

# Módulo: Contaminación de los Suelos y Aguas Subterráneas

## Asignatura: Tratamiento in situ

Master en Ingeniería y Gestión  
Medioambiental

Año de realización 2015-2016

PROFESOR/A: Gabriel Conde

Para ver esta licencia, abra  
el menú de Creative Commons y la  
licencia de copyright.

Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, No comercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

## Índice

1.	Tecnologías físico-químicas .....	1
1.1.	Lavado .....	1
1.2.	Oxidación química .....	3
1.3.	Solidificación/estabilización .....	5
1.4.	Vitrificación .....	5
1.5.	Extracción de vapores o aireación.....	6
1.5.1.	Extracción de vapores del suelo mejorada térmicamente .....	8
1.5.2.	Burbujeo de aire .....	9
1.5.3.	Extracción de doble fase .....	10
1.6.	Separación electrocinética .....	11
1.7.	Muros de tratamiento.....	12
2.	Tecnologías biológicas.....	15
2.1.	Basadas en la acción de los microorganismos .....	15
2.1.1.	Bioaireación.....	16
2.1.2.	Inyección de peróxido de hidrógeno .....	16
2.2.	Basadas en la acción de las plantas .....	17
2.2.1.	Medidas correctivas para metales .....	18
2.2.2.	Tratamiento de contaminantes orgánicos .....	20

## 1. Tecnologías físico-químicas

Las tecnologías físico-químicas in situ consideradas para suelos son las siguientes:

- Lavado
- Solidificación/estabilización
- Vitrificación
- Extracción de vapores o aireación
- Separación electrocinética

Para aguas subterráneas se describen las siguientes tecnologías in situ:

- Burbujeo con aire
- Extracción de doble fase
- Barreras de tratamiento

### 1.1. Lavado

El lavado del suelo in situ es una técnica de tratamiento que consiste en hacer circular a través de los suelos contaminados una disolución que arrastre los contaminantes.

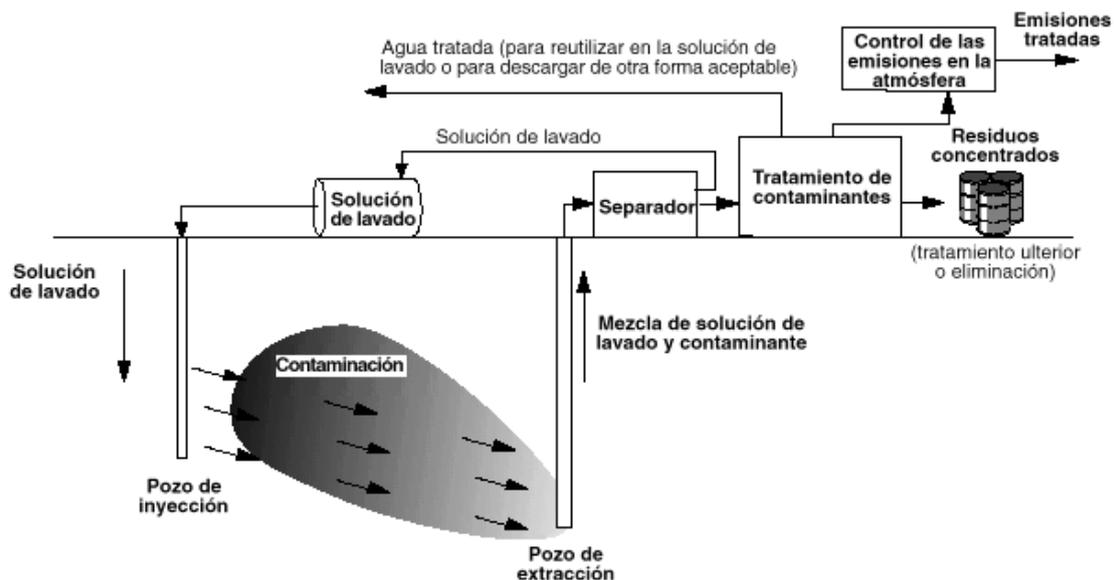
El tipo de disolución de lavado que se necesita para el tratamiento depende de los contaminantes que se hallen en el suelo, pero generalmente es una de las siguientes:

- Agua solamente, para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en el agua
- Agua con ácidos, para extraer metales y contaminantes orgánicos, como los que se encuentran generalmente en el reciclaje de baterías o en procesos de cromado industrial. Por ejemplo, la contaminación con zinc, una de las posibles consecuencias de las operaciones de cromado, se trataría con una disolución ácida.
- Agua con bases, para tratar fenoles y algunos metales.
- Agua con agentes tensioactivos (detergentes), para retirar contaminantes oleosos.

También se está investigando el uso de agua con disolventes orgánicos (por ejemplo, etanol) como disolución de lavado, para disolver ciertos contaminantes que el agua sola no puede disolver. En todo caso, si los aditivos utilizados plantean a su vez riesgos de contaminación, es necesario eliminarlos para conseguir una recuperación completa.

El lavado de suelo in situ se realiza utilizando un sistema de rociadores o pozos de inyección de agua limpia, por encima de la zona contaminada, de forma que el agua se infiltra a través del suelo contaminado, lavándolo. La instalación debe incluir además un sistema de pozos de extracción del agua de lavado, con sus correspondientes bombes (véase la Figura 1).

Figura 1. El proceso del lavado del suelo *in situ*



Fuente: *Guía para el Ciudadano sobre Enjuague in situ*. US EPA, 2002

La cantidad, la ubicación y la profundidad de los pozos de inyección y de extracción dependen de varios factores geológicos y consideraciones técnicas. Los pozos pueden instalarse en forma vertical u horizontal. Además de la colocación de los pozos, hay que trasladar hasta el sitio otros equipos (como un sistema de tratamiento de aguas residuales) o construirlos in situ.

La disolución de lavado se introduce en los pozos de inyección por bombeo y pasa por el suelo, arrastrando contaminantes mientras se dirige a los pozos de extracción. En los pozos de extracción se bombea la disolución de lavado mezclada con los contaminantes. Esta generalmente pasa a un sistema

de tratamiento de aguas residuales, para eliminar los contaminantes, de forma que el agua tratada puede reutilizarse en la disolución de lavado o eliminarse de otra forma aceptable.

El lavado del suelo in situ puede aplicarse sólo al tratamiento de contaminantes que sean solubles en la disolución de lavado.

Con el lavado del suelo in situ se obtienen resultados óptimos en lugares donde el suelo permite el paso de la disolución de lavado. Si el suelo tiene un alto porcentaje de limo o arcilla, por ejemplo, la disolución de lavado 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 lavado del suelo.

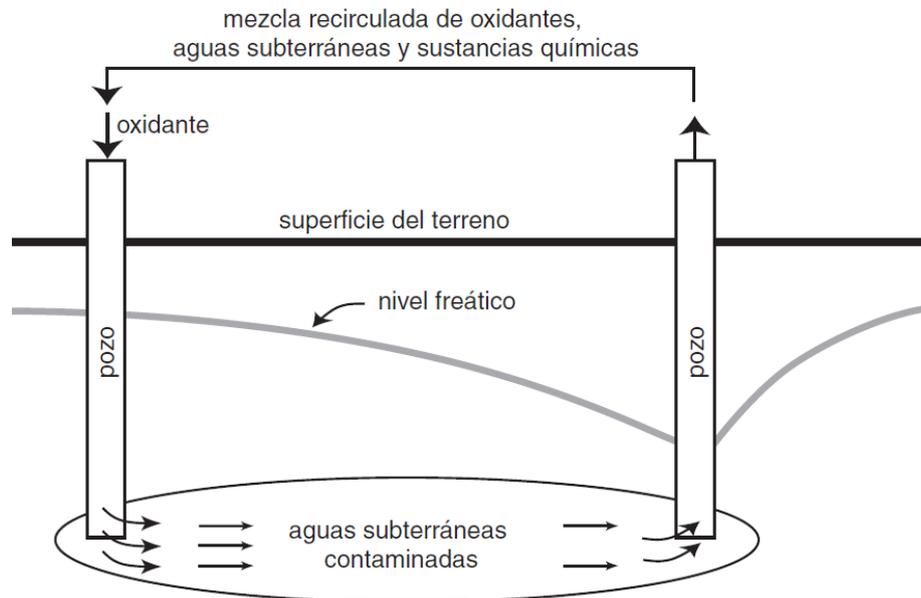
En la selección de esta técnica influyen también los siguientes factores, entre otros:

