microbiana>

Universidad de Granada

<http://edafologia.ugr.es/desconta/bioremediacion.pdf>

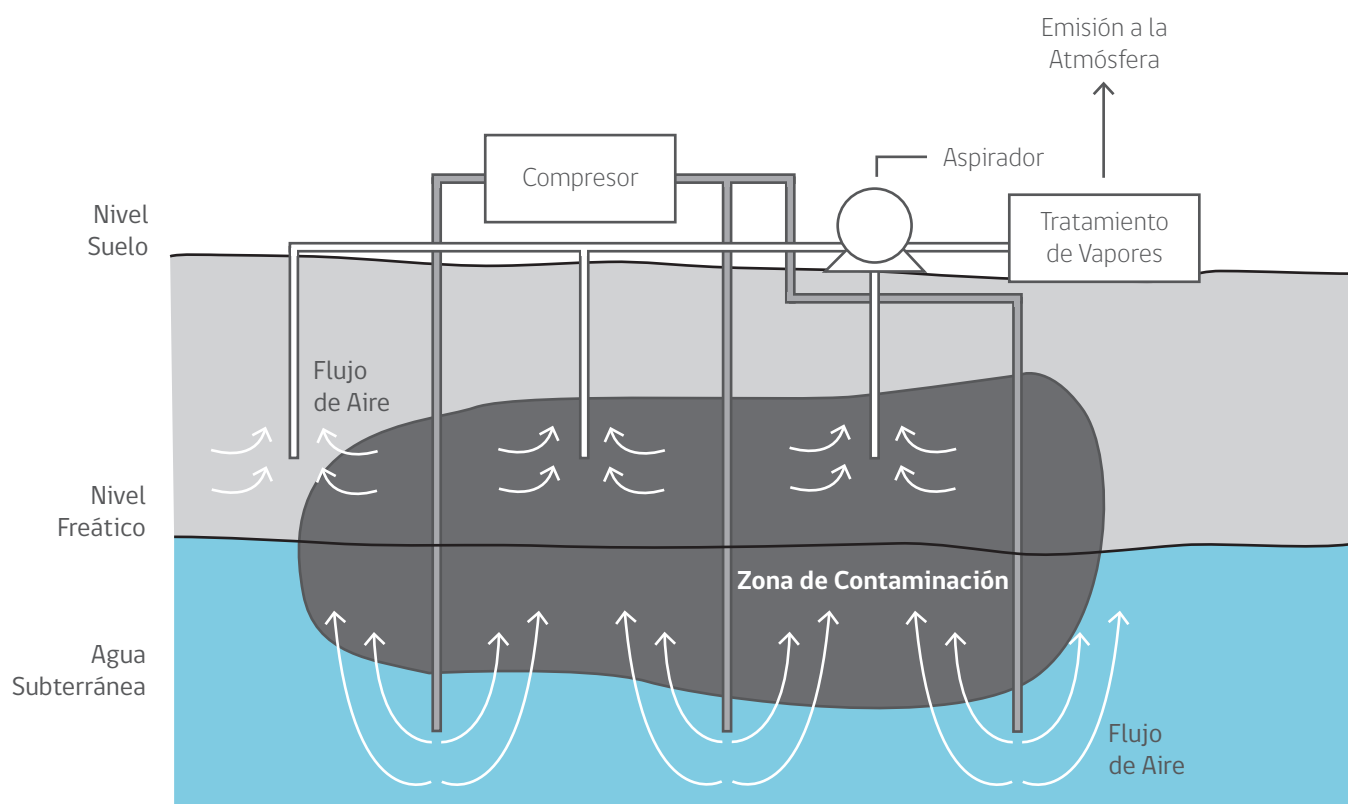
Descripción

La tecnología de la bioventilación es relativamente nueva y su objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias.

El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos, por movimiento forzado (extracción o inyección) y con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores.

Otra alternativa para llevar a cabo la bioventilación es el uso de oxigenantes químicos, como el H_2O_2 , que en su reacción libera oxígeno y agua. Una limitante en el uso del peróxido es su rápida descomposición a H_2O y O_2 , incluso algunas sustancias del suelo pueden ayudar a su catálisis, como el hierro, el cobre y las enzimas catalasas, esto produce una rápida liberación del oxígeno que forma rápidamente burbujas, debido a su baja solubilidad, por lo que no se transporta eficientemente a los microorganismos.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables semi volátiles o no volátiles. Además de favorecer la degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradar COV, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo.

Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con HTP, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Como el objetivo de esta práctica es estimular a los microorganismos aerobios presentes en el área degradada, para así acelerar la biodegradación, no se requiere introducir microorganismos exógenos.

Desventajas:

- Suelos de baja permeabilidad reducen la eficiencia de esta tecnología.
- La acumulación de vapores en el radio de influencia de los pozos de inyección de aire puede requerir la extracción de aire.
- Baja humedad del suelo puede limitar la eficiencia de la bioventilación.
- Puede ser requerido un monitoreo de los gases residuales en la superficie.
- La biodegradación aeróbica de la mayoría de los compuestos clorados puede no ser eficaz, a menos que esté presente un co-metabolito, o un ciclo anaeróbico.
- Bajas temperaturas pueden retardar la remediación.

Estimación de Costos Asociados

Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años y sus costos de operación varían entre 10 y 70 USD/m³.

Esta tecnología no requiere de equipo de alto valor, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Bioventing

http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

New Mexico environment department

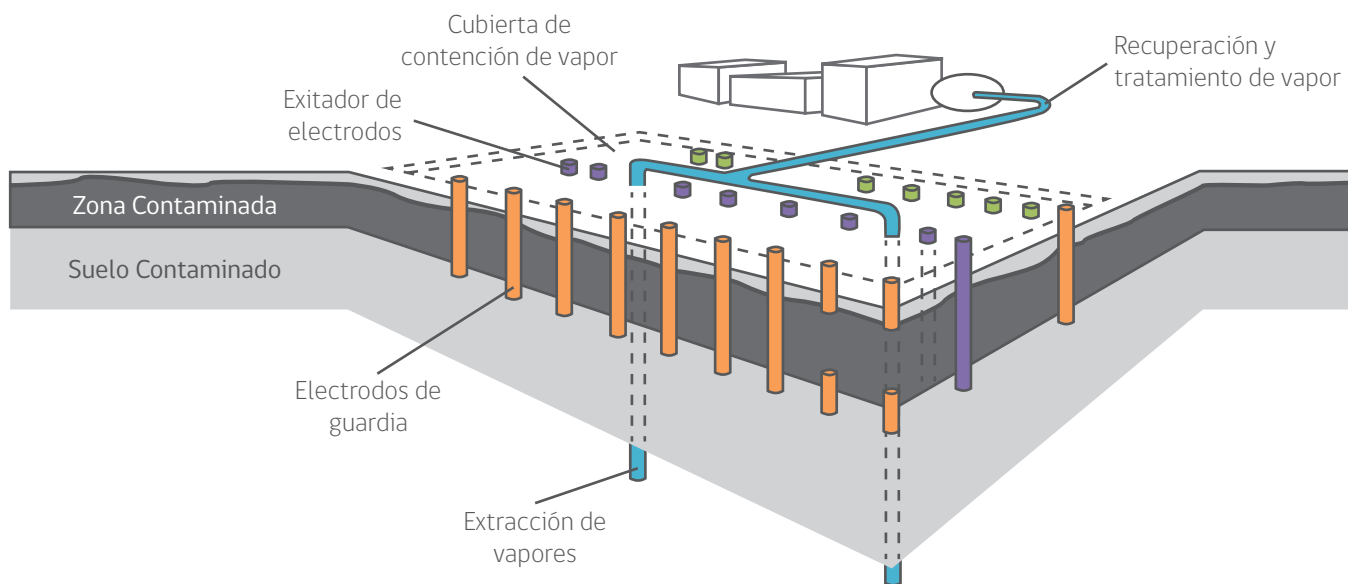
<http://www.nmenv.state.nm.us/ust/ustbtop.html>

Descripción

Esta tecnología se basa en calentar el suelo y/o las aguas subterráneas contaminadas para poder extraer los contaminantes volátiles y semi-volátiles. Al aumentar la temperatura del suelo, la presión de vapor de los compuestos orgánicos crece, causando una distribución a estado gaseoso. Además, el incremento en la temperatura disminuye la viscosidad y la adsorción por parte del suelo y aumenta la solubilidad, favoreciendo el proceso de separación de los compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles. El efluente gaseoso producido debe ser recolectado por pozos de extracción y posteriormente tratado. Existen diversos métodos para calentar el suelo, incluyendo:

- **Calentamiento por Conducción Térmica:** La transferencia de calor hacia el suelo se provoca mediante el calentamiento de pozos de acero contruidos con tubos cerrados en la base. Éstos pueden aplicar vacío para succionar los vapores generados en el proceso. En caso de que la zona contaminada sea poco profunda (90 cm áprox.) se usan mantas calefactoras. Para producir calor se instala una unidad que calienta por resistencia dentro de los pozos y se le aplica corriente. A medida que se calienta, el calor se transfiere por radiación al tubo que a su vez transfiere calor por conducción hacia el suelo circundante. La unidad de calentamiento trabaja con temperaturas que van desde los 540 a los 815°C.
- **Calentamiento por Radio Frecuencia (RF):** Se utiliza un campo eléctrico alterno de alta frecuencia para calentar el suelo contaminado, evaporar y movilizar los químicos orgánicos nocivos. Esta técnica es adecuada sólo para calentar sustancias que no conduzcan electricidad. Al aplicar un campo eléctrico al suelo, se produce movimiento de las cargas de las moléculas polares, y esta vibración genera energía mecánica que se disipa como calor. En estas tecnologías se tienen que instalar pozos de extracción para los gases contaminados, una fuente de energía por radio frecuencia y un sistema de aplicación (antenas o electrodos). Con este método se puede calentar el suelo a temperaturas que superan los 300°C. Dependiendo de la configuración de los electrodos, se puede instalar una o más filas de electrodos.
- **Calentamiento por Resistencia Eléctrica:** Mediante electrodos se pasa corriente a través del suelo contaminado. A medida que fluye la corriente, la resistencia que opone el suelo genera calor. Este sistema se puede desplegar a cualquier profundidad y se puede utilizar en zonas saturadas y no saturadas. Si se usa en zonas no saturadas, hay que agregar agua para conservar el suelo húmedo, y con ello, mantener la conductividad. Con este método se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 100°C. Los vapores producidos se extraen por vacío para su posterior tratamiento en la superficie.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

El uso principalmente es para tratar COV's y SCOV's. Adicionalmente, se han utilizado para tratar BPC, HAP, dioxinas, pesticidas, herbicidas, combustibles, solventes clorados, lubricantes y aceites. Asimismo, son útiles para tratar LFNA.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Los tiempos de tratamiento son más cortos que otros tipos de tecnologías.
- Al ser tratamientos *In Situ*, no se debe excavar y transportar el suelo.
- Se puede obtener eficiencias de remoción cercanas al 100%.
- Aplicables en suelos con alto contenido de humedad, una limitación para otras técnicas de remediación.
- Después de la aplicación de estas técnicas, las condiciones del subsuelo son buenas para la biodegradación de los contaminantes residuales.

Desventajas:

- La eliminación de ciertos contaminantes depende de la temperatura alcanzada por el proceso escogido.
- Suelos compactados o con un alto contenido de humedad tienen una baja permeabilidad al aire, lo que dificulta el proceso y hace que requieran más entrada de energía para aumentar la extracción por vacío y la temperatura.
- Generan vapores que deben ser recolectados y tratados, lo que aumenta los costos.
- Suelos con un alto contenido de materia orgánica tienen una alta capacidad de sorción de COV, lo que resulta en tasas de remoción reducidas.
- Al ser procesos *In Situ*, existe menos certeza sobre la uniformidad del tratamiento en el área de interés.

Estimación de Costos Asociados

Los costos dependen principalmente del tipo de suelo, de la profundidad de la zona contaminada y del área a tratar. Suelos de baja permeabilidad son más económicos de remediar, ya que requieren menos flujo de gas. Por otra parte, mientras más profundo se encuentra la contaminación y más grande sea el terreno contaminado, más costoso será el proceso.

Referencias/Más Información/Links de Interés

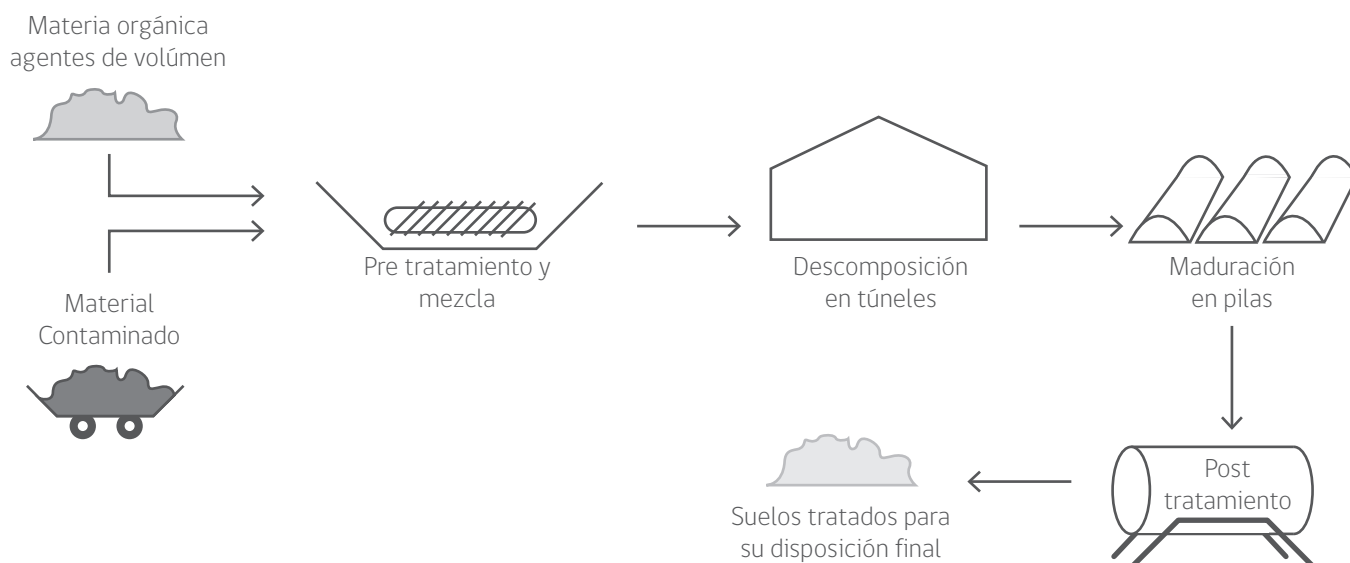
USEPA, 2006. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil. EPA 542/F-06/013
Stegemeier, G.L., Vinegar, H.J. 2001. Thermal Conduction Heating for In Situ Thermal Desorption of Soils. Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook.
LaChance, J., Baker, R.S., Galligan, J.P., Bierschenk, J.M. Application of "Thermal Conductive Heating/In-Situ Thermal Desorption (ISTD)" to the Remediation of Chlorinated Volatile Organic Compounds in Saturated and Unsaturated Settings.
Wolf, J., Barton, T., Gomes, T., Damasi, D. Electrical Resistance Heating: Rapid Treatment for Soil and Groundwater Remediation.

Descripción

El compostaje es un proceso biológico controlado mediante el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con contaminantes orgánicos (por ejemplo, hidrocarburos aromáticos policíclicos), a través de la estimulación de la actividad biodegradadora de las poblaciones microbianas presentes en el medio, bajo condiciones aeróbicas y/o anaeróbicas, transformándolos en subproductos inocuos estables.

El material contaminado se mezcla con agentes de volumen como por ejemplo paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas y/u otras sustancias orgánicas sólidas biodegradables adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso. Es necesario mantener las condiciones termófilas (54 a 65 °C) para un correcto proceso de compostaje. La degradación máxima se alcanza a través de la oxigenación, el riego, según sea necesario, y el monitoreo constante de la humedad y la temperatura en el sistema.

Los sistemas de compostaje incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas.

Esquema de Operación/Figura

COMPOSTAJE (BIORREMEDIACIÓN EN FASE SÓLIDA)

Descontaminación

Ex Situ

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

El compostaje se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con PCP, gasolinas, HTP y HAP. Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (TNT).

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- El diseño y la construcción son relativamente fáciles.
- El suelo remediado no requiere ser confinado después y, al degradarse, aporta nutrientes al suelo.

Desventajas:

- Necesidad de espacio.
- Necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de COV.
- Incremento volumétrico del material a tratar.
- No pueden tratarse metales pesados.

Estimación de Costos Asociados

El costo del compostaje está en función de:

1. La cantidad y fracción de suelo a tratar.
2. Disponibilidad de agentes de volumen.
3. Tipo de contaminantes y proceso.
4. Necesidad de tratamientos previos y/o posteriores.
5. Necesidad de equipos para el control de COV.

Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. Los costos se encuentran entre 130 y 260 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Composting

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-12.html>

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Proyecto BIOSOIL. Env/Es/000263

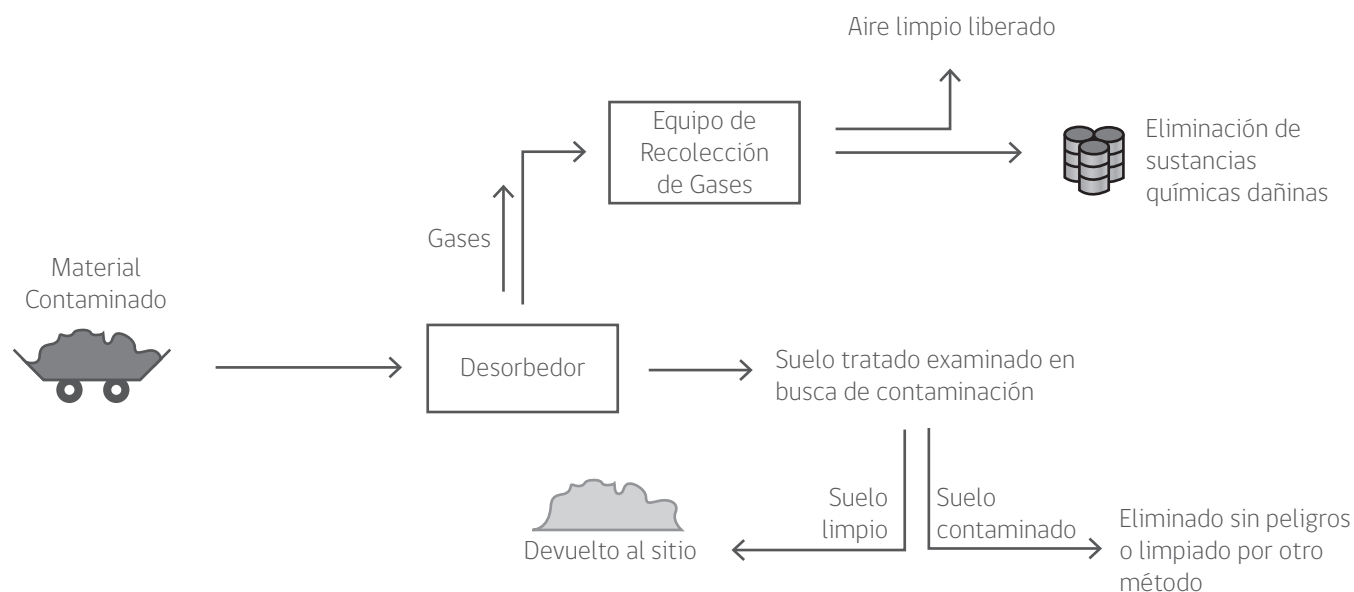
http://www.lifebiosoil.com/ca_tecnologia.asp

Descripción

El suelo contaminado es excavado y colocado en un desorbedor, aplicándose calor para volatilizar los contaminantes orgánicos y separarlos del suelo tratado. Mediante un gas de transporte o un sistema de vacío se extrae el agua y los contaminantes volatilizables hacia el sistema de tratamiento de gas.

Es un proceso de separación física en donde el tiempo de residencia y la temperatura del sistema están diseñados para volatilizar los contaminantes y no para oxidarlos o destruirlos.

Un diseño común de desorbedor es el secador rotatorio, el cual consiste en un tambor cilíndrico que generalmente está inclinado, en el cual el suelo a tratar puede ser calentado directa o indirectamente. En el secador rotatorio de calentamiento directo la tierra dentro del desorbedor se calienta por contacto directo con una llama o con una corriente de aire caliente que desorbe los contaminantes. En el tambor rotatorio de calentamiento indirecto se calienta el exterior del desorbedor, calentando y volatilizandolos contaminantes del suelo mezclado en su interior. Los contaminantes volatilizables son arrastrados por un gas de transporte inerte que sale del desorbedor hacia el sistema de tratamiento de gas. Dependiendo de la temperatura de operación del equipo, la desorción térmica se separa en baja y alta temperatura. En la desorción térmica de baja temperatura el suelo tratado se calienta entre 90 y 320°C y en la desorción térmica de alta temperatura el margen va desde los 320 a los 560°C.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

La desorción térmica de baja temperatura es indicada para COV's no halogenados, combustibles y en menor grado, semi volátiles.

La desorción térmica de alta temperatura se aplica para los SCOV's, BPC, HAP y pesticidas. Puede servir para remover metales volátiles como el Hg. También se pueden tratar COV's y combustibles, pero el proceso puede ser menos rentable.

Sirve para separar contaminantes orgánicos procedentes de desechos de refinería, desechos de alquitrán, desechos de la industria de la madera, suelos contaminados con creosota, hidrocarburos, pesticidas y desechos de pinturas.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

Elimina los contaminantes a muy bajas concentraciones. Se puede procesar una gran variedad de suelos y contaminantes. En la desorción térmica de baja temperatura el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, por lo que conserva su capacidad para soportar actividad biológica. Hay más certeza en la uniformidad del proceso en comparación a los tratamientos *In Situ*. Los tiempos de tratamiento generalmente son más cortos que otros procesos *In Situ*.

Desventajas:

Hay un tamaño específico de partículas y requerimientos de manejo de equipos que pueden impactar en la aplicabilidad y costos en sitios específicos. Puede ser necesario deshidratar el suelo para reducir la cantidad de energía necesaria para calentarlo. Suelos arcillosos y limosos y con alto contenido de humus necesitan más tiempo de reacción, debido a la unión de contaminantes. Los metales pesados pueden producir un residuo sólido que requiera de estabilización. Es necesario excavar el suelo, lo que incrementa los costos. Produce emisiones que deben ser tratadas. El cloro puede afectar la volatilización de algunos metales como el plomo.

Estimación de Costos Asociados

Los factores que más inciden en los costos del proceso son: la cantidad de suelo que requiere de tratamiento (escala del proceso) y el contenido de humedad (necesidad de suministro de calor extra encarece los costos en combustible).

Estimación de los costos de la aplicación de esta tecnología fluctúan entre 81 y 252 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0

http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

Environment Canada

<http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab13-e.html>

Miliarium Ingeniería Civil y Medio Ambiente

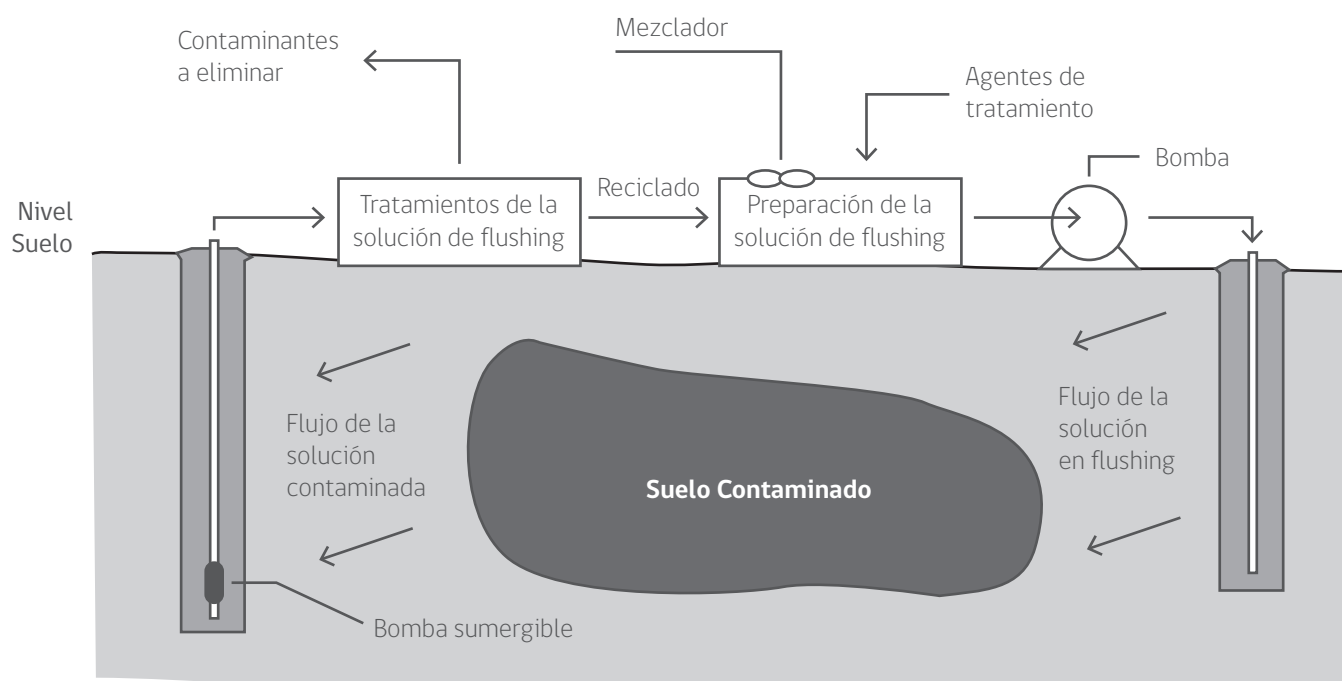
<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/DesorcionTermica.asp>

Vasile, L., Gavrilescu, M. 2008. Overview of ex situ Decontamination Techniques for Soil Cleanup. Environmental Engineering and Management Journal. Vol.7, No.6, 815-834.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., Villar, S. Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados.

Descripción

El enjuague del suelo *In Situ* ("Flushing") consiste en la extracción de los contaminantes del suelo mediante la inyección directa o inundación del suelo con agua u otras disoluciones de enjuague que ayuden a movilizar los contaminantes para su posterior bombeo a la superficie mediante pozos de extracción. La disolución de enjuague va a aumentar la movilidad de los contaminantes por el aumento de solubilidad, la formación de emulsiones o por reacciones químicas diversas y estará formada por agua o agua más aditivos. Los líquidos de extracción deben ser recuperados del acuífero subyacente, para su tratamiento, y cuando sea posible, su reciclaje en el proceso.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

El grupo de contaminantes objetivo para el lavado del suelo son los compuestos inorgánicos, incluidos los contaminantes radiactivos. La tecnología puede ser utilizada para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles, semi volátiles, combustibles y pesticidas, pero puede ser menos rentable que las tecnologías alternativas para estos grupos de contaminantes. La adición de tensoactivos ambientalmente compatibles puede ser utilizada para aumentar la solubilidad efectiva de algunos compuestos orgánicos, sin embargo, la solución de lavado puede alterar las propiedades físico-químicas del sistema suelo.

La tecnología ofrece el potencial de recuperación de metales y puede movilizar una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos a partir de suelos de grano grueso.

Esta técnica se aplica en suelos arenosos donde hay espacios intersticiales que permiten el paso de la disolución de lavado.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Crea un sistema cerrado que no es afectado por condiciones externas. Este sistema permite controlar las condiciones (como el pH y la temperatura) en las cuales se tratan las partículas del suelo.
- Permite el tratamiento *In Situ* de desechos peligrosos.
- Efectiva para una gran variedad de contaminantes del suelo.
- Es eficaz en función del costo. Puede usarse como tratamiento preliminar, reduciendo considerablemente la cantidad de material que necesitaría tratamiento posterior con otro método.
- Produce un material más uniforme al cual se aplicarán otras técnicas de tratamiento.

Desventajas:

- Baja permeabilidad o suelos heterogéneos son difíciles de tratar. Si el suelo tiene un alto porcentaje de limo o arcilla, la solución de enjuague no puede desplazarse fácilmente en su interior, de modo que no puede entrar en contacto fácilmente con los contaminantes. Eso limita la eficacia general del proceso de enjuague del suelo. Además, algunos líquidos de enjuague contienen aditivos que podrían contaminar el agua subterránea si no se retiran por completo.
- Los surfactantes pueden adherirse al suelo reduciendo la efectividad y la porosidad del suelo.
- Reacciones de la solución de lavado al contacto con el suelo contaminado puede reducir la movilidad de los contaminantes.
- Los costos de los procesos de separación y tratamiento para los fluidos recuperados pueden elevar el costo total de la tecnología.

Estimación de Costos Asociados

El principal factor que influye en el costo de esta tecnología es la permeabilidad del suelo. Los suelos con baja permeabilidad son menos aptos para el enjuague de suelo, por lo tanto, el tiempo de remediación puede ser significativamente mayor, incrementando los costos.

Estimación de los costos de la aplicación de esta tecnología fluctúan entre 23 y 63 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Soil Flushing

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-6.html>

Guía para el ciudadano sobre enjuague In Situ

http://www.clu-in.org/download/citizens/flushing_sp.pdf

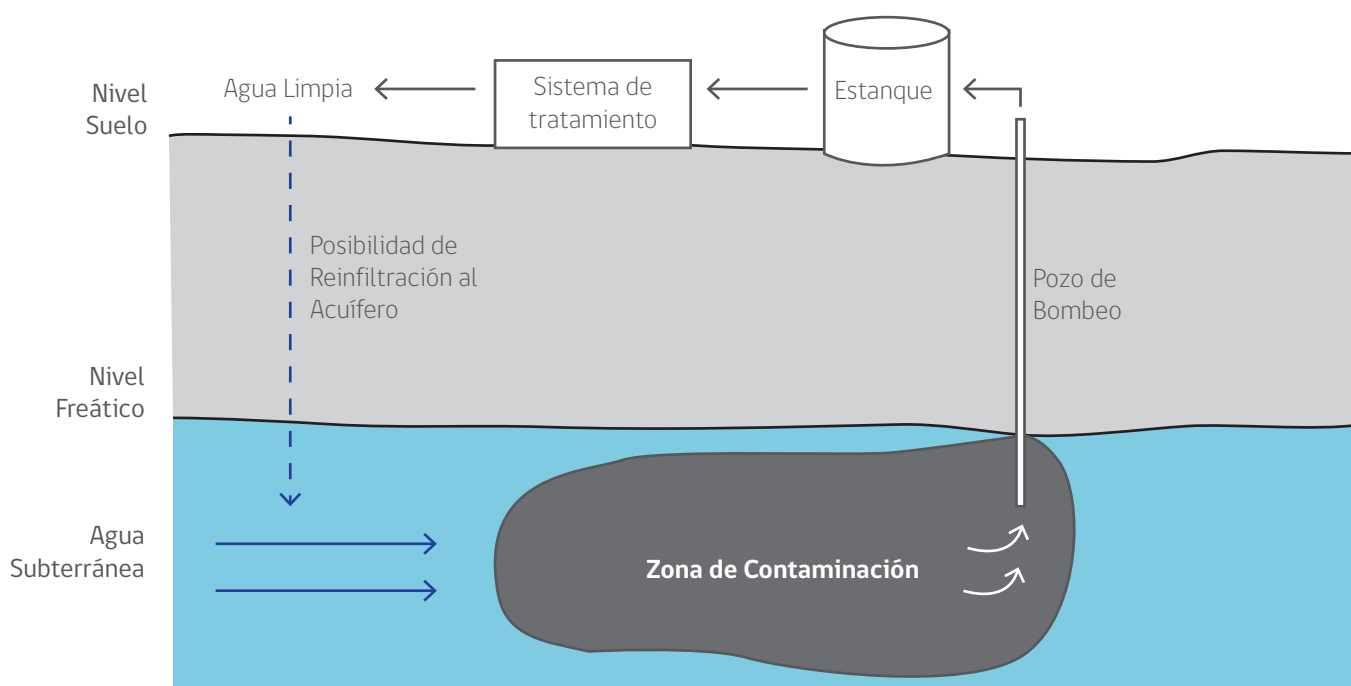
Descripción

Esta técnica consiste en extraer el agua contaminada del suelo y subsuelo. Cuando se trata la zona saturada, el agua es bombeada a la superficie para su posterior tratamiento, conocido con el término de "Pump & Treat". Cuando se busca actuar sobre la zona no saturada, normalmente se hace una inyección previa de agua, por gravedad o a presión, que arrastre y lave los elementos contaminantes del suelo y que los almacene en la zona saturada para ser posteriormente bombeada a la superficie.

Dependiendo del terreno, del tipo de contaminación y de la recuperación que se quiera realizar, la extracción de agua se puede llevar a cabo mediante pozo, drenes y zanjas de drenaje. En cualquier caso, una vez tratada, el agua extraída puede ser parcialmente reinfiltrada en el suelo para contrarrestar efectos negativos de la extracción como la disminución del nivel freático, el posible asentamiento del suelo, ecosistemas dañados por pérdida de humedad, etc. La disminución en el nivel freático puede ser beneficioso si los contaminantes quedan retenidos en el suelo por encima de este nivel y no pasan a formar parte del acuífero.

En su modalidad On Site el tratamiento del agua extraída se realiza en instalaciones ubicadas en el lugar de extracción y, después de haberla descontaminado, se retorna esta agua al ciclo natural.

Para la etapa de tratamiento se dispone de diferentes tecnologías. El tratamiento de las aguas se diferencia principalmente por las características químicas y físicas de la sustancia nociva, siendo los sistemas mencionados a continuación los más comunes: Biorreactores, Humedales artificiales, Adsorción/Absorción, Air Stripping, Intercambio iónico, Precipitación/Coagulación/Floculación, Separación *Ex Situ*. Destilación, Filtración/Ultrafiltración/Microfiltración, Cristalización, Osmosis reversa, entre otras.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Normalmente, los sistemas "Pump & Treat" se utilizan para aguas subterráneas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles, combustibles y metales.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Dado que la tecnología del tratamiento es externa, no depende de las condiciones naturales en el subsuelo, si no que se pueden optimizar y establecer en los equipos de tratamiento exterior, según las sustancias a extraer.

Desventajas:

- No es aplicable en terrenos fracturados o suelos arcillosos.
- Baja eficacia en la eliminación de compuestos poco solubles: para la purificación se debe elevar y extraer el agua subterránea hacia el exterior, lo que significa que solamente se pueden eliminar aquellas sustancias nocivas que se encuentran disueltas en el agua o mezcladas en forma de fase, emulsión o suspensión.
- Dificultad en el diseño y emplazamiento de los pozos (número, disposición, espaciado).
- Problemas derivados de la geología de la zona.
- Existe riesgo de desplazamiento de otros contaminantes a la zona tratada.
- El tiempo potencialmente largo necesario para alcanzar el objetivo de remediación
- Los contaminantes tienden a ser sorbidos en la matriz del suelo.
- El costo de los sistemas de tratamiento es alto.