- Se debe comprender bien el flujo del agua subterránea a fin de proyectar el sistema de pozos para un lugar determinado. Posiblemente se necesiten extensos estudios sobre el terreno para lograr un conocimiento acabado del flujo del agua subterránea.
- Es necesario comprender bien la composición y disposición de las capas subterráneas para prever el trayecto que seguirán el líquido de lavado y los contaminantes y cerciorarse de que los contaminantes no se extiendan fuera del lugar donde se pueden recoger.
- Como el lavado del suelo in situ se adapta al tratamiento de determinados contaminantes, no es muy eficaz para los suelos contaminados con una mezcla de sustancias peligrosas, como metales y aceites. Sería difícil preparar una disolución de lavado capaz de retirar eficazmente varios tipos diferentes de contaminantes al mismo tiempo.

## 1.2. Oxidación química

La oxidación química in situ se realiza, perforando pozos a distintas profundidades en la zona contaminada. Mediante los pozos se bombea el oxidante al interior del suelo (Figura 2).

**Figura 2. Oxidación química in situ**



Fuente: *Guía del Ciudadano para la Oxidación Química*. US EPA, 2001

El oxidante se mezcla con las sustancias químicas peligrosas y las descompone. Cuando se concluye el proceso, lo que queda atrás es sólo agua y sustancias químicas inofensivas. Para descontaminar un sitio con mayor rapidez, se bombean los oxidantes por un pozo y se extraen por el otro. Este método ayuda a que se mezcle el oxidante con las sustancias químicas peligrosas en las aguas subterráneas y el suelo. Una vez que se bombea la mezcla hacia el exterior, se vuelve a bombear al interior (se recircula) por el primer pozo. A medida que continúa el bombeo y la mezcla, se descontamina una mayor cantidad de suelo y aguas subterráneas.

Puede resultar difícil bombear oxidantes en el lugar adecuado del suelo. Por eso, antes de comenzar a perforar, se deben estudiar las condiciones de los suelos y las aguas subterráneas. ¿Dónde se halla la contaminación? ¿Cómo se difundirá el oxidante a través del suelo y de las aguas subterráneas hasta llegar a los contaminantes?

El oxidante de uso más común que se emplea en la descontaminación es el peróxido de hidrógeno o agua oxigenada. Otro de empleo corriente es el permanganato potásico, que resulta más económico. Ambos oxidantes se bombean en forma líquida en disolución acuosa. Cada uno presenta ventajas según el sitio. Otro oxidante fuerte es el ozono, pero por ser un gas, puede resultar más difícil de emplear.

En algunos sitios, se emplea un catalizador junto con el oxidante. El catalizador es una sustancia química que aumenta la potencia o la velocidad de un proceso. Por ejemplo, si se mezcla el agua

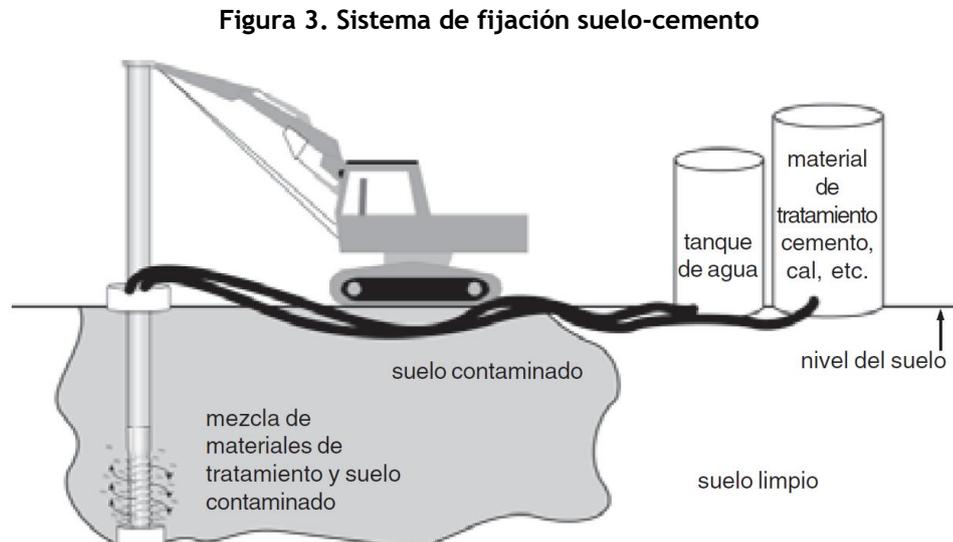
oxigenada con un catalizador de hierro, se producen radicales libres que son capaces de destruir mayor cantidad de sustancias químicas peligrosas, que cuando se emplea el agua oxigenada sola.

La oxidación química puede crear suficiente calor como para hacer hervir el agua. El calor puede hacer que las sustancias químicas que se hallan en el subsuelo se evaporen, es decir, que se transformen en gases. En ese caso, los gases ascienden a través del suelo hacia la superficie del terreno donde deben ser capturados y descontaminados.

En general, la oxidación química proporciona tiempos de descontaminación rápidos en comparación con otros métodos in situ. Los tiempos de limpieza pueden medirse en meses, y no en años.

### 1.3. Solidificación/estabilización

La solidificación in situ se basa en la inyección directa del medio de fijación en el suelo, mediante la ejecución de sondeos (véase la Figura 3). Luego, el suelo tratado que queda en el sitio se cubre con suelo limpio o un pavimento.



Fuente: Guía para el Ciudadano sobre Solidificación/Estabilización. US EPA 2003

### 1.4. Vitrificación

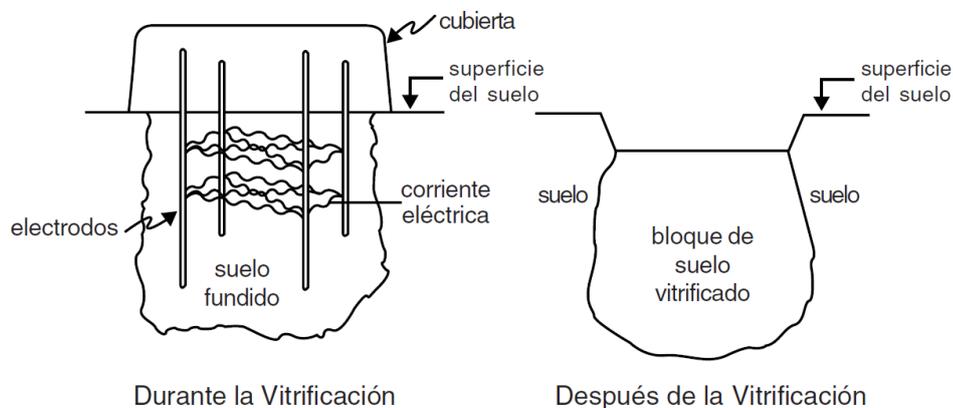
En el proceso de vitrificación in situ se implantan una serie de electrodos en el suelo hasta la profundidad que se quiere descontaminar (véase la Figura 4). Para facilitar el paso de la corriente eléctrica por el suelo e iniciar el proceso se implantan trozos de grafito y masa de vidrio entre los

electrodos. El calor de la corriente de alta intensidad funde el grafito, que poco a poco es consumido por oxidación. La corriente es transmitida al suelo fundido, que ya tiene una conductividad alta. Cuando la fusión prosigue, los componentes no volátiles se incorporan a la masa fundida y los compuestos orgánicos son destruidos mediante pirólisis. Los derivados de la pirólisis se evaporan a la superficie de la zona vitrificada, donde se queman en presencia de oxígeno.