Estimación de Costos Asociados

El valor exacto de costos asociados no se encuentra en bibliografía.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Técnicas de recuperación de suelos contaminados

http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Ground Water Pumping/Pump and Treat

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-48.html>

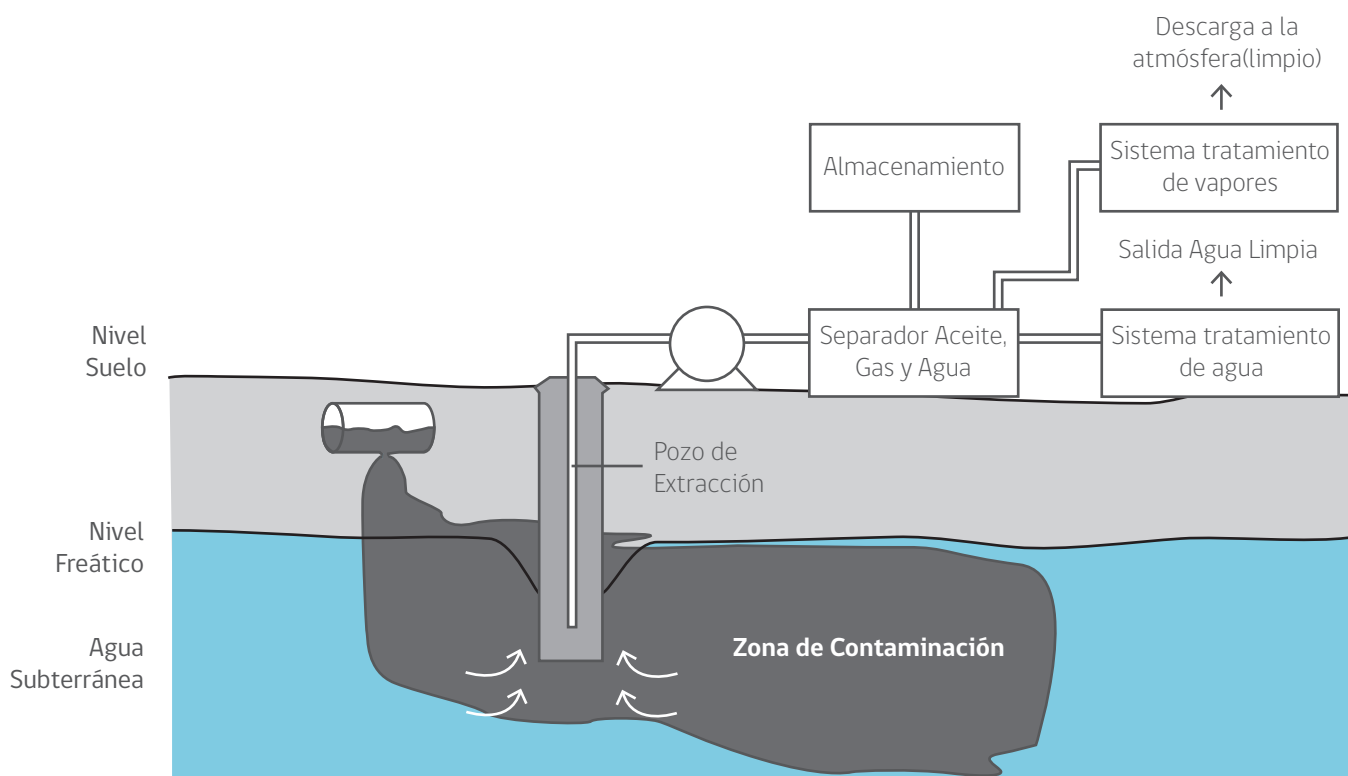
Descripción

La extracción Multifase (MPE) es un término genérico para las tecnologías que extraen en simultáneo compuestos orgánicos volátiles en el vapor del suelo y en las aguas subterráneas.

Esta tecnología utiliza un sistema de vacío que produce una reducción del nivel freático alrededor del pozo donde se aplica, exponiendo mayor parte de la formación. Los contaminantes en la nueva zona no saturada expuesta son entonces accesibles a la extracción de vapor. Una vez en la superficie, se separan y tratan los vapores orgánicos o sustancias orgánicas en fase líquida y el agua subterránea.

La MPE puede ser diseñada y aplicado en una variedad de configuraciones:

- **Configuración de una sola bomba:** En la configuración de una sola bomba, se emplea solo un tubo de caída para extraer líquido y vapor a partir de un solo pozo. El vacío y altura de aspiración de líquido se consigue mediante una bomba de vacío. Esta configuración se limita a una profundidad de unos 9 metros por debajo de la superficie del suelo. Por lo tanto, las configuraciones de una sola bomba se utilizan para la remediación niveles freáticos de poca profundidad (menos de 9 metros).
- **Configuración de dos bombas (Extracción Dual):** Las limitaciones de profundidad anteriores se pueden superar con la configuración de dos bombas. Este sistema utiliza una bomba sumergible para la recuperación de las aguas subterráneas en conjunción con un vacío aplicado por separado en la cabeza del pozo sellado.
- **Bioslurping:** Esta configuración es idéntica a la de una sola bomba, sin embargo, el tubo de caída en una aplicación bioslurping se fija en, o justo por debajo de, la interfase líquido-aire. Esta configuración ha demostrado ser eficaz en la recuperación de producto libre. Otro objetivo de esta configuración es la mejora de la biodegradación aeróbica *In Situ* de hidrocarburos aromáticos como resultado de un flujo mayor de aire.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

La aplicabilidad de la MPE se rige principalmente por las propiedades del medio y, en menor medida, por las propiedades del o los contaminantes.

Se aplica en acuíferos contaminados con hidrocarburos, TCE, PCE, 1,2-DCE.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Efectiva en suelos de permeabilidad moderada a baja.
- Eliminación efectiva de la fuente en sitios de baja permeabilidad donde la única otra opción viable de remediación sería la excavación.
- Efectiva en la remediación simultánea de fases de contaminación disueltas, de vapor, residuales y no acuosas.
- Genera un radio de influencia potencialmente grande y una mayor zona de captura.
- Aumenta la recuperación total de fluidos, minimiza el retiro y las manchas de producto libre, y maximiza la transmisividad del acuífero en la boca de pozo.
- Reduce el número de pozos de recuperación requeridos.
- Efectiva para remediación de la zona capilar.
- Acorta la duración de la remediación en comparación con estrategias convencionales de bombeo.

Desventajas:

- Requiere bomba de vacío o ventilador.
- Requerimientos de tratamiento potencialmente mayores como resultado de emulsiones de NAPL y de vapores cargados de COV (es decir, separación de fase líquida y tratamiento de vapores).
- La puesta en marcha y los períodos de ajuste pueden ser más largos comparado con estrategias de bombeo tradicionales.
- Costos de capital potencialmente más altos en comparación con estrategias de bombeo convencionales.
- Limitaciones de profundidad de aplicación.

Estimación de Costos Asociados

10 a 75 USD por 4,5 L de producto recobrado vs. 250 USD por galón para métodos tradicionales

Referencias/Más Información/Links de Interés

http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/multi-phase_extraction/cat/Overview/

Suthersan, S.S. Remediation Engineering: Design Concepts. CRC Press, Inc., 1997.

U.S. Environmental Protection Agency. How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites: A Guide for State Regulators. Fuente: <http://desarrollo-sustentable-esme.blogspot.com/2010/12/forremediacion.html>

U.S. Environmental Protection Agency. Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor

Extraction. EPA-542-R-97-007. September, 1997b.

U.S. Environmental Protection Agency. Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multiphase Extraction (MPE) Technology for VOCs in Soil and Groundwater. EPA 540-F-97-004. April, 1997c.

Descripción

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes. Puede ser utilizado para contaminante de tipo orgánico e inorgánico en suelos, lodos y sedimentos y puede aplicarse tanto *In Situ* como *Ex Situ*.

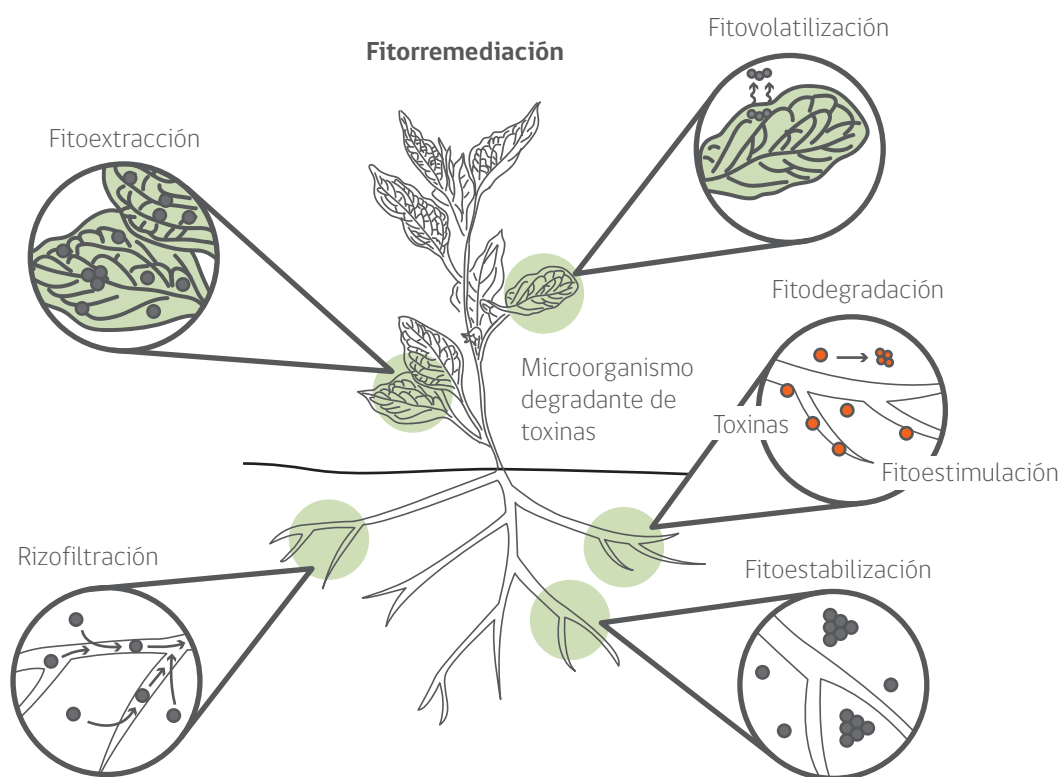
Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización.

La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica.

En la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas. Luego las plantas fitoextractoras pueden ser cosechadas, quemadas y dispuestas.

En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo.

La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos, como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAP; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr (VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn.

Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Bajo costo.
- Los metales absorbidos pueden ser reciclados.
- Se puede aplicar a una gran variedad de contaminantes.
- Reduce la entrada de contaminantes al ambiente y salida al sistema de aguas subterráneas debido a que los contaminantes quedan en la planta.

Desventajas:

- El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar.
- Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas.
- Puede depender de la estación del año.
- No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos.
- La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

Estimación de Costos Asociados

A modo de referencia, se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar entre 24.000 y 40.000 USD/ha.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Phytoremediation

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Universidad Autónoma de México

<http://www.redalyc.org/redalyc/pdf/695/69520110.pdf>

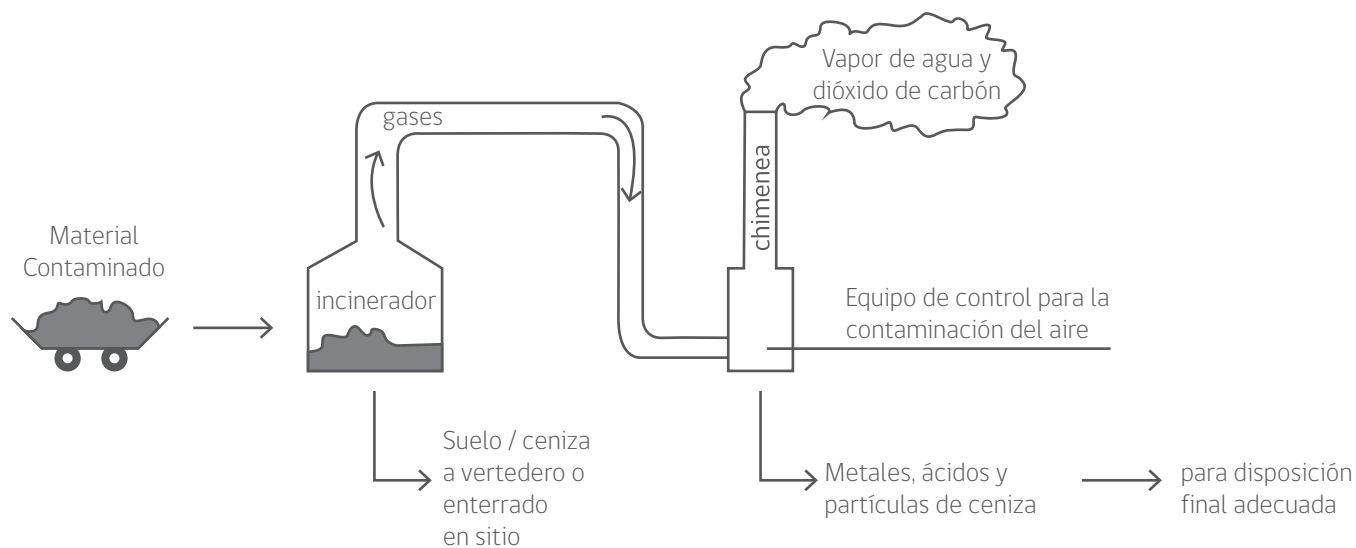
Descripción

Es un tratamiento *Ex Situ* en el que el suelo excavado se somete a elevadas temperaturas. Los equipos incineradores son dispositivos que operan con temperaturas que van desde los 760 a los 1.200 °C para volatilizar y quemar compuestos halogenados y otros orgánicos refractarios. Los gases residuales de la combustión requieren de tratamiento posterior.

Las configuraciones más típicas de incineradores son:

- **Combustor de Lecho Circulante:** Usa aire a alta velocidad para arrastrar y movilizar los sólidos y crear una zona de combustión turbulenta que destruye los hidrocarburos contaminantes. La turbulencia produce que la temperatura se distribuya de manera uniforme en la cámara de combustión. Los combustores de lecho circulante operan con temperaturas entre 780 a 870 °C.
- **Lecho Fluidizado:** Usa aire a alta velocidad para suspender las partículas sólidas. Funciona a temperaturas arriba de los 870 °C. Otras unidades calientan elementos o tubos por resistencia eléctrica, para calentar el suelo que pasa a través de una cámara sobre una cinta transportadora.
- **Unidad de Combustión Infrarroja:** Barras de carburo de silicio cargadas eléctricamente calientan los contaminantes a temperaturas de combustión. El suelo contaminado se expone al calor radiante por infrarrojo emitido por las barras de carburo de silicio y se calienta por sobre los 1010 °C.
- **Horno Rotatorio:** Los hornos rotatorios son los más usados comercialmente y son tambores cilíndricos con una leve inclinación que sirven como cámaras de combustión. Operan con temperaturas superiores a los 980 °C y están equipados con un dispositivo de post-combustión, un extintor y un sistema para el control del aire contaminado.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Suelos contaminados con explosivos y residuos peligrosos, particularmente hidrocarburos clorados, BPC y dioxinas.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- La eficiencia de destrucción es mayor a 99%.
- La cantidad de material que requiere de eliminación luego del tratamiento es mucho menor a la cantidad original de material contaminado.
- Los tiempos de tratamiento generalmente son más cortos que los procesos *In Situ*.
- Hay más certeza en la uniformidad del proceso en comparación a los tratamientos *In Situ*.

Desventajas:

- Para BPC y dioxinas debe usarse un incinerador fuera del sitio.
- Especificaciones y requerimientos para el manejo de equipos que pueden impactar en la aplicabilidad y costos en sitios específicos.
- Es necesario un sistema para tratar los gases producidos.
- Metales pesados pueden producir cenizas que requieran estabilización.
- Los metales pueden reaccionar con otros elementos, como cloro o azufre, formando compuestos más volátiles y tóxicos.
- Esta técnica destruye la estructura del suelo, lo que limita su reutilización.
- Es necesario excavar el suelo, lo que impacta en los costos.

Estimación de Costos Asociados

La cantidad de suelo que requiere de tratamiento es el principal factor que influye en los costos.

Estimación de los costos de la aplicación de esta tecnología fluctúan entre 900 y 1400 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0

http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

USEPA. CLU-IN

<http://www.clu-in.org/remediation/>

Miliarium Ingeniería Civil y Medio Ambiente

<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/Incineracion.asp>

Vasile, L., Gavrilescu, M. 2008. Overview of ex situ Decontamination Techniques for Soil Cleanup. Environmental Engineering and Management Journal. Vol.7, No.6, 815-834.

USEPA, 1997. Best Management Practices (BMPs) for Soil Treatment Technologies: Suggested Operational Guidelines to Prevent Cross-media Transfer of Contaminants During Clean-UP Activities. EPA/530/R-97/007.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., Villar, S. Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados.

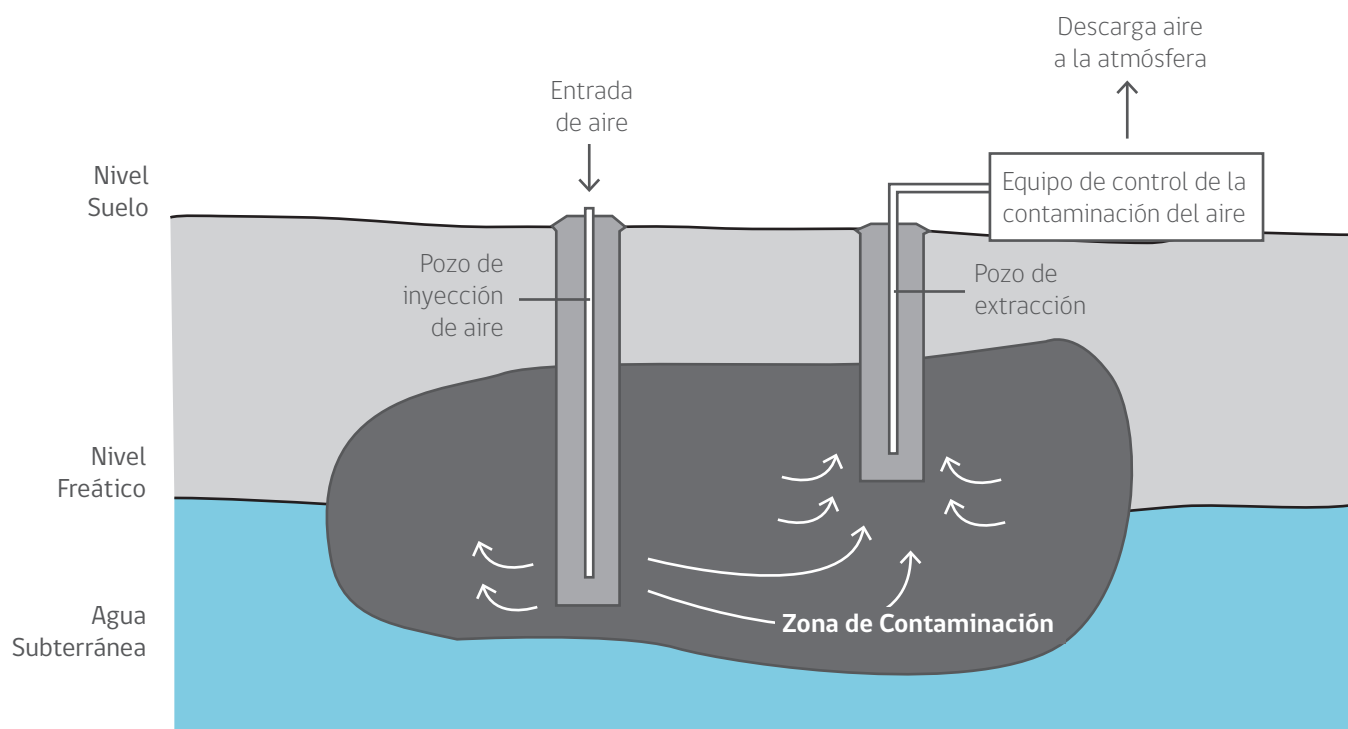
Volke, T., Velasco, J.A. 2002. Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados.

Descripción

Estas tecnologías inyectan vapor, aire caliente o agua caliente a la zona contaminada, para poder eliminar los contaminantes. La teoría es similar a la de los procesos de calentamiento, sólo que se inyecta vapor o aire o agua caliente para calentar el suelo y poder extraer los contaminantes orgánicos volátiles. Los pozos de extracción también son una parte integral del proceso para poder remover los contaminantes movilizados.

Los tipos de inyección más usados son:

- **Inyección de Vapor:** Se fuerza la entrada de vapor a través de pozos a la zona contaminada. El vapor calienta el subsuelo y las aguas subterráneas y mejora la extracción de los contaminantes, disminuyendo su viscosidad y acelerando su volatilización. Además, la inyección de vapor caliente puede destruir algunos de los contaminantes. A medida que se inyecta vapor a los pozos, el frente de vapor impulsa los contaminantes a un sistema de extracción.
- **Inyección de Aire Caliente:** Se inyecta aire caliente debajo de la zona contaminada, para elevar la temperatura del suelo. El aire caliente volatiliza los contaminantes orgánicos, mejorando su liberación de la matriz de suelo. A medida que la aplicación es más profunda, el aire caliente se inyecta a mayor presión por los pozos.
- **Inyección de Agua Caliente:** Al igual que las otras dos técnicas, inyecta agua caliente a través de pozos para calentar el suelo contaminado y facilitar la liberación de los contaminantes. El agua caliente también desplaza fluidos, incluyendo líquidos de fase no acuosa, y disminuye la viscosidad de los contaminantes, lo que acelera el proceso de remediación debido a que mejora la recuperación.

Esquema de Operación/Figura

INYECCIÓN DE VAPOR/AGUA CALIENTE/AIRE CALIENTE

Descontaminación

In Situ

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Se utilizan principalmente para el tratamiento de suelos contaminados con VOC`S, SVOC`S, LFNA, pesticidas y combustibles.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Sirve para suelos con alto contenido de humedad.
- En muchos casos aumentar la temperatura del suelo por sobre la temperatura ambiente, puede incentivar la biorremediación natural.
- Al ser tratamientos *In Situ*, no se debe excavar y transportar el suelo.
- Los tiempos de tratamiento son más cortos en comparación a otras tecnologías *In Situ*.

Desventajas:

- La eliminación de ciertos contaminantes depende de la temperatura alcanzada por el proceso escogido.
- El proceso de inyección de aire caliente está limitado por la baja capacidad calorífica del aire.
- Suelos con permeabilidades muy variables pueden resultar en una alimentación irregular del flujo de aire a las regiones contaminadas.
- Suelos compactados o con un alto contenido de humedad, tienen una baja permeabilidad al aire, lo que dificulta el proceso y hace que requieran más entrada de energía para aumentar la extracción por vacío y la temperatura.
- Suelos con un alto contenido de materia orgánica tienen una alta capacidad de sorción de COV, lo que resulta en tasas de remoción reducidas.
- Las emisiones requieren de tratamiento, lo que aumenta los costos del proceso.
- Al ser procesos *In Situ*, existe menos certeza sobre la uniformidad del tratamiento en el área de interés, debido a la variabilidad de las características del suelo y a que es más difícil verificar la eficacia del proceso.
- Generalmente los procesos *In Situ* requieren periodos de tiempo mayores a los procesos *Ex Situ*.

Estimación de Costos Asociados

La estimación de costos es similar a la indicada en las tecnologías de calentamiento(Ficha 08).

Referencias/Más Información/Links de Interés

Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0

http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

Guía para el Ciudadano sobre Métodos de Tratamiento Térmico In Situ

http://www.clu-in.org/download/citizens/thermal_sp.pdf

Miliarium Ingeniería Civil y Medio Ambiente

<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/InyeccionAire.asp>

USEPA, 2006. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil. EPA 542/F-06/013

USEPA, 1998. Steam Injection for Soil and Aquifer Remediation. EPA/540/S-97/505

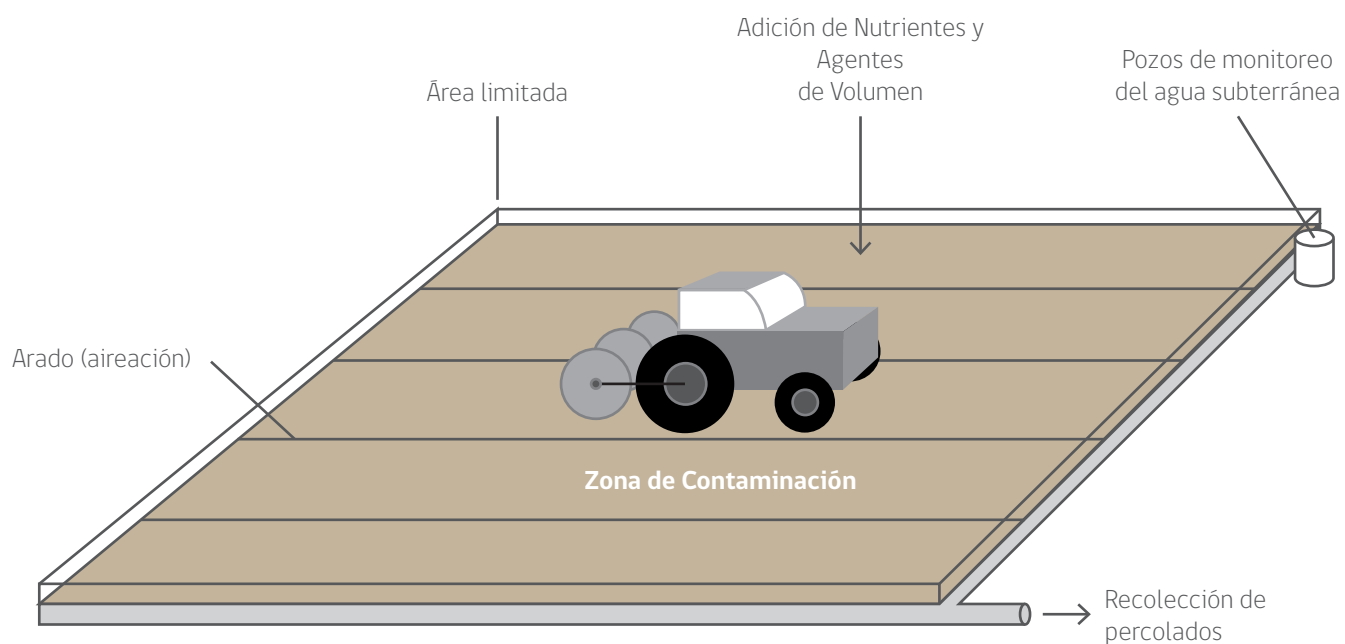
Descripción

Este método consiste en retirar y disponer el suelo contaminado en otro terreno para su tratamiento. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. El terreno debe poseer buenas características de laboreo agrícola: ausencia de piedras, fácilmente removible, pH cercano a la neutralidad, facilidad de aireación y poseer un contenido adecuado de nitrógeno y fósforo, todo esto para optimizar la velocidad de degradación. Generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados.

Las condiciones del suelo están a menudo controladas para optimizar la velocidad de degradación de contaminantes. Las condiciones que se controlan normalmente incluyen:

- Humedad del suelo (por lo general por el riego o aspersión).
- Aireación (con una frecuencia predeterminada, el suelo se mezcla y airea).
- pH (buffer cerca de pH neutro mediante la adición de piedra caliza molida o cal agrícola).
- Otras modificaciones (por ejemplo, adición de agentes de relleno de suelo, nutrientes, etc).

Las únicas precauciones que deben tomarse son las relacionadas con la migración de los contaminantes hacia las capas de aguas subterráneas, cursos de aguas superficiales o zonas agrícolas y forestales.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Los contaminantes tratados con éxito por landfarming incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, PCP, creosota y coque, además de algunos pesticidas y HTP.

Es una tecnología de gran escala, que se practica en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia y Nueva Zelanda.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Bajo costo
- No deja residuos posteriores
- No provoca (si se realiza en condiciones controladas) riesgos de contaminación tanto superficial como subterránea
- Puede realizarse en una gran variedad de condiciones climáticas
- Es simple para diseñar y operar, debido a que utiliza equipos agrícolas comerciales tales como tractores, arados, mangueras de riego y aspersores rotativos.

Desventajas:

- La incorporación de suelo contaminado en suelo limpio genera un gran volumen de material, por lo que se debe disponer de gran espacio.
- No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables.
- Las condiciones meteorológicas incontrolables (por ejemplo, temperatura ambiente, lluvias, etc) pueden afectar la degradación biológica.
- Los contaminantes inorgánicos no son biodegradados.
- Contaminantes volátiles, tales como disolventes, deben ser pre-tratados debido a su volatilización hacia la atmósfera.
- El control del polvo es una consideración importante, especialmente durante la labranza y otras operaciones de manipulación de materiales.
- Necesaria la construcción y control de instalaciones recolectoras de escorrentía.
- La topografía, la erosión, el clima, la estratificación y permeabilidad del suelo deben ser evaluados previamente para determinar el diseño óptimo de las instalaciones.

Estimación de Costos Asociados

Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 USD/ m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Landfarming

http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_13a.html

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

<http://www.biorrehid.cebas.csic.es/index.html>

Descripción

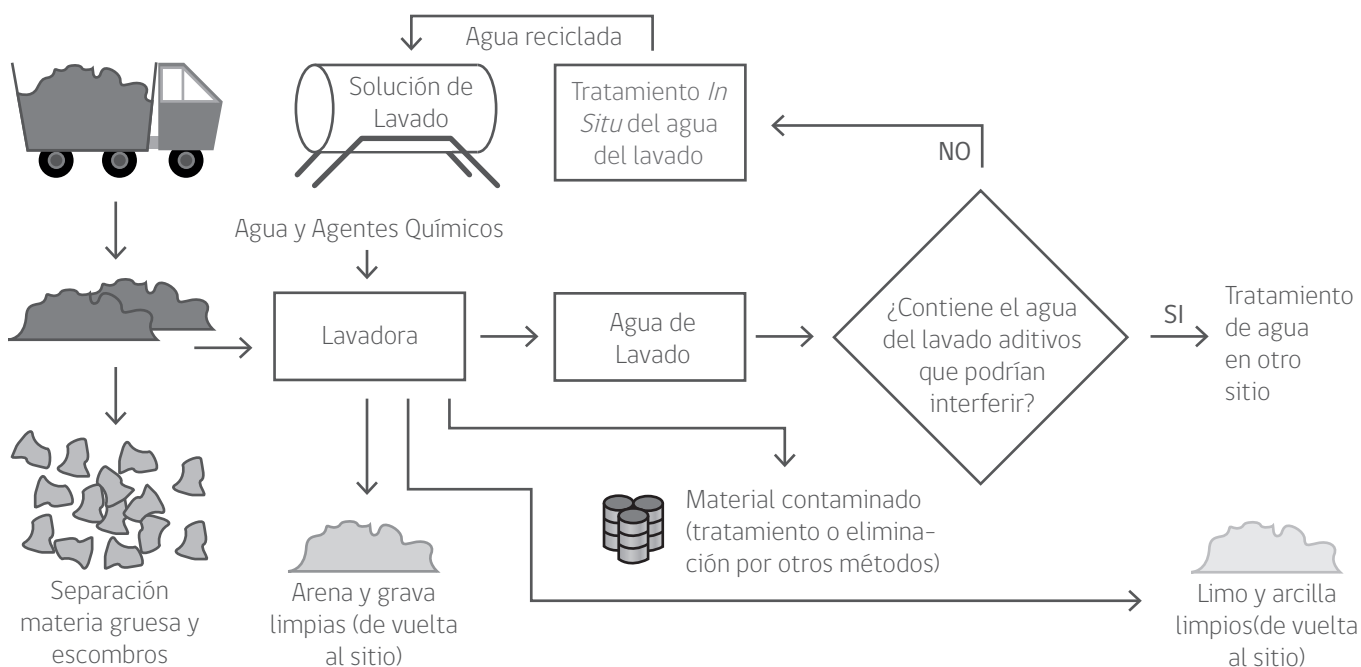
Fundamentalmente, el lavado del suelo implica una reducción de volumen del suelo contaminado que requiere de tratamiento posterior. Se considera una tecnología de transferencia de contaminación, en la que la fracción contaminada procedente de los procesos de limpieza del suelo debe ser posteriormente tratada mediante técnicas adecuadas, según los contaminantes que presente. El proceso de separación de contaminantes presentes se puede alcanzar a través de las siguientes vías:

- Por concentración de contaminantes en un menor volumen de suelo, mediante separación por tamaño de partículas y/o separación por gravedad.
- Por disolución o suspensión de los contaminantes en una solución de lavado (por ejemplo, mediante la adición de surfactantes, agentes quelantes, ajustes de pH, etc.).

La reducción de la contaminación del suelo mediante técnicas de separación por tamaño de partícula se basa en el fenómeno de que los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a enlazarse, ya sea química o físicamente, a la arcilla, al limo y a otras partículas orgánicas del suelo. La separación por gravedad es eficaz para la eliminación de partículas de alta o baja gravedad específica, tales como compuestos que contienen metales pesados (plomo, óxido de radio, etc.).

Un proceso típico de lavado de suelos por disolución o suspensión incluye el tamizado del material extraído del área contaminada, a fin de retirar rocas y escombros de gran tamaño. El material obtenido es entonces ingresado a unidades de lavado, en la que se mezcla con agua y agentes químicos. La mezcla resultante pasa a través de tamices, mezcladores y atomizadores de agua que separan el limo y la arcilla de la porción de grano grueso. Parte de la contaminación puede disolverse en el agua de lavado, la cuál debe ser tratada posteriormente. La fracción de fino que contiene el contaminante puede tratarse posteriormente o ser destinado a disposición final en sitios autorizados.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

El lavado de suelos se utiliza fundamentalmente para suelos contaminados con SCOV, hidrocarburos derivados del petróleo y sustancias inorgánicas como cianuros y metales pesados. Resulta menos eficaz en el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles y pesticidas.

Es una tecnología ampliamente utilizada en el norte de Europa y América para el tratamiento de sitios contaminados.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Reducción de la cantidad de suelo que requiere un tratamiento posterior en profundidad, disminuyendo los costos de limpieza y de disposición de material contaminado.

Desventajas:

- Una mezcla compleja y heterogénea de contaminantes presentes en el suelo hace difícil formular una sola disolución de lavado que elimine de manera eficaz todos los tipos de contaminantes. En estos casos se requiere un lavado secuencial, usando diferentes soluciones de lavado y/o distintas partes del suelo en disoluciones diferentes.
- La corriente líquida generada requiere un tratamiento posterior.
- Puede requerir de tratamientos adicionales para eliminar solventes remanentes en los residuos tratados.
- La dificultad de eliminar compuestos orgánicos adsorbidos sobre partículas finas de arcilla.