Los compuestos inorgánicos son encapsulados en la masa vitrificada. Las corrientes convectivas en la masa mezclan los materiales presentes en el suelo. Cuando se para la corriente, se enfría y solidifica la masa vitrificada. Una campana que cubre la zona de tratamiento recoge los gases de combustión, que se depuran antes de su evacuación a la atmósfera.

La aplicabilidad de la vitrificación in situ depende de las características del espacio contaminado. Si la conductividad eléctrica del suelo es baja, se puede mezclar con arena, vidrio, grafito, etc., para mejorar la eficacia del proceso. La aplicación del método a suelos saturados con agua resulta costosa, pues sería necesario evaporarla antes de que se produzca la fusión o bien provocar un descenso del nivel de las aguas subterráneas.

**Figura 4. Vitrificación**



Fuente: Guía para el Ciudadano sobre Vitrificación. US EPA 2003

Este método es utilizado comercialmente en el Reino Unido para tratar suelos con amianto y residuos radioactivos.

## 1.5. Extracción de vapores o aireación

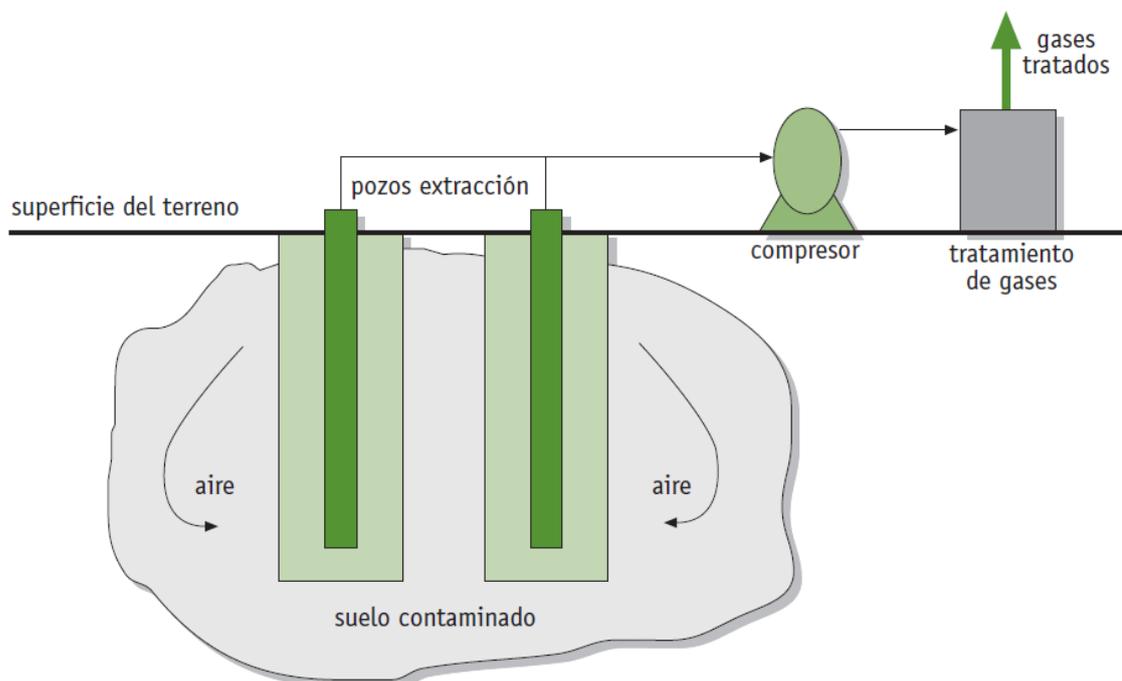
La extracción de vapores del suelo se conoce también como volatilización in situ, volatilización mejorada, ventilación del suelo in situ, aireación forzada del suelo, remoción in situ por chorro de aire o extracción al vacío.

Es un proceso relativamente sencillo que, como su nombre indica, consiste en la extracción de contaminantes del suelo en forma de vapor. Por lo tanto, sirve para eliminar los compuestos orgánicos volátiles y algunos semivolátiles de la zona no saturada del subsuelo.

Por medio de un sistema de pozos, empleando vacío (Figura 5) y/o presión, se crea una corriente de aire en el suelo, que arrastra los contaminantes en forma de vapor o gas, desplazándose por los espacios intersticiales hacia los pozos de extracción. Cuanto mayor sea la corriente de aire, mejor será la tasa de eliminación de contaminantes.

Una ventaja de la introducción de aire en el suelo es que puede estimular la biodegradación de algunos contaminantes.

**Figura 5. Extracción de vapores**



Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía, 2007

Los componentes básicos del sistema son: pozos de entrada de aire limpio, pozos de salida de aire contaminado, pozos de control y compresores, soplantes y/o bombas de vacío, conectados mediante una red de tuberías.

La situación de los pozos de entrada y salida de aire y la distancia entre ellos se determina mediante la aplicación de modelos matemáticos y pruebas piloto. Los pozos de control se sitúan alrededor de los pozos de recogida, para medir la presión intersticial de aire en el suelo. Un ejemplo de un sistema de este tipo se muestra en la Figura 5.

Los vapores extraídos con este proceso por lo general son sometidos a un tratamiento de adsorción con carbón, incineración, oxidación catalítica o condensación. También se han usado otros métodos, como tratamiento biológico y oxidación ultravioleta. El tipo de tratamiento que se seleccione dependerá de los contaminantes presentes y su concentración.

La extracción de vapores del suelo puede ser una buena opción para lugares contaminados con disolventes y otros compuestos orgánicos volátiles (como tricloroetano, tricloroetileno, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) y combustibles.

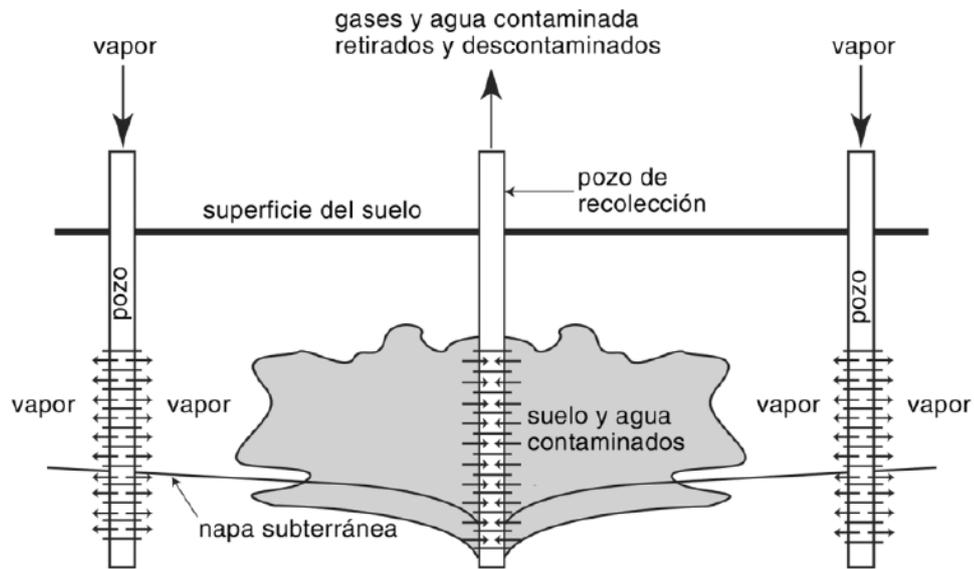
Como las propiedades del suelo tienen un efecto muy importante en el movimiento de los vapores del suelo, la eficacia y el diseño de sistemas de extracción de vapores del suelo y aspersión de aire dependen en gran medida de las propiedades del suelo. La extracción de vapores del suelo da mejor resultado en suelos sueltos no saturados, como arena, grava y limo grueso o lecho de roca fracturado. Sin embargo, se ha usado en suelos más densos, aunque el tratamiento podría llevar más tiempo. Además, cuanto más humedad contenga el suelo, más lenta será la extracción.

Existen unas técnicas que son mejoras o variantes de la extracción de vapores, que se describen a continuación.

### **1.5.1. Extracción de vapores del suelo mejorada térmicamente**

Se puede mejorar la extracción de vapores del suelo con la inyección de aire caliente o vapor (Figura 6) en el suelo contaminado por medio de los pozos de inyección. Esto ayuda a evaporar algunos compuestos menos volátiles del suelo.

**Figura 6. Extracción de vapores mejorada térmicamente**



Fuente: Guía para el Ciudadano sobre Métodos de Tratamiento Térmico In Situ. US EPA, 2002

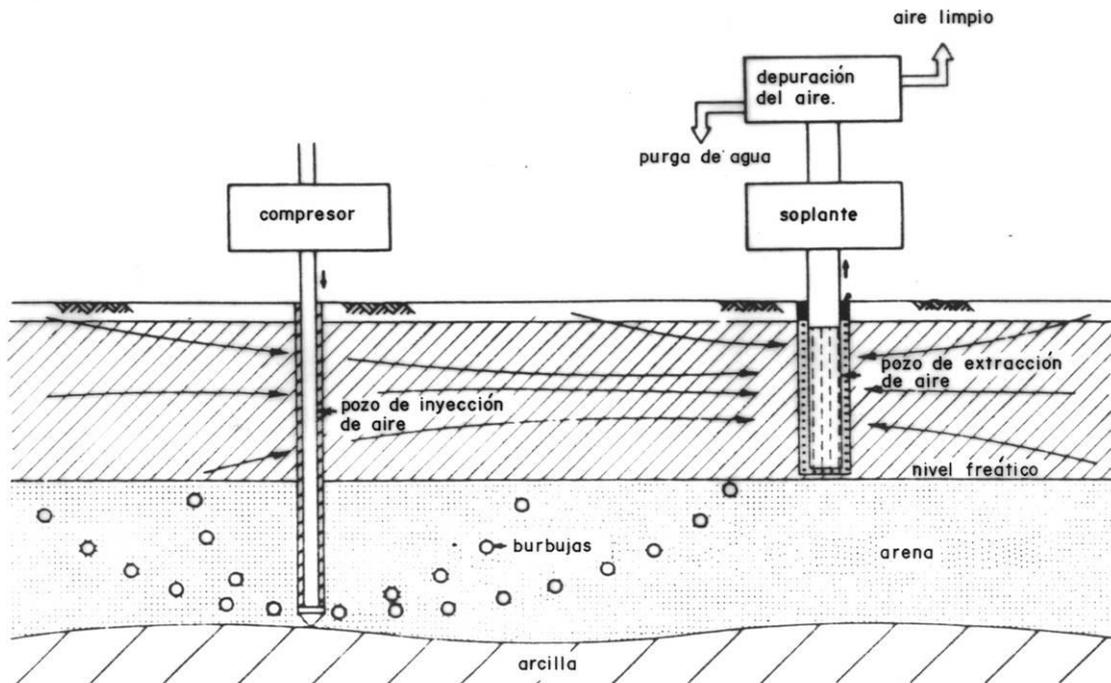
Otra mejora de la extracción de vapores del suelo es el uso de radiofrecuencias para calentar el suelo y vaporizar o volatilizar mejor los compuestos en suelos arcillosos y limosos.

### 1.5.2. Burbujeo de aire

Por sí sola, la extracción de vapores del suelo no puede retirar contaminantes de la zona saturada del subsuelo, o sea la que está debajo del nivel freático. En los lugares donde la contaminación está en la zona saturada, se puede usar una técnica llamada burbujeo de aire, junto con el sistema de extracción de vapores del suelo. El burbujeo de aire consiste en introducir aire por bombeo en la zona saturada, para que los contaminantes asciendan en burbujas hasta la zona no saturada, donde pueden extraerse por medio de los pozos del sistema de extracción de vapores del suelo (figura 7).

Para que la aspersión de aire dé resultado, el suelo de la zona saturada debe estar suficientemente suelto, como para que el aire inyectado pueda escapar fácilmente y ascender hasta la zona no saturada. Por lo tanto, la aspersión de aire actuará con mayor celeridad en lugares con suelo de grano grueso, como arena y grava.

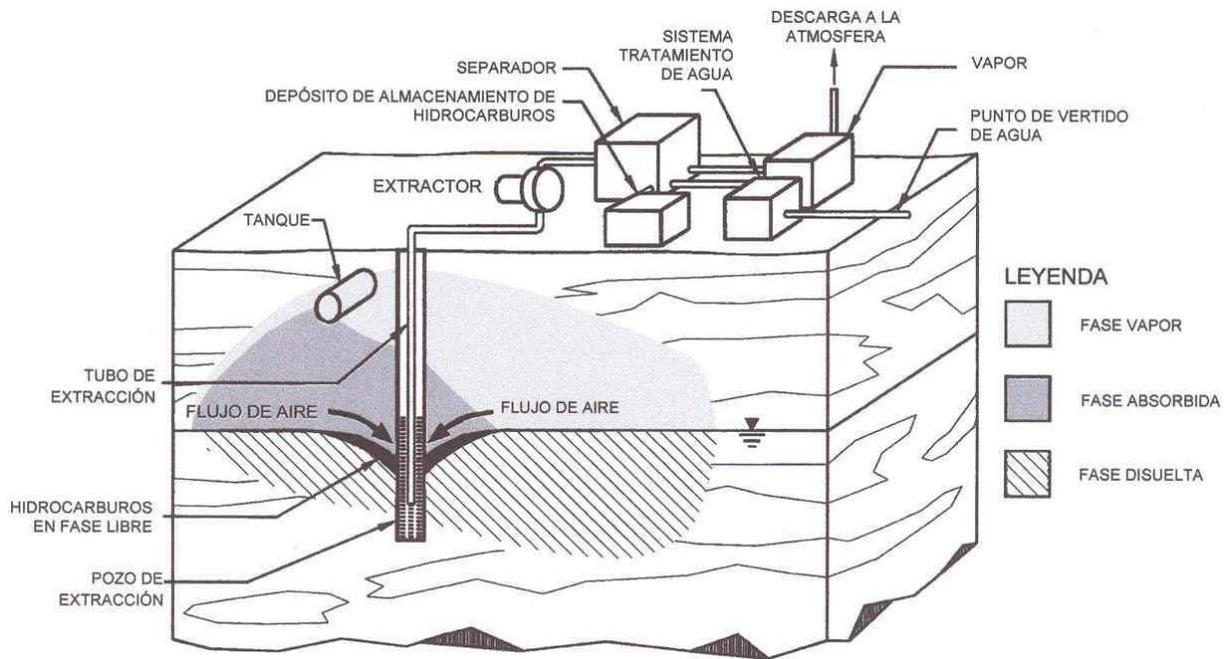
Figura 7. Sistema combinado de extracción de vapores del suelo y aspersión de aire



### 1.5.3. Extracción de doble fase

La extracción de doble fase es un sistema de tratamiento similar a la extracción de vapores del suelo, pero los pozos de extracción son más profundos y llegan a la zona saturada, debajo de la capa freática. Se aplica un fuerte vacío por medio de los pozos de extracción para extraer simultáneamente agua subterránea y vapores del subsuelo (ver Figura 8). Cuando los vapores y el agua subterránea llegan a la superficie, se separan y se someten a un tratamiento. En suelos densos y arcillosos, la extracción de doble fase es más eficaz que el método corriente de extracción de vapores. Cuando la extracción de doble fase se combina con tecnologías biológicas, burbujeo de aire o bioaireación, la limpieza lleva menos tiempo.