Estimación de Costos Asociados

Estimación de los costos de la aplicación de esta tecnología fluctúan entre 70 - 187 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Guía para el Ciudadano sobre Lavado del Suelo

http://www.clu-in.org/download/citizens/soilwash_sp.pdf

Soil Washing (Ex Situ Soil Remediation Technology)

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html>

Planta de lavado de suelos: Saneamiento de pasivo ambiental en la Estación Fernández Oro, Río Negro

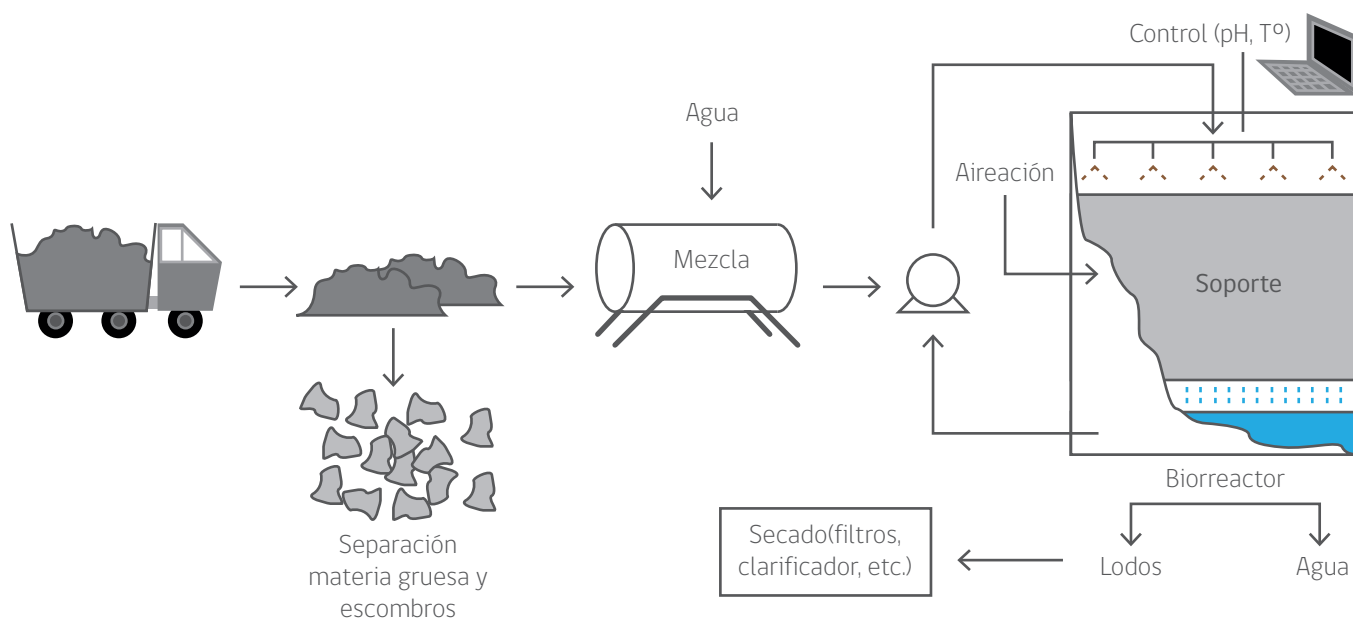
http://www.petrotecnica.com.ar/octubre2010/PDFs_sin%20publicidad/16-21.pdf

Descripción

Es una metodología *Ex Situ* y consiste en el tratamiento controlado de suelo contaminado en biorreactores en los cuales se producen una serie de reacciones biológicas llevadas a cabo por los microorganismos o enzimas. Previa separación física de material grueso y escombros, el suelo se mezcla con agua hasta una concentración predeterminada dependiendo de la concentración de los contaminantes, la velocidad de biodegradación y la naturaleza física de los suelos. Los sólidos se mantienen en suspensión y se mezclan con nutrientes y oxígeno. Puede ser necesaria la incorporación de aditivos para controlar el pH. Cuando la biodegradación se ha completado, la suspensión del suelo es secada en equipos clarificadores, filtros de presión, filtros de vacío, secado o centrifugas.

Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar, controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos que mejoren y aceleren la biodegradación. Es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones.

Uno de los reactores más utilizados es el biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado.

Esquema de Operación/Figura

LODOS BIOLÓGICO/BIORREMEDIACIÓN EN FASE DE LODOS

Descontaminación

Ex Situ

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Los biorreactores de lodos aerobios se utilizan principalmente para tratar HTP, SCOV no halogenados y COV. Se utilizan también reactores secuenciales de lodos aerobios/anaerobios para tratar BPC, SCOV halogenados, pesticidas y desechos de artillería.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Alta eficiencia.
- Ocupa áreas reducidas.
- Presenta la posibilidad de controlar los parámetros operacionales ya que la eficacia de estos métodos depende en gran medida de las labores de manejo, tales como: control de la humedad del material en proceso de remediación, temperatura y oxigenación.
- Reduce significativamente el tiempo de tratamiento en comparación a otras tecnologías.

Desventajas:

- Necesita de un rígido control operacional.
- Inestabilidad en la sedimentación de lodos.
- Costos elevados para el tratamiento de grandes volúmenes de suelo.
- El suelo debe tamizarse previamente.
- Suelos heterogéneos y arcillosos pueden generar problemas de manipulación.
- Los productos intermediarios pueden ser más tóxicos que el contaminante original (en caso de explosivos o solventes clorados).
- Los residuos pueden requerir de tratamiento o disposición final.

Estimación de Costos Asociados

Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo y su costo oscila entre 130 y 200 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Slurry Phase Biological Treatment:

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-14.html>

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de Ecología, México.

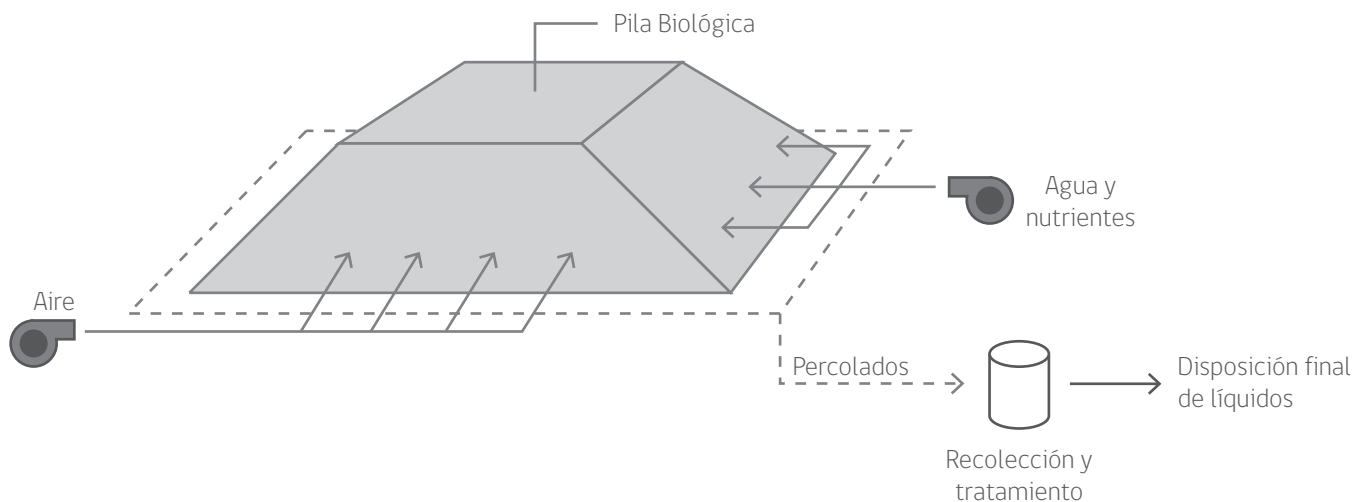
<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

<http://www.ingenieroambiental.com>

Descripción

Las pilas estáticas (biopilas) son una forma de compostaje en el cual, además de agentes de volumen, se le adiciona agua y nutrientes al sistema (para la estimulación de los microorganismos) y se dispone en áreas de tratamiento (que incluyen alguna forma de aireación y sistemas para colectar lixiviados). Las biopilas son similares al landfarming. En ambos métodos el suelo contaminado es dispuesto en la superficie del terreno, sin embargo, en las biopilas se estimula el crecimiento y reproducción de los microorganismos aeróbicos mediante el suministro de oxígeno, generalmente forzando aire a través de ranuras o tuberías perforadas en toda la pila (inyección o extracción), mientras que en landfarming la aireación es mediante el labrado o arado.

La volatilidad de los contaminantes dispuestos a tratar es relevante en este sistema, debido a que éstos tienden a evaporarse durante la extracción o inyección y rara vez son biodegradados por los microorganismos. Los vapores producidos pueden disiparse a la atmósfera, a menos que la pila se encuentre cubierta, caso en el cual los vapores serán colectados por unas tuberías instaladas debajo de la cobertura.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Se usan las pilas biológicas para reducir las concentraciones de los constituyentes del petróleo en suelos excavados mediante la biodegradación: eliminación de COV no halogenados e hidrocarburos. Los COV halogenados, los SCOV y los pesticidas pueden ser tratados también mediante esta tecnología, pero la eficacia del proceso puede disminuir y puede ser solo aplicable a ciertos compuestos dentro de estos grupos.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Es relativamente simple de diseñar e implementar.
- El costo es competitivo.
- Efectivo sobre constituyentes orgánicos con baja tasa de biodegradación.

Desventajas:

- Puede no ser efectivo para altas concentraciones (> 50000 ppm de hidrocarburos totales).
- La presencia de concentraciones de metales pesados (> 2500 ppm) pueden inhibir el crecimiento microbiológico.
- Requiere de gran espacio para disposición de la pila.
- Los constituyentes volátiles tienden a evaporarse, más que a biodegradarse.
- Se requiere la excavación de los suelos contaminados.
- Se requiere de pruebas de tratabilidad para determinar la biodegradabilidad de los contaminantes, la oxigenación adecuada y la carga de nutrientes.
- Procesos en fase sólida tienen una eficacia cuestionable para los compuestos halogenados.
- Dado que es un proceso estático, puede dar lugar a un tratamiento menos uniforme, en comparación con los procesos que implican mezcla periódica.

Estimación de Costos Asociados

Los costos estimados de las tecnologías de biopilas se encuentran entre los 25 y 150 USD/m³ y tiene un tiempo de tratamiento usual de 6 meses a 2 años.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Biopiles

http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_11.html

Volke T. y Velasco J.A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto de ecología, México.

<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>

Ingeniería civil y medio ambiente

<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/Biopilas.asp>

<http://www.ingenieroambiental.com>

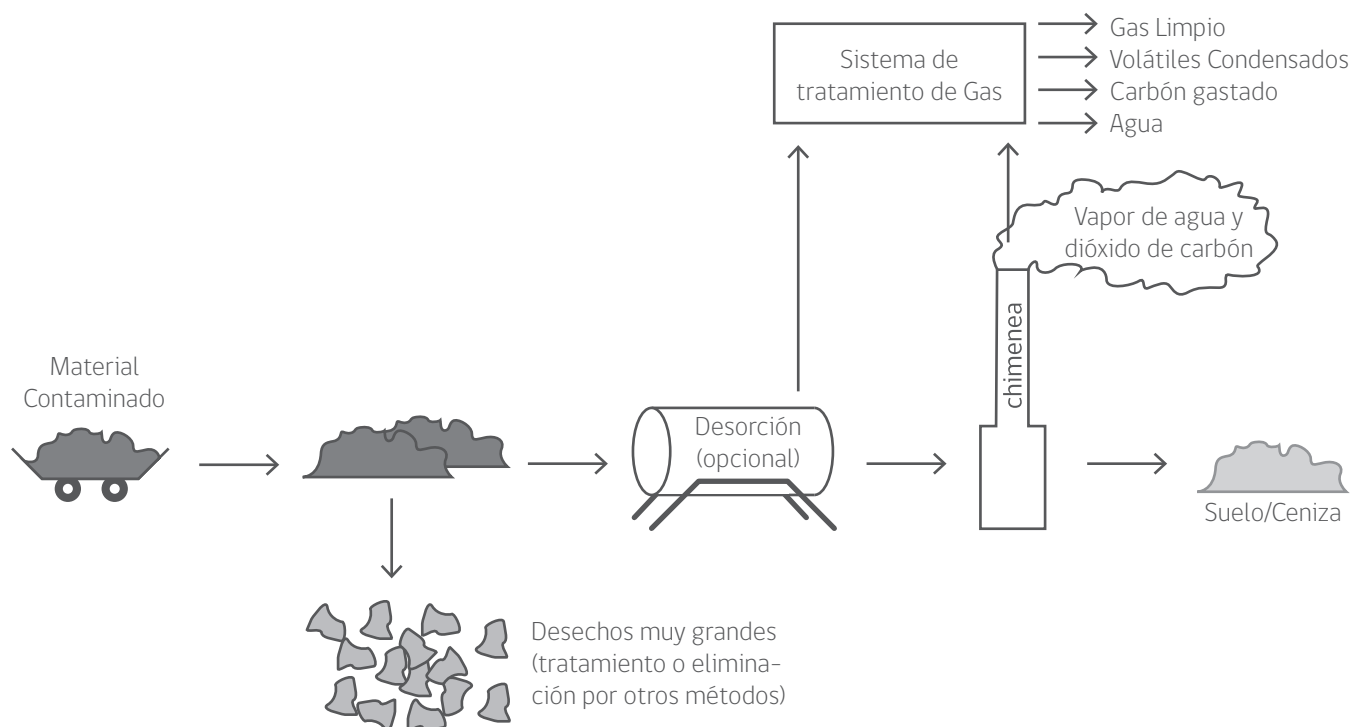
Descripción

La pirólisis aplica calor en ausencia de oxígeno para descomponer químicamente contaminantes orgánicos. Los contaminantes se transforman en: compuestos gaseosos (monóxido de carbono, hidrógeno, metano y otros hidrocarburos), una pequeña cantidad de líquidos y un residuo sólido (coque) que contiene carbono fijo y cenizas. El proceso normalmente se realiza bajo presión y a temperaturas superiores a los 430 °C. Si hay compuestos volátiles y semi-volátiles en el suelo a tratar, también va a ocurrir desorción térmica. Los equipos usados para la pirólisis son similares a los de la incineración, pero operan a temperaturas más bajas y con un suministro de aire menor al necesario para la combustión.

Entre los sistemas más comunes se encuentran:

- **Pirólisis en Horno Rotatorio:** Los hornos rotatorios son tambores cilíndricos, levemente inclinados, que sirven de cámara de calentamiento
- **Pirólisis en Horno de Lecho Fluidizado:** El lecho fluidizado usa aire a alta presión para suspender los sólidos. Opera a temperaturas mayores a 430 °C.
- **Destrucción de Sales Fundidas:** Este tipo de sistema usa un lecho turbulento de sales fundidas, como por ejemplo carbonato de sodio, para transferir el calor y destruir los contaminantes.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Principalmente SCOVIDs y pesticidas. El proceso es aplicable para la separación de orgánicos de residuos de refinera, residuos de alquitran de hulla, desechos del tratamiento de madera, suelos contaminados con creosota, suelos contaminados con hidrocarburos, residuos del procesamiento de caucho sintético y restos de pintura. Se ha usado para tratar BPC, dioxinas, HAP y otros contaminantes orgánicos.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- La pirólisis muestra oportunidades promisorias para tratar contaminantes orgánicos en suelos y lodos aceitosos.
- Se pueden remover metales volátiles.
- Hay más certeza en la uniformidad del proceso en comparación a los tratamientos térmicos *In Situ*.
- Los tiempos de tratamiento generalmente son más cortos que los procesos térmicos *In Situ*.
- Origina productos que pueden ser útiles para otras aplicaciones.

Desventajas:

- Los gases producidos necesitan tratamiento.
- Requiere un tamaño de partícula específico y manipulación de materiales, lo que puede impactar en la aplicabilidad y costos en sitios específicos.
- Hay que secar el suelo para alcanzar un contenido de humedad bajo (menor al 1%).
- Suelos con un alto contenido de humedad incrementan los costos del tratamiento.
- Suelos con metales pesados pueden requerir estabilización.
- Es necesario excavar el suelo.

Estimación de Costos Asociados

Se estima aproximadamente USD 330 por tonelada métrica.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0

http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

Pyrolysis

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-25.html>

Thermal Treatment: Ex Situ

http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Thermal_Treatment%3A_Ex_Situ/cat/Overview/

Vasile, L., Gavrilescu, M. 2008. Overview of ex situ Decontamination Techniques for Soil Cleanup. Environmental Engineering and Management Journal. Vol.7, No.6, 815-834.

Volke, T., Velasco, J.A. 2002. Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados.

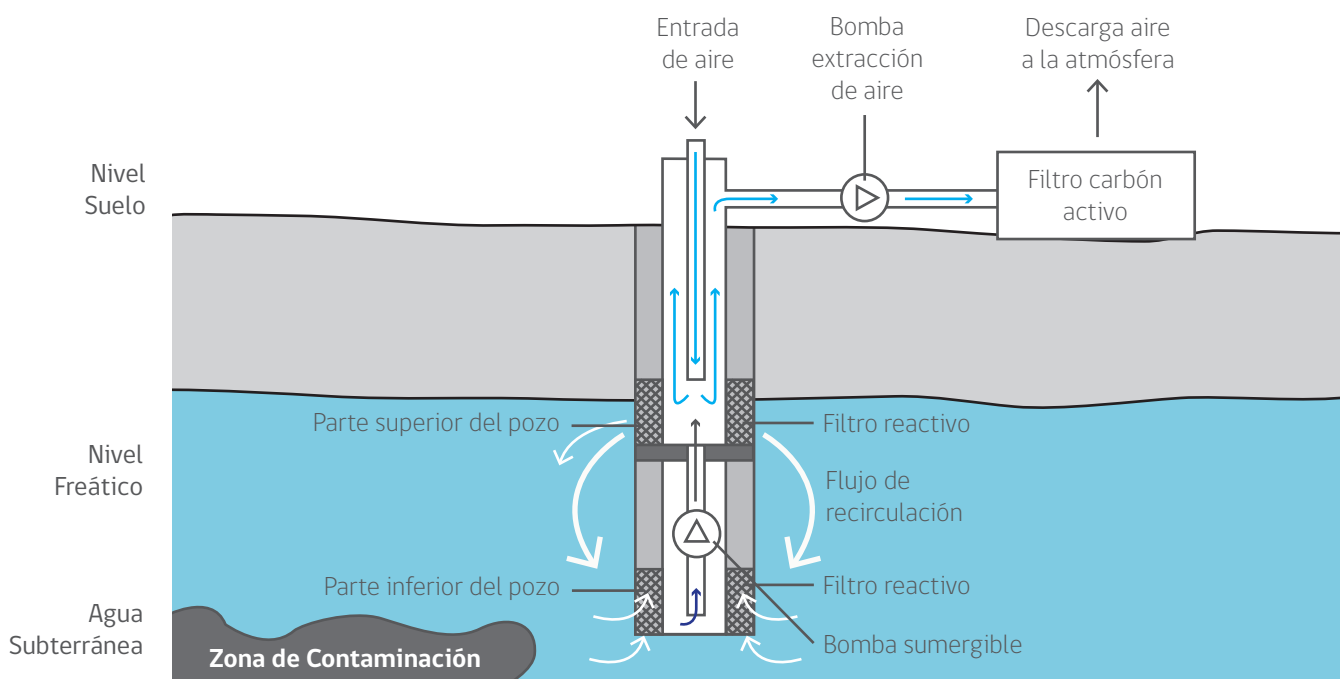
Descripción

En los pozos de recirculación se separan los COV del agua subterránea en forma de vapor, pero, a diferencia de las técnicas de inyección de aire comprimido, todo este proceso se lleva a cabo en la zona saturada. Se basa en la creación de celdas de recirculación de agua subterránea en el interior y alrededores del pozo, el que está normalmente configurado en un sistema de doble carcasa.