**Figura 8. Sistema de extracción de doble fase**



Fuente: Tratamiento del suelo y agua freática contaminada. Juan M. Rogel Quesada

## 1.6. Separación electrocinética

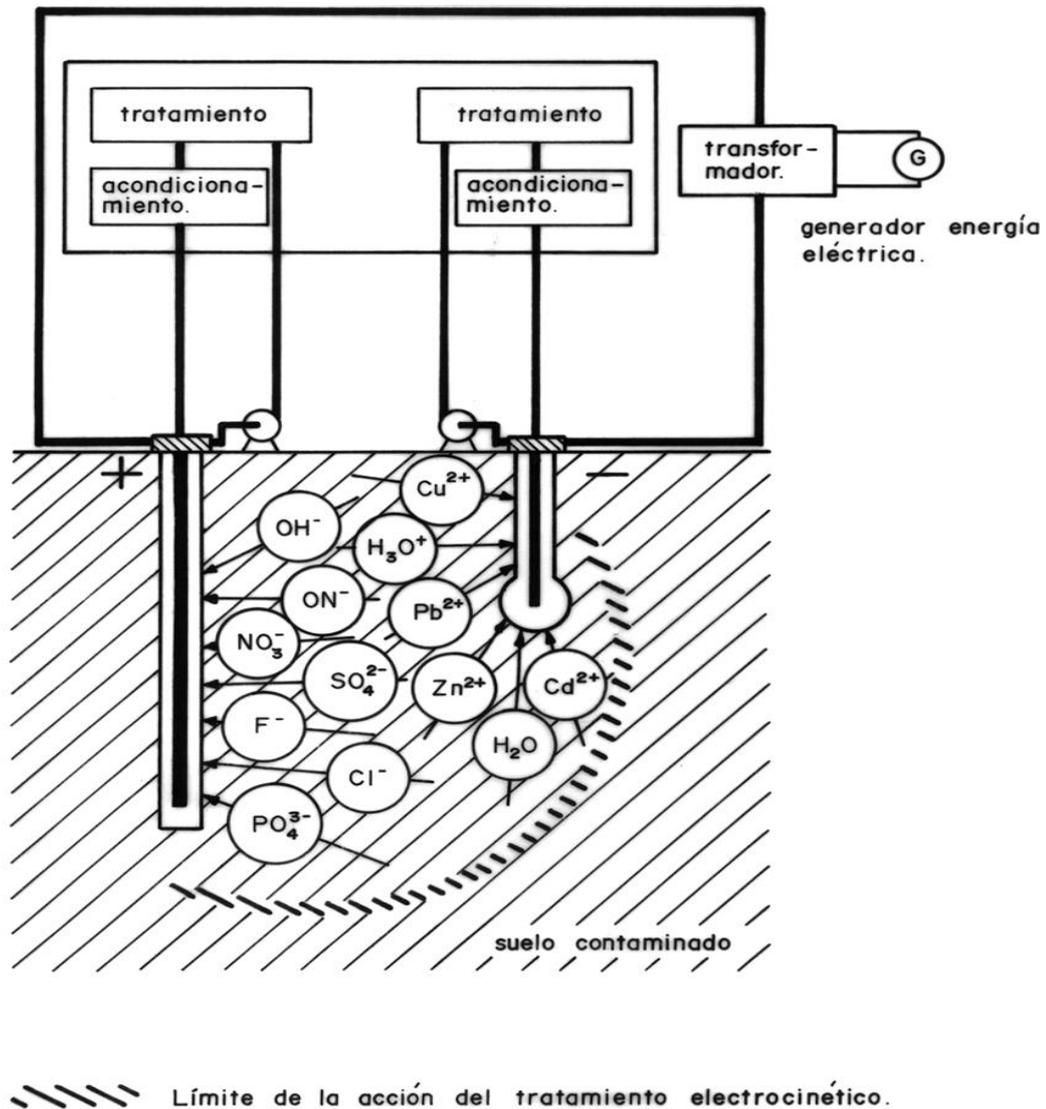
La separación electrocinética está basada en un fenómeno producido al aplicar un campo eléctrico al suelo, que provoca la migración de los contaminantes iónicos hacia los electrodos. Es un método desarrollado para eliminar metales pesados y otros contaminantes iónicos del suelo y de las aguas subterráneas.

El núcleo de la instalación está compuesto por los electrodos y su recipiente protector, que se pueden instalar a cualquier profundidad (véase la Figura 9).

Los recipientes protectores de los electrodos están llenos con disoluciones químicas y conectados a dos sistemas separados de circulación (uno del cátodo y otro del ánodo). En estas disoluciones se incorporan los contaminantes, que luego son eliminados en una instalación de depuración.

Otra posible aplicación es el uso para creación de barreras electrocinéticas, que pueden ser instaladas alrededor de vertederos o espacios industriales, donde se ha descubierto que existe contaminación, o donde la contaminación podría extenderse y afectar a otras zonas.

Figura 9. Separación electrocinética



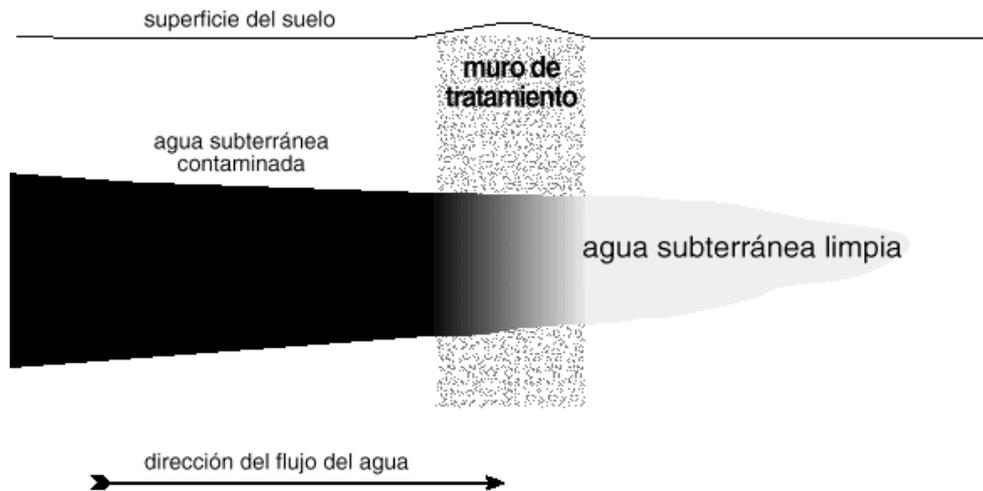
## 1.7. Muros de tratamiento

Los muros de tratamiento, llamados también muros de tratamiento pasivo o barreras permeables, son estructuras subterráneas para tratar agua subterránea contaminada in situ.

Para construir muros de tratamiento, se hace una zanja gigante a través de un curso de agua subterránea contaminada y se rellena con un material seleccionado minuciosamente por su capacidad para eliminar determinados tipos de contaminantes (relleno reactivo). Cuando el agua subterránea

contaminada pasa por el muro de tratamiento, los contaminantes quedan atrapados en el muro o salen transformados en sustancias inocuas (figura 10).

**Figura 10. Diagrama de un muro de tratamiento**



Fuente: *Guía del Ciudadano para las Barreras Reactivas Permeables*. US EPA, 2001

El relleno reactivo del muro de tratamiento con frecuencia se mezcla con arena u otro material poroso para que sea más permeable que el suelo que lo rodea. De esta forma se encauza el agua para que fluya por el muro, al ofrecerle "el trayecto de menor resistencia". En algunos lugares se agrega un sistema de embudos subterráneos para dirigir el agua contaminada hacia el muro.

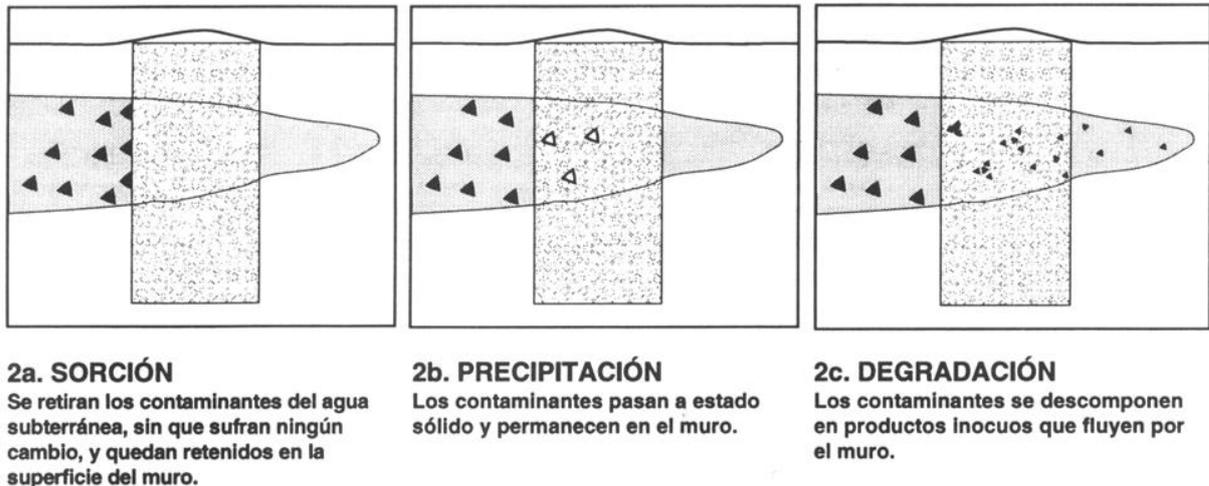
La ventaja principal de los muros de tratamiento, en comparación con métodos tradicionales tales como el bombeo y tratamiento, es que son sistemas pasivos que tratan los contaminantes in situ. No es necesario excavar suelo contaminado o bombear agua contaminada, no tienen piezas que puedan averiarse, no se necesita electricidad y, como no hay que instalar ningún aparato en la superficie, se puede usar el lugar mientras se limpia. Se calcula que, usando muros de tratamiento en vez de bombear agua contaminada, se puede ahorrar por lo menos el 50% del costo.

El sitio ideal para un muro de tratamiento es un lugar con suelo arenoso poroso, contaminado hasta una profundidad de 15 m como máximo y un flujo de agua subterránea abundante y constante.

Para que el muro de tratamiento dé resultado, es necesario realizar un estudio pormenorizado del medio subterráneo y comprender el contaminante y el flujo del agua. En estudios de laboratorio se han observado casos de atascamiento y, sin embargo, hasta ahora no se ha producido este problema sobre el terreno, pero los muros fueron construidos hace pocos años.

El relleno que se selecciona para un muro depende de los tipos de contaminantes que haya en el lugar. Cada tipo de relleno actúa por medio de procesos físico-químicos diferentes: sorción, precipitación y degradación.

Figura 11. Muros de tratamiento por sorción, precipitación y degradación



Fuente: *Guía del Ciudadano para las Barreras Reactivas Permeables*. US EPA, 2001

Las barreras de sorción contienen rellenos que retiran los contaminantes del agua subterránea, capturándolos físicamente y reteniéndolos en su interior (figura 11.2a). Algunos ejemplos de estos adsorbentes son las ceolitas, partículas diminutas con forma de jaula que atrapan moléculas de contaminantes en su interior, y el carbón activado, que tiene una superficie muy áspera a la cual se adhieren los contaminantes al pasar.

Las barreras de precipitación contienen rellenos que reaccionan con los contaminantes del agua subterránea que pasan por el muro (figura 11.2b). La reacción produce un cambio en los contaminantes disueltos en el agua subterránea: salen del estado de disolución y se precipitan. Estos productos "insolubles" quedan atrapados en la barrera, y el agua subterránea sale limpia por el otro lado. Por ejemplo, el plomo es un contaminante común en sitios industriales donde se han reciclado baterías de automóviles sin las debidas precauciones. El ácido de las baterías saturado de plomo se filtra por el suelo y llega hasta el agua subterránea de estos sitios. Una barrera de precipitación rellena con piedra caliza, erigida a través del curso de agua subterránea ácida contaminada con plomo, neutraliza el ácido; en consecuencia, el plomo precipita en forma de hidróxido, pasando a estado sólido y quedando atrapado en la barrera. El cromo sumamente tóxico (VI), subproducto de las operaciones de revestimiento metálico, se trata con barreras de precipitación en forma similar y se convierte en cromo inmóvil (III), que queda atrapado en la barrera.

Las barreras de degradación causan reacciones que descomponen o "degradan" los contaminantes del agua subterránea, convirtiéndolos en productos inocuos (figura 11.2c). Por ejemplo, el relleno de gránulos de hierro degrada ciertos compuestos orgánicos volátiles. Los muros también pueden rellenarse con una mezcla de nutrientes y fuentes de oxígeno que estimulan la actividad de los microorganismos del agua subterránea, que se encargan de la biodegradación de los contaminantes.

Se han realizado amplias investigaciones y pruebas con respecto al uso de hierro para el tratamiento de contaminantes clorados. Cuando los contaminantes entran en contacto con los gránulos de hierro se produce la reacción química común de oxidación, por la cual el hierro se oxida, que en este caso se aprovecha con un fin beneficioso. Con la oxidación del hierro, se retira del compuesto el componente tóxico del contaminante (generalmente átomos de cloro). Los gránulos de hierro se disuelven en este proceso, pero el metal desaparece tan lentamente que, según los cálculos de los ingenieros, las barreras correctivas siguen actuando durante varios años e incluso décadas. Estos gránulos del hierro son un derivado de procesos de fabricación, de modo que su uso como material para barreras tiene la ventaja adicional de que permite reciclar este material.

El hierro se puede usar para degradar varios compuestos orgánicos clorados comunes, como tricloroetileno, tetracloroetileno, dicloroetano y 1,1,1-tricloroetano. Si se mezcla paladio (otro metal) con los gránulos de hierro, el muro se puede usar para tratar contaminantes que no se pueden tratar con hierro solamente.

## 2. Tecnologías biológicas

### 2.1. Basadas en la acción de los microorganismos

Estas tecnologías biológicas in situ tal vez no den buenos resultados en suelos arcillosos o en subsuelos altamente estratificados, porque no se puede distribuir oxígeno de manera uniforme en toda la zona que necesita tratamiento. A veces se tarda años en alcanzar los objetivos de limpieza, dependiendo principalmente de cuán biodegradables sean determinados contaminantes. Con contaminantes que se degradan fácilmente quizá se tarde menos.

La meta de las tecnologías biológicas in situ en condiciones aerobias es suministrar oxígeno y nutrientes a los microorganismos del suelo que degradan los contaminantes. Existen dos métodos de suministro de oxígeno:

### 2.1.1. Bioaireación

Los sistemas de bioaireación introducen aire de la atmósfera en el suelo, en la zona no saturada del suelo (por encima del nivel freático), por medio de pozos de inyección situados en el lugar contaminado. La cantidad, la ubicación y la profundidad de los pozos dependen de muchos factores geológicos y consideraciones técnicas.