El sistema puede ser configurado con un flujo ascendente o un flujo descendente. Las configuraciones más comunes implican la inyección de aire en la carcasa interior del pozo, disminuyendo la densidad del agua subterránea, favoreciendo su ascenso y la volatilización de los compuestos orgánicos. Estos últimos son captados por un filtro en la parte superior del pozo, desde donde el agua vuelve a circular hacia abajo por gravedad, volviendo a ser captada en la parte inferior del pozo y repitiendo de nuevo el ciclo. A través de este sistema, los contaminantes volátiles en el agua subterránea se transfieren desde la fase líquida a la fase gaseosa por las burbujas de aire ascendentes. Los vapores contaminados pueden ser extraídos y tratados en la superficie del suelo, generalmente con filtros de carbón activo, o descargados en la zona no saturada, a través de la sección superior del pozo, y ser degradado mediante tecnologías de biorremediación *In Situ*. El agua subterránea se recircula varias veces dentro del sistema hasta que la remoción de contaminantes sea la esperada.

La eficiencia de esta tecnología puede ser mejorada mediante la adición de ozono, sistemas de adsorción con carbón activado, o tratamientos biológicos. El radio de influencia del pozo también se puede modificar a través de las adiciones de productos químicos que permitan la estabilización *In Situ* de metales disueltos en el agua subterránea. En general, la selección de una configuración depende de las condiciones del lugar, los contaminantes y el proveedor disponible.

Esta técnica puede ser utilizada en conjunto con otras tecnologías, tales como biorremediación, bioventing, extracción de vapores, entre otras, realizando un tratamiento simultáneo sobre la zona no saturada del suelo.

Esquema de Operación/Figura

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

La mayoría de las aplicaciones de esta tecnología incluyen el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles halogenados, tales como TCE, y los productos derivados del petróleo y sus componentes (BTX). Se han propuesto aplicaciones de esta tecnología a COV no halogenados, SCOV, pesticidas y compuestos inorgánicos. La tecnología también se ha aplicado a agua subterránea contaminada con radionucleidos y COV y sobre distintos tipos de suelo, de arcilla limosa a grava de arena.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Debido a que el agua subterránea no se bombea a la superficie, los costos de bombeo y tramitación de permisos se reducen y eliminan. Se evita, además, la necesidad de eliminación y almacenaje del agua contaminada o parcialmente tratada.
- Los vapores contaminados generados en el proceso son más fácilmente retirados y tratados en superficie.
- El sistema está diseñado para funcionar de forma continua sujeta a mantenciones básicas de rutina.
- Los sistemas pueden ser modificados para hacer circular el agua subterránea en dirección ascendente o descendente, con el fin de aprovechar las propiedades físicas de los contaminantes tratados.
- Permite la estimulación de procesos de atenuación natural (aeróbico o anaeróbico) y biorremediación, mediante la adición de nutrientes y oxígeno.

Desventajas:

- El sistema puede estar sujeto a obstrucción por la infiltración de precipitados que contengan componentes oxidados.
- Los acuíferos poco profundos pueden limitar la efectividad del proceso, debido a la limitación de espacio para la circulación.
- Pueden no ser eficaces en sitios con fuertes patrones naturales de flujo de aguas subterráneas.
- Si el sistema no está bien diseñado o construido, la pluma de contaminación puede extenderse más allá del radio de influencia o los pozos se pueden obstruir.
- Como en el caso de la inyección de aire comprimido, también presenta el inconveniente del elevado consumo energético.
- La actividad biológica o precipitación química pueden limitar la permeabilidad del filtro.

Estimación de Costos Asociados

Sin información disponible.

Referencias/Más Información/Links de Interés

General Principles of Groundwater Circulation Well (GCW) Technology for Soil and Groundwater In-Situ Remediation

<http://www.eco-web.com/edi/00384.html>

In-Well Air Stripping (In Situ Groundwater Remediation Technology)

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-40.html>

Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Ground-Water Circulation Wells

<http://www.epa.gov/tio/download/remed/gwcirc.pdf>

Descripción

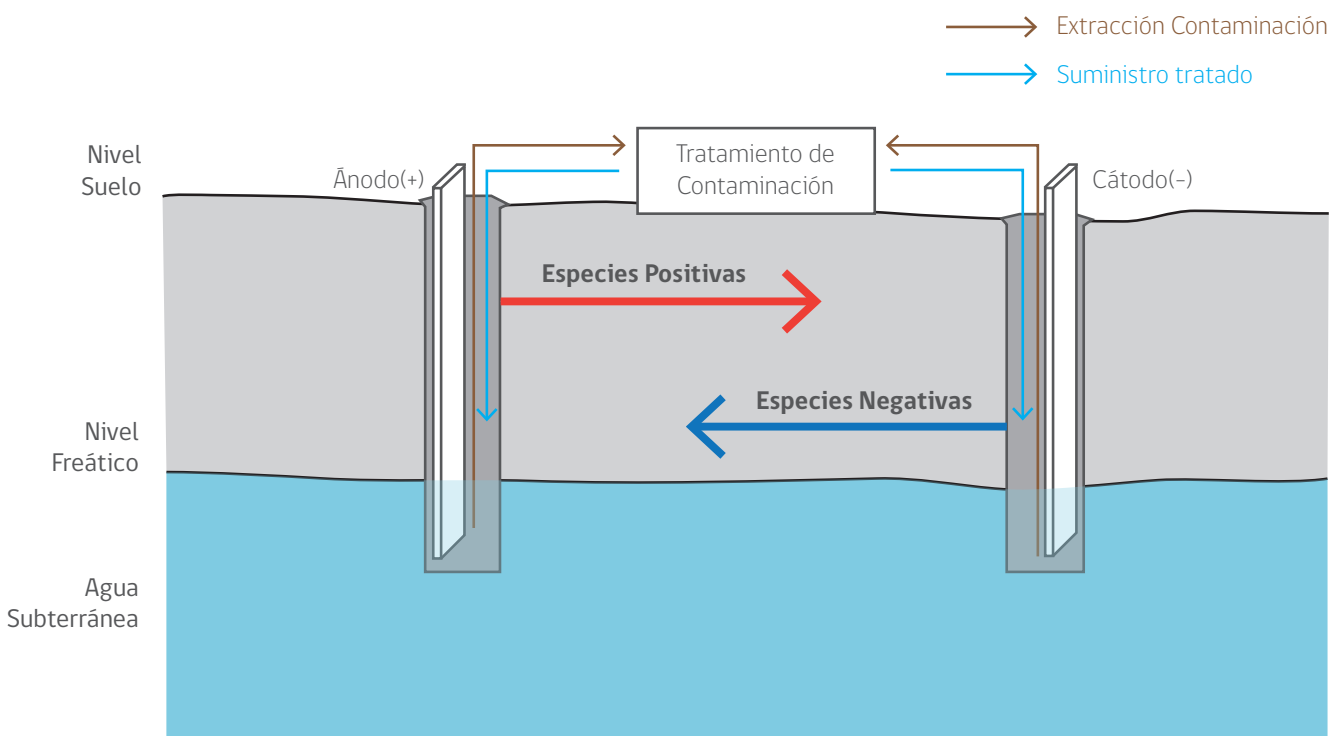
La remediación electrocinética es una tecnología que permite separar y extraer metales pesados, radionucleidos y contaminantes orgánicos presentes en suelos (zona saturada y no saturada), lodos, sedimentos y aguas subterráneas. En los últimos años esta tecnología ha adquirido un considerable interés, especialmente por su aplicación en el tratamiento de suelos de baja permeabilidad y en aguas subterráneas.

El principio de la remediación electrocinética se basa en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad en el suelo a través de pares de electrodos distribuidos en una matriz definida, provocando que las especies cargadas (iones) y el agua se desplacen hacia estos electrodos. Existen dos mecanismos principales de transporte de los contaminantes a través del suelo: la electromigración y la electroósmosis.

En la electromigración las partículas cargadas son transportadas a través del sustrato, mientras que, en la electroósmosis, es el movimiento de un líquido que contiene iones es el que transporta éstos hacia una superficie estacionaria cargada. La dirección y la velocidad de movimiento de una especie iónica dependerán de su carga, tanto en magnitud y polaridad, así como la magnitud de la velocidad de flujo inducido por la electroósmosis. Especies no iónicas, tanto inorgánicas como orgánicas, también serán transportadas junto al flujo del líquido, inducidas por la electroósmosis.

La remediación electrocinética puede estar enfocada al mejoramiento de la remoción y/o al tratamiento sin necesidad de remoción. El mejoramiento de la remoción se alcanza mediante el transporte electrocinético de contaminantes hacia los electrodos polarizados, concentrando los contaminantes y facilitando su posterior eliminación y tratamiento *Ex Situ*. El tratamiento sin necesidad de remoción se alcanza mediante el transporte electroosmótico de contaminantes a través de zonas de tratamiento definidas. Este enfoque es utilizado *In Situ* para la remediación de suelos contaminados con especies orgánicas.

Esquema de Operación/Figura



Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Tecnología reportada principalmente para el tratamiento de metales pesados, aniones y compuestos orgánicos polares contaminantes presentes en suelos, lodos y aguas subterráneas, tales como: Metales pesados (Plomo, Mercurio, Cadmio, Níquel, Cobre, Zinc, Cromo), Especies radioactivas (Cs_{137} , Sr_{90} , Co_{60} , Ur), Aniones Tóxicos (Nitratos, Sulfatos), DNAPL, Cianuros, Hidrocarburos derivados del petróleo (diesel, gasolina, kerosene y aceites lubricantes), Explosivos, Mezclas de contaminantes orgánicos/inorgánicos, TCE, BTEX, PAH.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- Es un método eficaz para la recuperación de contaminantes iónicos. Los contaminantes iónicos se encuentran generalmente absorbidos en las partículas del suelo, no estando naturalmente disponibles para la eliminación mediante la acción de arrastre de las aguas subterráneas.
- Método eficaz para inducir el movimiento del agua, iones y coloides en suelos de baja permeabilidad.
- En la actualidad no existe otro método *In Situ* para remediar la contaminación por metales pesados en la zona no saturada de suelos. La excavación y/o disposición final en un relleno sanitario autorizado no es siempre posible, además de ser de alto costo.

Desventajas:

- Limitado por la solubilidad del contaminante y la desorción de los contaminantes de la matriz del suelo.
- Las condiciones ácidas y la descomposición electrolítica pueden producir la corrosión del material del ánodo.
- La ruta de migración para los contaminantes, inducida por los electrodos, podría ser demasiado larga o podría haber zonas de estancamiento entre los pozos, donde la tasa de migración es particularmente lenta, dando como resultado una remediación incompleta.
- Las reacciones de electrólisis en las proximidades de los electrodos pueden causar cambios en el pH que pueden cambiar la solubilidad y especiación de los contaminantes.
- La heterogeneidad o anomalías en el subsuelo (fundaciones de construcción, escombros, presencia de hierro o de óxidos de hierro, grandes rocas o materiales de relleno) pueden reducir la eficiencia de la remoción.
- La presencia de conductores metálicos o aisladores enterrados en el suelo y los cambios de pH inducido por las reacciones del proceso pueden reducir la eficiencia del tratamiento.
- La precipitación de especies en las cercanías del cátodo pueden ser un obstáculo para el proceso.

Estimación de Costos Asociados

Los costos dependerán de la cantidad de suelo a tratar, la conductividad del suelo, el tipo de contaminante, el espaciado de los electrodos, y el tipo de diseño del proceso. Un estudio reciente estima que los costos a escala real de 117 dólares por metro cúbico.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Electrokinetic Separation (In Situ Soil Remediation Technology)

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-4.html>

Emerging Technologies for the Remediation of Metals in Soils: Electrokinetics

<http://www.itrcweb.org/Documents/MIS-4.pdf>

Technology Overview Report: Electrokinetics

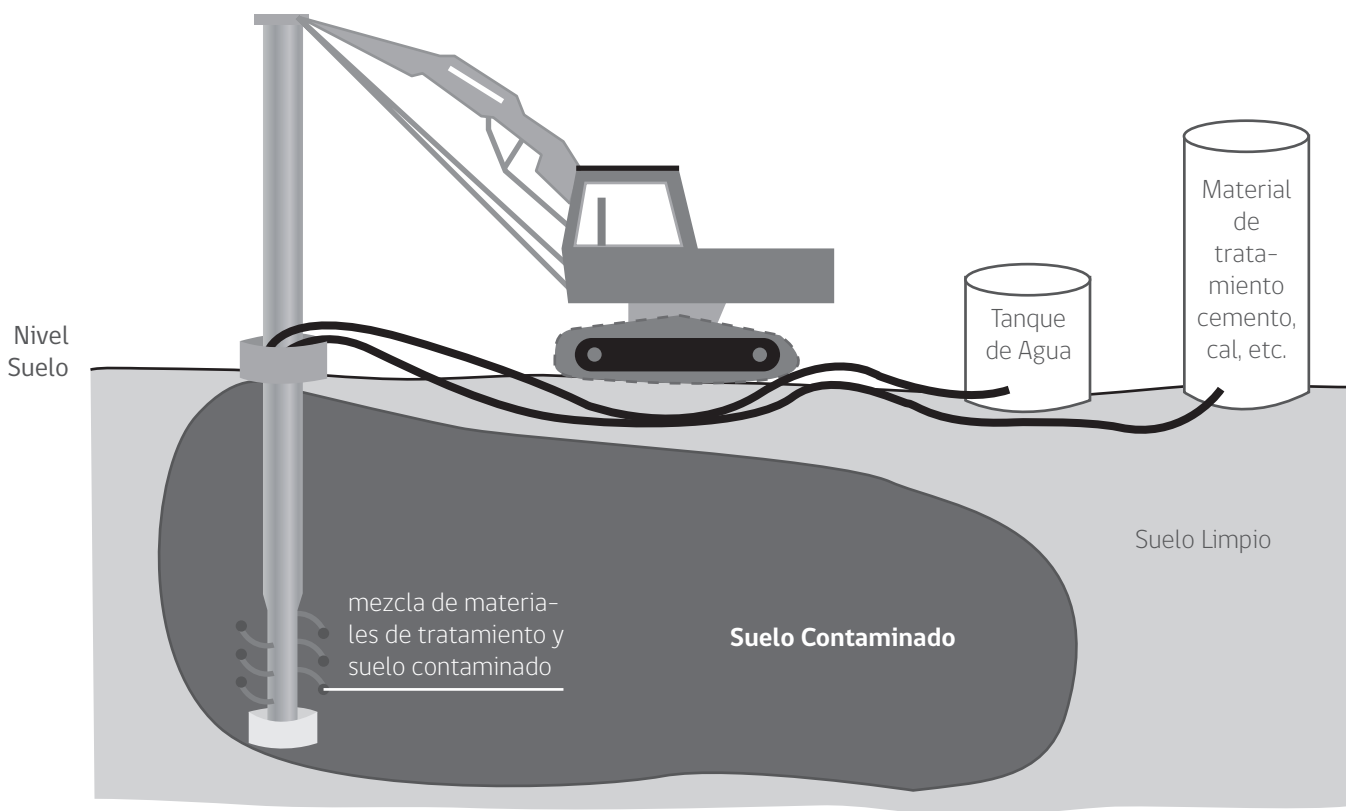
http://www.clu-in.org/download/remed/elctro_o.pdf

Descripción

Tecnologías que reducen la solubilidad, reactividad o movilidad de los elementos contaminantes mediante modificación de su estado químico o inmovilización física por agentes estabilizantes (estabilización); o bien convierten el residuo con el contaminante en un sólido de manipulación sencilla y segura, evitando riesgos de volatilización, lixiviación o fugas (solidificación). A diferencia de otras tecnologías de remediación, la S/E busca atrapar o inmovilizar los contaminantes dentro de su medio (es decir, el suelo, arena y/o materiales de construcción que los contienen), impidiendo su liberación o desprendimiento hacia el medio ambiente, y no la destrucción o eliminación de las sustancias contaminantes a través de tratamientos químicos o físicos. La S/E puede realizarse tanto *In Situ* como *Ex Situ*. Para el caso de la S/E *Ex Situ*, el material a tratar debe excavar, en términos específicos, el suelo o lodo contaminado se extrae y se deposita en equipos donde es mezclado con los materiales de tratamiento, como cemento y cal. Entonces, el suelo o lodo tratado puede ser colocados nuevamente en el sitio o depositado en un vertedero controlado.