Se puede usar un ventilador, para forzar la entrada de aire en el suelo a través de los pozos de inyección. El aire fluye por el suelo, y los microorganismos usan el oxígeno del aire.

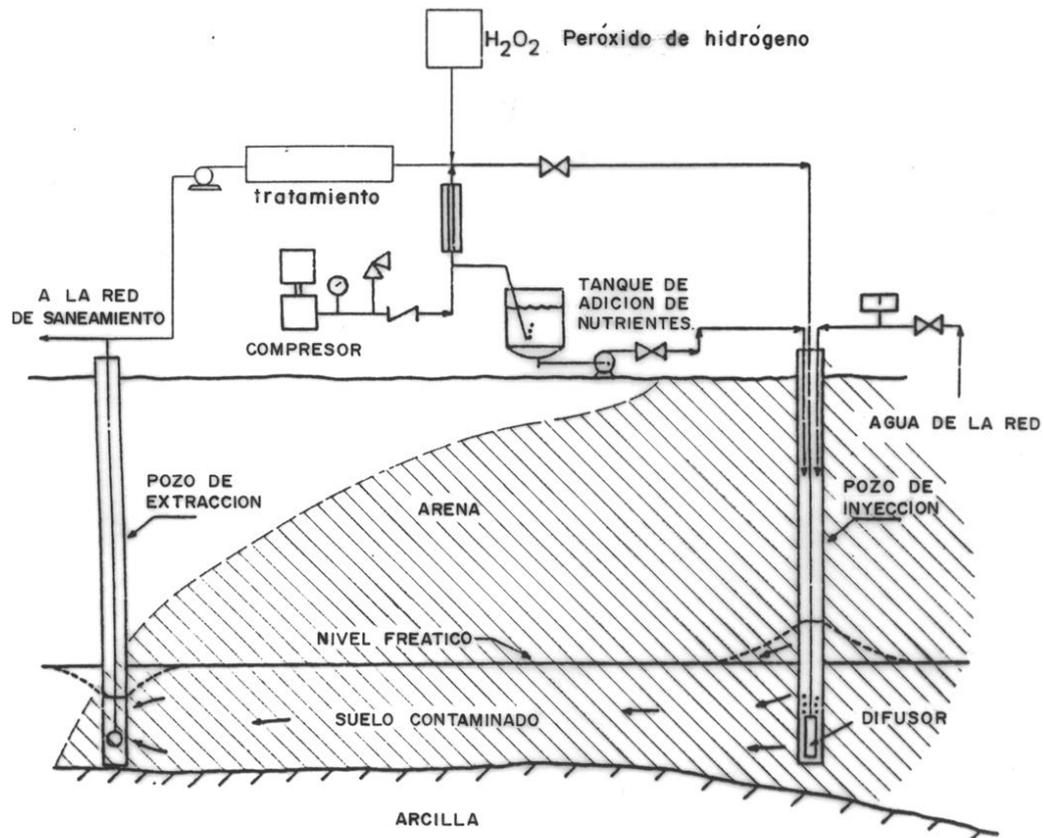
### 2.1.2. Inyección de peróxido de hidrógeno

Con esta técnica se suministra oxígeno haciendo circular una disolución de peróxido de hidrógeno por el suelo contaminado. Como consiste en introducir una disolución en el suelo (que podría infiltrarse hasta llegar al agua subterránea), hay que tener en cuenta la posibilidad de contaminar el agua subterránea. Generalmente se usa un sistema de tuberías o de aspersores para introducir peróxido de hidrógeno en suelos contaminados a poca profundidad. Para suelos contaminados a mayor profundidad se usan pozos de inyección. Se pueden introducir también nutrientes, como nitrógeno y fósforo, para acelerar el crecimiento de los microorganismos.

También pueden diseñarse, sistemas biocorrectivos in situ para el agua subterránea (véase la figura 12), que por lo general incluyen pozos de extracción para sacar el agua subterránea del suelo, un sistema de tratamiento del agua en la superficie, una fuente de aporte de oxígeno al agua subterránea contaminada, y pozos de inyección para reintroducir en el subsuelo el agua subterránea "acondicionada" (se le pueden agregar nutrientes).

Una de las limitaciones de estos sistemas es que las diferencias en la disposición y la densidad de las capas del suelo podrían llevar al agua subterránea acondicionada reinyectada a seguir ciertos trayectos preferidos, sin llegar a algunos lugares contaminados.

Figura 12. Bio-restauración *in situ*



## 2.2. Basadas en la acción de las plantas

Estas técnicas se han denominado medidas fitocorrectivas y consisten en el uso de plantas y árboles para limpiar agua y suelo contaminados. Cultivar plantas en un lugar contaminado, y en algunos casos cosecharlas, como método correctivo, es una técnica pasiva estéticamente agradable, que aprovecha la energía solar y se puede usar junto con métodos de limpieza mecánicos o en algunos casos en vez de métodos de este tipo.

Las medidas fitocorrectivas pueden usarse para limpiar metales, plaguicidas, disolventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburos aromáticos policíclicos y lixiviados de vertederos. La fitocorrección se combina con otros métodos de limpieza en la etapa de "acabado." Aunque las medidas fitocorrectivas son mucho más lentas que los métodos mecánicos y llegan solamente a la profundidad hasta la cual llegan las raíces, pueden eliminar los últimos restos de contaminantes atrapados en el suelo, que a veces quedan con las técnicas mecánicas de tratamiento.

Generalmente, las medidas fitocorrectivas se usan en lugares con baja concentración de contaminantes y en suelos, cursos de agua y agua subterránea poco profundos. Sin embargo, los investigadores han observado que con árboles (en vez de plantas más pequeñas) se puede tratar la contaminación a mayor profundidad, porque las raíces de los árboles penetran a mayor profundidad en el suelo. El agua subterránea contaminada a gran profundidad se puede extraer por bombeo y usar para regar arboledas.

Se necesitan más investigaciones para estudiar los efectos en la cadena alimentaria que se producirían, si algunos insectos y roedores pequeños comieran las plantas con metales acumulados y fuesen, a su vez, comidos por mamíferos de mayor tamaño. Además, los científicos todavía no saben si se pueden acumular contaminantes en las hojas y la madera de árboles usados con fines de fitocorrección y ser liberados después cuando se caen las hojas en el otoño o cuando se usa leña o corteza desmenuzada de los árboles.

Las plantas actúan como filtros o trampas y pueden descomponer o degradar contaminantes orgánicos o estabilizar contaminantes metálicos. A continuación se describen algunos de los métodos que se están probando.

### 2.2.1. Medidas correctivas para metales

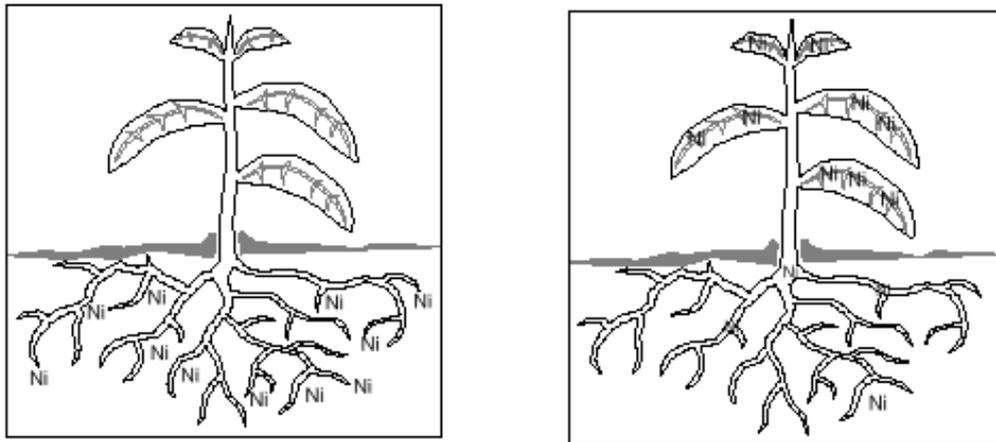
En lugares contaminados con metales, se usan plantas para estabilizar o retirar los metales del suelo y del agua subterránea por medio de dos mecanismos: fitoextracción y rizofiltración.