En la S/E *In Situ* puede utilizarse sistemas para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar, o bien, los materiales de limpieza se pueden mezclar directamente bajo tierra. La mezcla se prepara con el uso de barrenos o paletas rotatorias. Luego, el suelo o lodo tratado que queda en el sitio se cubre con suelo limpio o un pavimento.

En la Inyección de solidificantes, los agentes estabilizantes, inorgánicos como el cemento u orgánicos como las sustancias bituminosas, el polietileno o las parafinas, son inyectados *In Situ* en el suelo contaminado a través de pozos similares a los utilizados en el sellado profundo o mezclados con el suelo, encapsulando físicamente a los contaminantes en una matriz estable impermeable al agua.

Esquema de Operación/Figura

SOLIDIFICACIÓN/ESTABILIZACIÓN (S/E)/INYECCIÓN DE SOLIDIFICANTES

Confinamiento *In Situ/Ex Situ*

Aplicaciones/Contaminantes Tratados

Se trata de una técnica apropiada para suelos contaminados con sustancias inorgánicas, con limitada eficacia para SCOV o pesticidas. Ha sido aplicada en una enorme variedad de residuos municipales, nucleares, aguas residuales y lodos.

Ventajas/Desventajas

Ventajas:

- En muchos casos suele ser la única forma de tratamiento para residuos complejos.
- Útil para tratar grandes extensiones de suelo contaminado tanto *In Situ* como cuando el material es excavado y removido.
- En general, los materiales no representan costos elevados, por lo que resulta una opción competitiva en comparación a otros procesos.

Desventajas:

- Los COV y metales volátiles (Pb, Cd, As, Hg) tienden a volatilizarse durante el mezclado del suelo con los agentes de solidificación/estabilización, y generalmente éstos no son inmovilizados.
- La profundidad a la que se encuentre el contaminante limita algunos procesos
- El material solidificado puede impedir el futuro uso del sitio.
- El contenido en materia orgánica del suelo va a interferir negativamente al limitar la acción de los aditivos.
- Algunos procesos dan como resultado un aumento significativo en el volumen (hasta el doble del volumen original).
- El tratamiento *In Situ* por debajo del nivel freático puede requerir de deshidratación
- Ciertos residuos son incompatibles con este proceso.
- Las condiciones ambientales pueden afectar a la inmovilización de los contaminantes a largo plazo.
- Los efectos a largo plazo que pueden provocar los aditivos añadidos al suelo son aún desconocidos, pudiendo afectar la inmovilización de los contaminantes.

Estimación de Costos Asociados

Los costos estimados de estas tecnologías fluctúan entre los 120 y 250 USD/m³.

Referencias/Más Información/Links de Interés

Procesos de Estabilización/Solidificación: Revisión Bibliográfica

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/ortiz_m_jr/capitulo4.pdf

Técnicas de recuperación de suelos contaminados

http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Solidification/Stabilization

<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-8.html>

6. TIPOS DE REMEDIACIÓN EJECUTADOS EN CHILE



6. Tipos de Remediación Ejecutados en Chile

La mayor parte de los proyectos de remediación en Chile se han ejecutado en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (ver capítulo 2.1), evaluación en la que habitualmente se utiliza una norma de referencia, dado que hasta la fecha no se ha dictado en el país una normativa respecto de calidad de suelos que, a su vez, fije procedimientos y/o valores de remediación.

Para el saneamiento y recuperación de suelos en Chile, el principal método utilizado corresponde a la excavación, retiro y reposición del suelo afectado. Adicionalmente, dada la heterogeneidad de suelos que posee Chile y la naturaleza diversa de los contaminantes, algunas de las otras tecnologías que se están investigando (aunque en incipiente desarrollo) son: fitoremediación, biorremediación y electrorremediación.

A continuación se presenta una breve reseña de algunos proyectos e investigaciones destacadas que se han ejecutado en el país, en función del tipo de tratamiento.

6.1 Excavación, Transporte y Disposición

Consiste en el retiro del suelo contaminado y su posterior traslado y disposición en un lugar fuera del área de riesgo (*Ex Situ*). Un proyecto emblemático de este tipo es la Recuperación de Terrenos “Las Salinas” en la V Región.

Este proyecto fue ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental el 20 de Diciembre de 2002 y calificado favorablemente por la COREMA Región de Valparaíso en el año 2007. El objetivo del proyecto es el retiro de las instalaciones petroleras subterráneas que se encuentran en el lugar, para que, una vez concluido, se proceda a la recuperación de los suelos.

El saneamiento de los terrenos se realiza hasta cumplir los niveles de concentración aceptables dados por la aplicación de un modelo de riesgo, que define los niveles de concentraciones que no revistan riesgo para la salud humana, de acuerdo a los futuros usos del terreno analizados, esto es (1ª Residencia, 2ª Residencia, Parques y Jardines, Trabajadores de la construcción). El proyecto plantea niveles de concentración límite (Valores Objetivos de Concentración, VOCs) para hidrocarburos y otros compuestos, en el suelo y aguas subterráneas, de modo que los usos futuros que queden restringidos serán el uso agrícola para chacarería y el uso del agua subterránea para bebida humana sin tratamiento de potabilización.





6.2 Fitorremediación

Los esfuerzos realizados en torno a la fitorremediación han cubierto distintos aspectos, como la realización de catastros de flora presente en sitios impactados que muestran características remediadoras en diferentes regiones del país, estudios de sustratos del suelo que ayudan a una fitorremediación más eficiente, entre otros.

Los estudios de prospección de la flora presente en los sitios impactados se centra en la búsqueda de las especies que se caracterizan por ser hiperacumuladoras de metales, ejemplo de esto es *Oenothera affinis* especie acumuladora de cobre (González et al., 2008) perteneciente a la zona central de país (V región). En otros estudios se ha determinado la acumulación del mismo metal en las raíces y hojas de especies de flora presentes en tranques de relaves al norte de Chile (III región, planta Matta), a partir de los cual se encontró que la especie nativa *Schinus polygamus* y *Atriplex deserticola*, acumuló sobre 1,2 g de cobre por kg en sus hojas, mostrando que son pseudometalófitas, además se reportó que cinco de las especies estudiadas pueden ser consideradas con capacidad fitoextractora y cuatro fueron aptas para fitoestabilización de sitios contaminados con cobre, cabe señalar que esta evidencia sirve de base para desarrollar fitorremediación en sitios semi-áridos y en relaves mineros (Ortiz-Calderón, 2008). También se ha encontrado otra especie en la zona central del país, llamada, *M. luteus* var. *variegatus*, que en zonas con altas concentraciones de cobre en el suelo presentan la capacidad de almacenar el metal en la parte aérea de su estructura, observándose concentraciones de 210,3 mg/kg en las hojas, 90,1 mg/kg en el tallo y 348,8 mg/kg en las flores.

Parte importante de los estudios realizados de fitorremediación se han enfocado en zonas que se han visto impactadas por la actividad minera, en la región central por el emplaza-

miento de fundiciones y en la zona norte del país en los tranques de relaves, buscando solucionar el problema de polvo suspendido y además en la estabilización de metales a nivel de raíces. Dado que las condiciones de los tranques y suelos impactados no son las más propicias para la revegetación debido principalmente a la falta de materia orgánica, limitaciones de nutriente y potencial toxicidad de los metales presentes, se ha estudiado a nivel local algunos sustratos como mejoradores de suelo.

En el marco del proyecto Innova Corfo sobre "Uso de recursos filogenéticos nativos para fitoestabilización de depósitos de relaves en la Región de Coquimbo", desarrollado por el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) y co-ejecutado por el Centro Regional Intihuasi del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), se describen los principales acondicionadores para relave que pueden encontrarse en la zona norte-centro de Chile, entre acondicionadores de tipo orgánicos se encuentran los biosólidos, guanos, compost, desechos agrícolas orgánicos (orujos y alperujos), podas y desechos de madera que se caracterizan por ser fuentes de nutrientes y de materia orgánicos, algunos presentan propiedades quelantes y de mejora en la retención de agua (biosólidos). En relación a los inorgánicos se mencionan Marinas o estériles, rípios de lixiviación que permiten un mejoramiento de texturas finas (mejora compactación y drenaje), por otro lado los sedimentos de canales de regadío y los suelos de escarpe, además de proveer un mejoramiento de textura, aportan semillas y nutrientes. La cal y conchuela son fuentes de calcio soluble que son acondicionadores de pH, neutralizando los sustratos ácidos del relave. Cabe señalar que este proyecto también desarrolló estudios a escala piloto de fitorremediación que permitió sentar las bases para una guía metodológica sobre la fitoestabilización en tranques de relaves.



6.3 Biorremediación

Las tecnologías de biorremediación de suelos contaminados fueron desarrolladas para acelerar el proceso natural de la recuperación de suelos. Este efecto es logrado mediante la optimización de la capacidad natural de microorganismos para degradar un contaminante, proporcionando las condiciones esenciales para el crecimiento y la biodisponibilidad del contaminante, así como la reducción del estrés abiótico sobre la microflora. (Rubilar, O., 2007).

En nuestro país, una de las actividades con mayor riesgo ambiental es la minería metálica, representada por el cobre, debido a su poder modificador del paisaje y a sus descargas de residuos tóxicos. Por otra parte, algunos suelos en el sur de Chile se han visto afectados por derrames y confinamientos de petróleo crudo producto de la actividad petrolera imperante en la zona. Asimismo el suelo también sufre la contaminación por residuos de pesticidas y otros productos agroquímicos, como los herbicidas y los fertilizantes, pues la agricultura chi-

lena ha sufrido una verdadera revolución tecnológica desde fines de los setenta, basado en uso masivo de estos agroquímicos (Montenegro, F., 2007).

Con miras a la recuperación de estos suelos mediante métodos biológicos, se están investigando numerosas alternativas de biorremediación. En el desierto de Chile, la región de Atacama se ha visto afectada por las operaciones mineras y los repetidos derrames de fuel-oil que han dado como resultado unas mezclas complejas de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, los que son considerados por la legislación chilena como desecho peligroso. Por esta razón se evaluó a escala de laboratorio una tecnología de biorremediación para tratar suelos contaminados de mineras de la región con concentración de combustible >50.000 mg/kg. Para esto se utilizó reactores de compostaje con 5 tipos de suelo contaminado mezclados con aserrín a temperaturas entre 30°C y 40°C , con una humedad constante de 50% y aireación continua de 16 L/min durante

56 días. Finalmente se concluyó que con la mezcla de suelo contaminado con aserrín en una proporción de 1:3 se logra una máxima eliminación de hidrocarburos (Godoy, A. et al., 2007).

Por otra parte, de los bosques de la región de La Araucanía se aisló el hongo de la pudrición blanca para evaluar su capacidad degradadora de pentaclorofenoles (PCF) para su posterior utilización en suelos contaminados. Se demostró finalmente que *Anthracophyllum discolor* fue la cepa que presenta más potencial para ser utilizada en procesos de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con compuestos orgánicos persistentes. Se demostró que *A. discolor* removió entre un 70% y 80% de PCF en suelo y un 81% en un reactor de suelo en fase slurry (Rubilar, O., 2007). Este mismo hongo mostró capacidad de degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), en la siguiente proporción: fenantreno (62%), antraceno (73%), fluoranteno (54%), pireno (60%) y benzo (a) pireno (75%) (Acevedo, F. et al., 2010). También ha sido estudiado que al agregar residuos agrícolas como paja de trigo a los suelos contaminados, (Cea, M. et al., 2010) el mismo hongo ve beneficiado su crecimiento y por consecuencia aumenta su capacidad de degradación de PCF.

En este mismo campo de la biorremediación, en la XII Región, se recolectaron muestras de suelos afectados y no afectados con petróleo crudo y se aislaron bacterias para posteriormente seleccionar las cepas con capacidad hidrocarburoclítica en cultivos en agar y caldo mineral adicionado con petróleo crudo. Se aislaron un total de 240 cepas bacterianas, de las que presentaron mejor crecimiento fueron *Bacillus coagulans* y *Bacillus brevis*, las que fueron seleccionadas para realizar la cinética de degradación de petróleo crudo, lo que mostró que al día 30 de la cinética ambas cepas fueron capaces de degradar un amplio rango de grupos funcionales constituyentes del petróleo crudo, entre ellos grupos alifáticos y aromáticos (Montenegro, F., 2007).

Otro contaminante persistente y perjudicial tanto para el ecosistema como para los humanos son los herbicidas clorados (por ejemplo, s-triazinas) y policlorobifenilos (PCB), existen diversas bacterias capaces de degradar estos contaminantes. Los PCB más clorados son sometidos a deshalogenaciones reductivas por los microorganismos anaerobios mientras que los Bifenilos clorados inferiores son oxidados por bacterias aerobias. En estudio realizado por Seeger, M., et al. en el año 2010, analizó el genoma de bacterias degradadoras de PCB para aumentar el conocimiento de sus capacidades metabólicas y su adaptación a condiciones de estrés. Con esta información se puede establecer procesos de biorremediación eficientes para estos contaminantes orgánicos persistentes.

Se ha estudiado también la bioaumentación con *Pseudomonas sp* encapsulado cepa MHP41 de los suelos agrícolas contaminados con el herbicida simazina. El resultado fue el aumento y mejoramiento de microorganismos degradadores de esta sustancia, así como el cambio de la comunidad microbiana en el suelo. El análisis FISH (técnica de biología molecular que permite identificación de microorganismos), reveló finalmente que la bioaumentación aumentó las cantidades relativas de los dos grupos filogenéticos estudiados (Acidobacteria y Planctomycetes), aunque los miembros de las arqueas eran metabólicamente activas, su abundancia no fue alterada por la bioaumentación.

Para el caso de los metales, un tipo de contaminantes que, a diferencia de los compuestos orgánicos como hidrocarburos o agroquímicos, no se pueden degradar, el posible riesgo que pueden presentar a los distintos receptores depende de su "biodisponibilidad". Dado esto se ha realizado en Chile estudios sobre un tratamiento que permita disminuir la biodisponibilidad de los metales, esto mediante un cambio de especiación química que estabilice los metales, utilizando microorganismos sulfato reductores. Se ha reportado (Almendras



et al; 2009), que al realizar un estudio, a escala piloto, con suelo no perturbado de bioestabilización los metales como Fe, Cu, Pb y Zn se encuentran estables y sólo al realizar un lavado del suelo a pH 2,0 estos empiezan a moverse, lo que indica que es una buena alternativa de remediación para el estrato anaerobio del suelo, la que puede ser parte de una estrategia de remediación, en la cual se pudiese realizar lavado de suelo o fitorremediación en los primeros estratos y bioestabilización en la parte anaerobia. Cabe señalar que esta metodología ha sido utilizada exitosamente en un medio acuoso.

En los proyectos de remediación con microorganismos, uno de los más relevantes realizados en el país, debido a su escala, es la "Bioremediación de suelos en la región de Magallanes". En la Región de Magallanes se encuentra la mayor extracción de petróleo en Chile, esta actividad se realiza gracias a la previa exploración y pronta extracción del petróleo a partir de pozos. Estos pozos están presentes desde las primeras décadas del siglo XX, y hasta la fecha existen alrededor de 1100 ductos de extracción. Cuando el crudo (recurso) se agota, los pozos, no tienen mayor uso y presentan un potencial de contaminación. Por esta razón ENAP formuló en el año 2005 un programa de "Saneamiento de Pasivos Ambientales" que tiene como objetivo descontaminar pozos pasivos y realizar una recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, lo cual contempla hacerse cargo de una herencia ambiental histórica que obedeció a prácticas propias del quehacer petrolero de las primeras décadas en las zonas donde se desarrollaron las actividades de exploración y explotación petrolera.

El proyecto utilizó 3 tipos de metodologías de saneamiento de fosas, consistentes en remediación a través de bioestimulación, sistemas de aireación y adición de material orgánico. La primera tecnología de remediación a través de bioestimulación busca disminuir la concentración de hidrocarburos en el suelo por acción de biodegradación microbiana, mejorada por la adición de una solución concentrada de bacterias con capacidades degradadoras. La segunda metodología consiste en un sistema de aireación pasiva y bioestimulantes hasta los límites permisibles y así, de esta forma, estimular la capacidad natural de los microorganismos nativos que degradan los hidrocarburos del suelo. La tercera metodología utilizada fue la bioremediación con adición de material orgánico que permite disminuir la concentración de hidrocarburos en el suelo por acción de biodegradación microbiana estimulada por la adición de nutrientes orgánicos aportados por turba y/o por la adición de fertilizantes naturales. Como última etapa, en las 3 metodologías, se procede al cierre de las fosas con previa verificación de que las concentraciones presentes en el suelo cumplan con la normativa de referencia: "Alberta Soil and Water Quality Guidelines for Hydrocarbons at Upstream Oil and Gas Facilities" (Alberta Environment, 2001).



6.4 Electrorremediación

La electrorremediación ha sido utilizada en relaves mineros con el objetivo de aumentar la eficiencia de remoción de cobre. En el estudio realizado por Rojo, Adrián., et al en el año 2006, se evaluó el efecto del voltaje aplicado, el período de voltaje alternado y el tiempo de remediación, obteniéndose como resultado que al decrecer el voltaje efectivo semeja la acción remediadora. Asimismo, se comprobó que al aumentar el tiempo de remediación, aumenta la cantidad de material remediado.

Otro estudio reportado es la implementación de electrodos bipolares en el material poroso, que permite una ruta de migración más corta y un aumento de la conductividad eléctrica en el sistema de remediación. Este método fue realizado en relaves de la mina El Teniente, mostrando un 42% de remoción en comparación con el 8% obtenido sin los electrodos bipolares.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, M. Biodegradation and Bioremediation. San Diego: Academic Press Inc.; 1994.