#### 2.2.1.1. Fitoextracción

La fitoextracción, conocida también como fitoacumulación, es la captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (figura 13). Algunas plantas absorben cantidades extraordinarias de metales en comparación con otras. Se selecciona una o varias plantas de este tipo y se plantan en un sitio según los metales presentes y las características del lugar. Después de un tiempo, cuando las plantas han crecido, se cortan y se incineran, o se deja que se transformen en abono vegetal para reciclar los metales. Este procedimiento se puede repetir la cantidad de veces que sea necesario, para reducir la concentración de contaminantes en el suelo a límites aceptables. Si se incineran las plantas, las cenizas deben colocarse en un vertedero para desechos peligrosos, pero la cantidad de ceniza será sólo alrededor del 10% del volumen de los desechos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo.

Los mejores candidatos para la fitoextracción son el níquel, el cinc y el cobre, porque son los preferidos de las 400 plantas, aproximadamente, que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales. Se están estudiando y probando plantas que absorben plomo y cromo.

**Figura 13. Captación de metales (níquel) por fitoextracción**



Fuente: Guía del Ciudadano para la Fitocorrección. US EPA, 2001

#### 2.2.1.2. Rizofiltración

La rizofiltración (rizo- significa raíz) es una técnica prometedora para abordar el problema de la contaminación del agua con metales. La rizofiltración es similar a la fitoextracción, pero las plantas que se usan para la limpieza se cultivan en invernaderos con las raíces en agua, en vez de tierra. Cuando las plantas tienen un sistema de raíces bien desarrollado, se recoge agua contaminada de un vertedero, se transporta hasta el lugar donde están las plantas y se colocan las plantas en esta agua. Las raíces absorben el agua junto con los contaminantes. A medida que las raíces se saturan de contaminantes, se cortan y se eliminan.

Además de extraer metales del agua, la rizofiltración puede ser útil para tratar vertidos industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radiactivos. Por ejemplo, las semillas de girasol dieron resultado para retirar contaminantes radiactivos del agua de una laguna en una prueba realizada en Chernobyl (Ucrania).

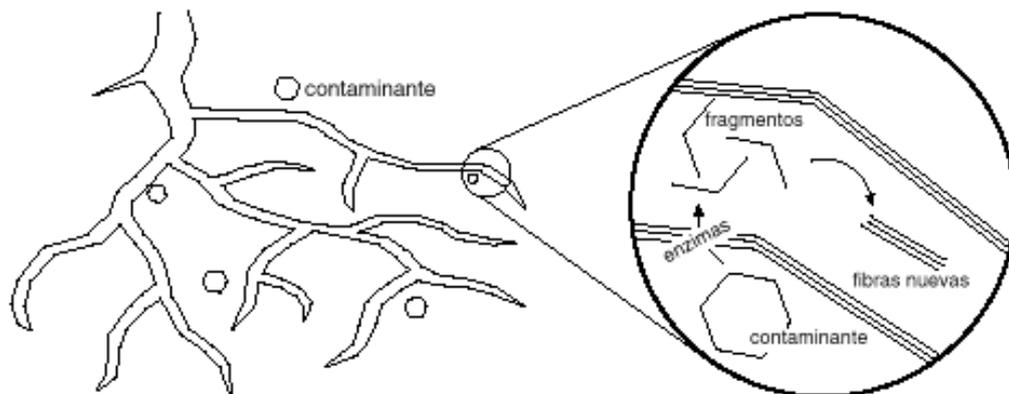
## 2.2.2. Tratamiento de contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos (es decir, los que contienen átomos de carbono e hidrógeno) son comunes en el medio ambiente. Hay varias formas en que se pueden usar plantas para la fitodegradación de estos contaminantes: fitodegradación, biodegradación mejorada de la rizosfera, bombeo orgánico y fitovolatilización.

### 2.2.2.1. Fitodegradación

La fitodegradación es un proceso mediante el cual las plantas degradan (descomponen) contaminantes orgánicos. En algunos casos, los contaminantes degradados en moléculas más simples se usan para acelerar el crecimiento de las plantas (figura 14). Las plantas tienen enzimas, categoría amplia de sustancias químicas que causan reacciones químicas rápidas. Algunas enzimas se descomponen y convierten desechos de municiones, otras degradan disolventes clorados tales como tricloroetileno y otras degradan herbicidas.

Figura 14. Destrucción de contaminantes orgánicos por fitodegradación



Fuente: Guía del Ciudadano para la Fitocorrección. US EPA, 2001

Las enzimas de las plantas descomponen (degradan) los contaminantes orgánicos. Los fragmentos se incorporan en el tejido nuevo de las plantas.

### 2.2.2.2. Biodegradación mejorada de la rizosfera

La biodegradación intensificada por los microorganismos de la rizosfera se produce en el suelo que rodea las raíces de las plantas (la rizosfera). Es un proceso mucho más lento que la fitodegradación. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcar, alcohol y ácidos) contienen

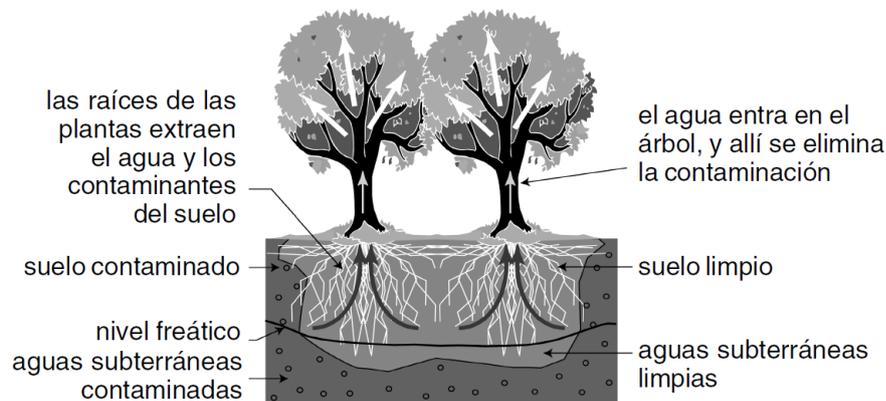
carbono orgánico, del cual se alimentan los microorganismos del suelo, y los nutrientes adicionales intensifican su actividad. Además, las plantas aflojan el suelo y facilitan la infiltración de agua, facilitando así la biodegradación.

### 2.2.2.3. *Bombeo orgánico*

Los árboles pueden realizar una acción de bombeo orgánico, cuando sus raíces bajan hacia la capa freática, formando una masa densa de raíces que absorbe una gran cantidad de agua (Figura 15). Los álamos, por ejemplo, absorben 113 l/d de agua, y hay una variedad de álamo (*Populus deltoides*) que absorbe hasta 1.325 l/d.

La acción de bombeo de las raíces disminuye la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea y el agua potable. En zonas agrícolas, los álamos plantados a lo largo de cursos de agua reducen el excedente de fertilizantes y herbicidas que va a parar a los cursos de agua y al agua subterránea. Asimismo, los árboles plantados en vertederos como sustitutos orgánicos de la tradicional capa de arcilla o de plástico absorben agua de lluvia que, de lo contrario, se filtraría por el vertedero y llegaría al fondo en forma de "lixiviado" contaminado.

**Figura 15. Eliminación de contaminantes orgánicos por bombeo**



Fuente: Guía del Ciudadano para la Fitocorrección. US EPA, 2001

### 2.2.2.4. *Fitovolatilización*

La fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. Los álamos, por ejemplo, volatilizan el 90% del TCE que absorben.