Alexander, M. How Toxic Are Toxic Chemicals in Soil? *Environmental Science & Technology*. 29:2713-2717; 1995.

Almendras, M., Wiertz, J.V., Chamy, R. Heavy Metals immobilization in contaminated smelter soils using microbial sulphate reduction, *Advanced Materials Research Vols 71-73* pp 577-580.2009

Barriuso, E.; Benoit, P.; Dubus, I.G. Formation of Pesticide Nonextractable (Bound) Residues in Soil: Magnitude, Controlling Factors and Reversibility. *Environmental Science & Technology*. 42:1845-1854; 2008.

Benavides López de Mesa J., Quintero G., Andrea Liliana Guevara Vizcaíno, A. L., Jaimes Cáceres, D. C., Gutiérrez Riaño, S. M., y J. M. García.2006. Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *NOVA-PUBLICACIÓN CIENTÍFICA*. 4 (5), 1-116.

Berns, A.; Vinken, R.; Bertmer, M.; Breitschwerdt, A.; Schäffer, A. Use of ¹⁵N-depleted artificial compost in bound residue studies. *Chemosphere*. 59:649-658; 2005.

Bouwer, E.J., Zehnder, J.B. Bioremediation of organic compounds - putting microbial metabolism to work. *Trends in Biotechnology*, 11, 360-367; 1993.

Capriel, P.; Haisch, A.; Khan, S.U. Distribution and nature of bound (nonextractable) residues of atrazine in a mineral soil nine years after the herbicide application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 33:567-569; 1985.

Casellas, M., P. Fernández, J. M. Bayona y A. M. Solanas. 1995. Bioassay-directed chemical analysis of genotoxic components in urban airborne particulate matter from Barcelona, Spain. *Chemosphere*. 30, 725-740.

Cea, M., Jorquera, M., Rubilar, O., Langer, H., Tortella, G., Diez, M. C. Bioremediation of soil contaminants with pentachlorophenol by *Anthracyllum discolor* and its effect on soil microbial community. Elsevier. Volumen 181, Issues 1-3, pages 315-323. 2010

Coates J.D., Chakraborty R.y J. McInerney. 2002. Anaerobic benzene biodegradation-a new era. *Resources in Microbiology* 153, 621-628.

Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2008. "Guía para Preparar Estudios de Factibilidad de Proyectos de Remediación de Sitios Contaminados con COPs".

Daane L., Harjono I, Zylstra G y M. Häggblom. 2001. "Isolation and characterization of polycyclic Aromatic Hydrocarbon degrading bacteria associated with the Rhizosphere of salt Marsh plants". *Applied and Environmental Microbiology*. 67(6), 2683-2691.

Dec, J.; Bollag, J.-M. Determination of Covalent and Noncovalent Binding Interactions Between Xenobiotic Chemicals and Soil. *Soil Science*. 162:858-874; 1997.

- Drydale G., Kasan H, y F. Bux. 1999. "Denitrification bacteria during activated sludge treatment". Water S.A. 25, 357-362.
- ENAP, 2011. Memoria Anual ENAP, Página 55.
http://www.enap.cl/investor_relations/doc/memorias/MEMORIA_ENAP2011.pdf
- Environmental Protection Agency (EPA). 2001. A Citizen's Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-01-002. 2p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1988. Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies under CERCLA. Office of Emergency and Remedial Response. EPA/540/G-89/004.
- Eweis, J.B.; Ergas, S.J.; Chang, D.P.Y y Schroeder, E.D. Bioremediation Principles. WCB/McGraw Hill, Malaysia; 1998
- Feller-Rate. 2011.www.fellerrate.cl/general2/corporaciones/enap1106.pdf.
- Furuno, S.; Pätzolt, K.; Rabe, C.; Neu, T.R.; Harms, H.; Wick, L.Y. Fungal mycelia allow chemotactic dispersal of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria in water-unsaturated systems. Environmental Microbiology. 12:1391-1398; 2010.
- García-Torres, R., Ríos-Leal, E., Martínez-Toledo, A., Ramos-Morales, F. R., J. S. Cruz-Sánchez y M. del C. Cuevas-Díaz. 2011. Uso de Cachaza y Bagazo de Caña de Azúcar en la Remoción de Hidrocarburos en Suelo Contaminado". Rev. Int. Contam. Ambie. 27(1), 31-39.
- GEA, 2012. Grupo de Estudios Ambientales Universidad de Magallanes.
www.umag.cl/gea/GEA-Impacto%20ambiental_archivos/Page1321.htm
- Gevao, B.; Jones, K.C.; Semple, K.T.; Craven, A.; Burauel, P. Peer Reviewed: Nonextractable Pesticide Residues in Soil. Environmental Science & Technology. 37:138A-144A; 2003.
- Gevao, B.; Semple, K.T.; Jones, K.C. Bound pesticide residues in soils: a review. Environmental Pollution. 108:3-14; 2000.
- Girardi C, Greve J, Lamshöft M, Fetzter I, Miltner A, Schäffer A, Kästner M. Biodegradation of ciprofloxacin in water and soil and its effects on the microbial communities. J Hazard Mater: 198:22-30; 2011.
- Godoy-Faundez, A., Antizar-Ladislao, B., Reyes-Bozo, L., Camaño, A., Saez-Navarrete, C. Bioremediation of contaminated mixtures of desert mining soil and sawdust with fuel oil by aerated in-vessel composting in the Atacama Region (Chile). Elsevier. Volume 151, Issues 2-3, PP 649-657. 2007.
- González, I., Mueña, V., Cisternas, M., Neaman, A. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. Revista Chilena de Historia Natural. 81,279-291. 2008.
- Hatzinger, P.B.; Kelsey, J.W.; Daniel, H. POLLUTANTS | Biodegradation. Encyclopedia of Soils in the Environment. Oxford: Elsevier; 2005.
- Howe-Grant, M. 1996. Petroleum. Encyclopedia of chemical technology 4th ed. Wiley Interscience Publication. New York. pp. 342-480.
- INIA, 2000. Instituto Investigación Agropecuaria.
www.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR32805.pdf
- Jablonowski, N.D.; Köppchen, S.; Hofmann, D.; Schäffer, A.; Burauel, P. Persistence of 14C-labeled atrazine and its residues in a field lysimeter soil after 22 years. Environmental Pollution. 157:2126-2131; 2009.
- Kaifer, M.J., A. Aguilar, A., Arana, E., Balseiro, C., Torá, I., Caley, J. M., y C. Pils., 2004. Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. Madrid: Comunidad de Madrid, Consejería del Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

Kästner, M.; Streibich, S.; Beyrer, M.; Richnow, H.H.; Fritsche, W. Formation of Bound Residues during Microbial Degradation of [14C] Anthracene in Soil. *Appl Environ Microbiol.* 65:1834-1842; 1999.

Katayama, A.; Bhula, R.; Burns, G.R.; Carazo, E.; Felsot, A.; Hamilton, D., et al. Bioavailability of Xenobiotics in the Soil Environment. In: Whitacre DM, ed. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*: Springer New York; 2010.

Khan, S.U.; Dupont, S. Bound pesticide residues and their bioavailability. In: Greenhalgh R, Roberts TR, eds. *Pesticide Science and Technology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1987.

Kingston, P.F. 2002. Long-term Environmental Impact of Oil Spills. *Spill Science & Technology Bulletin.* 7, 53-61.

Lee H, Lee J, Cheon J y K. Lee. 2001. Attenuation of Petroleum Hydrocarbons in Smear Zones: A Case Study. *Journal of Environmental Engineering.* 127(7), 639-647.

Lovley, D. R. 2003. Cleaning Up with Genomics: Applying Molecular Biology to Bioremediation. *Nature Reviews. Microbiology.* 1(1), 35-44.

Méndez-Natera J. R., Roque C., K. Zapata y V.A. 2004. Otahola-Gómez. Efecto de la concentración y tiempo de contaminación de un suelo por petróleo en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays* L.) cv. Himeca 95. *Revista UDO Agrícola* 4(1), 66-71.

Méndez, M., Rennola, L., Peña, M. y P. Rodríguez, P. 2011. Determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) usando CG-FID en suelos de un patio de tanques en desuso situado en Catia La Mar-Venezuela. *Revista Ciencia e Ingeniería.* 32(1) 31-38.

Merkl, N., Schultze-Kraft R., y C. Infante. 2004. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics-Pre-selection of plant species from Eastern Venezuela. *Journal of Applied Botany and Food Quality.* 78 (3), 185-192.

Miltner, A.; Kindler, R.; Knicker, H.; Richnow, H.-H.; Kästner, M. Fate of microbial biomass-derived amino acids in soil and their contribution to soil organic matter. *Organic Geochemistry.* 40:978 985; 2009.

Miltner, A.; Kopinke, F.-D.; Kindler, R.; Selesi, D.; Hartmann, A.; Kästner, M. Non-phototrophic CO₂ fixation by soil microorganisms. *Plant and Soil.* 269:193-203; 2005.

Montenegro, F. Aislamiento y selección de cepas bacterianas nativas de suelos de la XII región de Chile, para la degradación de crudos de petróleo. Tesis para optar al grado académico de Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 2007.

Müller, H. 1987. Hydrocarbons in the freshwater environment: a literature review. *Arc. Hydrobiol. Adv. Limnol.* 24, 1-69.

Neilson, A.H.; Allard, A.-S. *Environmental Degradation and Transformation of Organic Chemicals*: CRC Press; 2008.

Noguera, S. y A. Armado. 2010. Evaluación de metales en suelos contaminados por derrames de crudo en Yacaré, estado Falcón, Venezuela. *Avances en Química.* 5(3), 167-175.

Northcott, G.L.; Jones, K.C. Partitioning, Extractability, and Formation of Nonextractable PAH Residues in Soil. 1. Compound Differences in Aging and Sequestration. *Environmental Science & Technology.* 35:1103-1110; 2001.

Olguín E.J., Hernández M.E. y G. Sánchez-Galván. 2007. Contaminación de Manglares por Hidrocarburos y Estrategias de Biorremediación, Fitorremediación y Restauración. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23, 139-154.

Orchard, V.A.; Cook, F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry.* 15:447-453; 1983.

Ortíz Brito, O., Ize Lema, I., y A. Gavilán García. 2003. La Restauración de Suelos Contaminados con Hidrocarburos en México. *Gaceta Ecológica.* 83-92.

- Ortiz Bernad, Irene; Sanz García, Juana; Dorado Valiño, Miriam; Villar Fernández, Susana; 2007. Técnica de Recuperación de Suelos Contaminados. Alcalá de Henares: Elecé Industria Gráfica.
- Ortiz-Calderón, C. Alcaide, O. Li-Kao, J. Copper distribution in leaves and roots of plants growing on a copper mine-tailing storage facility in northern Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 81, 489-499. 2008.
- Paul, F.; Clark, F. Soil microbiology and biochemistry. New York: Academic Press; 1989.
- Pepper, I.L.; Josephson, K.L. Biotic Activity in Soil and Water. In: Pepper IL, Gerba CP, Brusseau ML, eds. *Pollution Science*. San Diego: Academic Press Inc.; 1996.
- Pignatello, J.J. Sorption dynamics of organic compounds in soils and sediments. In: Sawhney BL, Brown BK, eds. *Reactions and Movements of Organic Chemicals in Soil*. Madison: SSSA and ASA; 1989.
- Pignatello, J.J.; Xing, B. Mechanisms of Slow Sorption of Organic Chemicals to Natural Particles. *Environmental Science & Technology*. 30:1-11; 1996.
- Rice, P.J.; Anderson, T.A.; Coats, J.R. Degradation and persistence of metolachlor in soil: Effects of concentration, soil moisture, soil depth, and sterilization. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 21:2640-2648; 2002
- Riojas González H. H., Torres Bustillos L. G., Mondaca Fernández I., Balderas Cortes J.J. y P. Gortáres Moroyoqui. 2010. Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Química Viva*. (9)3, 120-145.
- Roldán Martín, A., & Iturbe Arguelles, R. (s.f.). Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas.
- Romaniuk R., Brandt, J.F., Rios P. R. y L. Giuffré. 2007. Atenuación Natural y Remediación Inducida en Suelos Contaminados con Hidrocarburos. *Cl. Suelo (Argentina)* 25(2), 139-149.
- Rubilar, O. Biorremediación de suelos contaminados con pentaclorofenol (PCF) por hongos de pudrición blanca. Tesis para optar al grado académico de doctor en ciencias de recursos naturales. Universidad de La Frontera. Temuco. 2007.
- SEIA, 2006. Servicio Evaluación Impacto Ambiental. Declaración de Impacto Ambiental: "Saneamiento Ambiental de 606 Fosas Sector Isla y Continente ENAP-Magallanes".
- SEIA, 2007. Servicio Evaluación Impacto Ambiental. Declaración de Impacto Ambiental: "Saneamiento Ambiental de 70 Fosas Cullen A ENAP-Magallanes".
- Toledo B. K. 2009. Aplicación de Procesos Biológicos como medida Remediación para recuperar suelos Limo-Arcillosos contaminados con Gasolina. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ciencias de la Tierra. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. GUAYAQUIL-ECUADOR.
- Van Deuren, J.; Wang, Z. y Ledbetter, J. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office; 1997.
- Volke Sepúlveda, T., y Velasco, J. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. Mexico.
- Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S.; Wilson, J.T.; Newell, C. Natural Attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface. Wiley, New York; 1999.
- Yaron, B.; Calvet, R.; Prost, R. Soil Pollution-processes and dynamics. Heidelberg: Springer 1996.



GERENCIA AGUA Y MEDIO AMBIENTE



La Unidad Tecnológica de Agua & Medio Ambiente (A&MA) trabaja desde hace 10 años impulsando la sustentabilidad y competitividad del país a través de la adaptación, desarrollo y transferencia de innovaciones de alto impacto que mejoran el desempeño ambiental y el desarrollo sustentable de las principales actividades económicas y su entorno.

A través de estas innovaciones tecnológicas, Fundación Chile contribuye a disminuir los riesgos a la salud de la población y el ecosistema, valorizar la biodiversidad, los recursos suelo y agua y reducir el pasivo ambiental del país.

Para enfrentar estos desafíos, la Unidad Tecnológica cuenta con un equipo multidisciplinario conformado por más de 40 profesionales de alta especialización. Con el objetivo de potenciar las innovaciones y acelerar la obtención de resultados de alto impacto, generalmente este grupo ejecuta los proyectos en alianza con expertos internacionales, universidades, empresas y Centros Tecnológicos de todo el mundo, destacando la colaboración con Centros de países como Australia, Israel, EE.UU., Alemania, China, Holanda, Suecia, Finlandia, México y España, entre otros.

Durante estos 10 años, la Unidad Tecnológica de A&MA ha desarrollado más de 300 proyectos. Los focos principales de trabajo han sido la industria minera, la agroindustria, el sector de hidrocarburos, la industria química, entre otros sectores productivos.

Del mismo modo, A&MA ha apoyado a organismos públicos en temáticas de medio ambiente, recurso hídrico y sustentabilidad, incluyendo el Ministerio del Medio Ambiente, la Superintendencia del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental, SERNAGEOMIN, DGA, SAG, Gobiernos Regionales, entre otros.

Buscamos impulsar la sustentabilidad como un factor relevante de diferenciación y competitividad, apoyando la implementación de iniciativas que impulsen la innovación, eficiencia y creación de valor.

¿Qué hacemos?

La Unidad Tecnológica de Agua y Medio Ambiente posee 3 temáticas de acción:



Gestión de Sustentabilidad: Apoya a empresas y entidades públicas en el desarrollo e implementación de herramientas que contribuyan a mejorar la competitividad acorde a las nuevas tendencias y exigencias internacionales en sustentabilidad. Sus focos de acción son: Gestión de la sustentabilidad para empresas, apoyo en la creación de estrategias y políticas públicas para la sustentabilidad, comunidades sustentables, territorio inteligente y conservación de la biodiversidad.



Gestión Hídrica: Contribuye a enfrentar los desafíos hídricos del país de forma integral, tanto a nivel de empresas y la relación de estas con su entorno, como de cuencas; a través de la transferencia, desarrollo e implementación de soluciones innovadoras relacionadas con Contabilidad, Estrategias de Gestión, Seguimiento y Reportabilidad; Tratamiento, Optimización y Nuevas Fuentes de Aguas.



Gestión de Riesgo Ambiental: Desarrolla herramientas, estándares y servicios para la identificación, evaluación, gestión y monitoreo de los riesgos ambientales asociados a las actividades productivas tanto a nivel preventivo como de reacción frente a incidentes ambientales. Los ejes de acción de esta línea de trabajo son: Análisis de Riesgo Ambiental, Geoquímica Ambiental, Remediación Ambiental, Cierre de Faenas Mineras y Tercera Parte Independiente.

¿Cómo lo hacemos?

Proyectos I+D Bajo Contrato

Nacen a partir de la necesidad de las empresas de resolver problemáticas ambientales para las cuales no existe una oferta disponible en el mercado o un desarrollo tecnológico adecuado. El resultado de los proyectos de innovación son por lo general tecnologías o herramientas de gestión que mejoran procesos y/o minimizan las externalidades negativas generadas durante toda la cadena productiva, mejorando así el desempeño ambiental de la empresa.

Servicios Tecnológicos Especializados

Son aquellos servicios que no se encuentran de manera recurrente en el mercado nacional, requieren de capital humano altamente especializado en temáticas específicas y usualmente demandan la articulación de grupos de especialistas nacionales y extranjeros.

Proyectos de Interés Público

Programas y/o proyectos de mediano a largo plazo, que abordan necesidades y desafíos ambientales que mejoran o aceleran el desarrollo del país o de una región específica a través de la disminución de brechas, generación de condiciones habilitantes para el desarrollo productivo, fortalecimiento de capacidades, mejoramiento de la coordinación público - privada, entre otros.

