

Revisión comparativa de técnicas empleadas para la descontaminación “in situ” de suelos contaminados

Comparative review of techniques used for “in situ” remediation of contaminated soils

Mercedes Escusol Tomey^{1*} y Rafael Rodríguez Abad²

Palabras clave

contaminación de suelos;
contaminantes orgánicos;
contaminantes inorgánicos;
metales pesados;
descontaminación “in situ”;
técnicas físico-químicas;
técnicas biológicas;

Sumario

La contaminación del suelo puede influir en parámetros geotécnicos del mismo tales como la densidad de las partículas sólidas o la cantidad de agua en sus poros, así como variar su ángulo de rozamiento, modificar su estructura y textura, o producir cambios en las propiedades de los minerales que lo componen al incluir elementos contaminantes en su estructura. Por todo ello, la descontaminación del suelo es un factor importante a tener en cuenta en el ámbito de la geotecnia.

El presente trabajo se centra en las técnicas de descontaminación de suelos contaminados que se realizan “in situ”, ya que con éstas se pueden eliminar los contaminantes del suelo de una forma menos invasiva que con técnicas de remediación de tipo contención, confinamiento o “ex situ”, causando una menor alteración del suelo y, por tanto, modificando en menor grado sus propiedades mecánicas. Estos factores podrían resultar de gran importancia a la hora de realizar una actuación geotécnica sobre un suelo ya descontaminado.

Keywords

soil contamination;
organic pollutants;
inorganic pollutants;
heavy metals;
“in situ” remediation;
physico-chemical
techniques;
biological techniques;

Abstract

Soil pollution may influence the geotechnical parameters of the soil itself, properties such as solid particle density or water within its pores. It may also vary its friction angle, modify its structure and texture, or change the properties of its constitutive minerals due to the inclusion of polluting components. For these reasons, soil decontamination is an important factor to consider in geotechnics.

This work focuses on those soil decontamination techniques carried out “in situ”, since they allow to eliminate soil pollutants in a less invasive way than confinement, containment or “ex situ” remediation techniques, causing a minor soil alteration and, therefore, affecting less to its mechanical properties. These factors should be taken into account when carrying out a geotechnical performance on a previously decontaminated soil.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La contaminación del suelo

La contaminación de un suelo se produce por la liberación e infiltración de una sustancia considerada como contaminante en el terreno sea cual sea su concentración. No obstante, en la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados se define suelo contaminado como “*aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso procedentes de la actividad humana, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen por el Gobierno y así se haya declarado mediante resolución expresa*”.

La mayor parte de la contaminación de los suelos está causada por la acción del hombre (origen antropogénico), ya sea por descuido, negligencia o falta de conciencia, ya que todas las actividades que sustentan el desarrollo

económico de la sociedad conllevan la liberación de elementos no deseados que pueden alterar las propiedades físicas, químicas o biológicas naturales de los suelos, especialmente en el caso de que se realicen sin una planificación medioambiental adecuada.

El suelo ejerce cierta labor protectora contra la contaminación a través de su poder de amortiguación, capacidad natural de depuración de la contaminación. A la hora de abordar el estudio de un suelo, no basta sólo con detectar la presencia de las sustancias contaminantes sino que su concentración debe superar la *carga crítica*, o cantidad máxima permitida en el suelo sin que se produzcan efectos nocivos que no puedan ser amortiguados por el suelo.

Los factores que controlan esta reacción son: la *vulnerabilidad* de cada suelo, que representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes; la *biodisponibilidad* del contaminante, o su posible asimilación por los organismos del suelo; la *movilidad*, regula su distribución y transporte en el suelo o en otros medios; y la *persistencia*, que controla la duración de su efecto pernicioso en el suelo. Estos factores permiten evaluar los riesgos de determinadas actividades contaminantes y planificar actuaciones de acuerdo con el tipo de suelo. No obstante, la propia heterogeneidad del

* Corresponding author: mercescusol@gmail.com

¹ Facultad de Geología. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.

² Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, España.

suelo puede dificultar la caracterización de estos parámetros (Ortiz et al, 2007).

1.2. Contaminantes del suelo

Los agentes potencialmente contaminantes del suelo proceden generalmente de residuos derivados de actividades industriales, mineras, agrícolas y ganaderas, y se suelen clasificar en tres grupos diferentes: metales pesados, que se producen principalmente en la minería, sustancias inorgánicas tales como nitratos y fosfatos procedentes de abonos concentrados, y sustancias orgánicas tales como fitosanitarios e hidrocarburos.

1.3. Técnicas de recuperación de suelos contaminados

En la actualidad se dispone de un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes mediante la alteración de su estructura química con procesos químicos, térmicos o biológicos. Su aplicación depende de las características del suelo y del contaminante, la eficacia esperada con cada tratamiento, su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo.

Las técnicas se clasifican según la manera de actuación: son en *“in situ”* cuando actúan en el lugar en el que se localizan los contaminantes, o *“ex situ”* cuando se extrae el suelo para tratarlo en otro sitio bajo condiciones controladas. Los tratamientos *“in situ”* requieren un menor manejo del suelo, pero son más lentos y más difíciles de llevar a la práctica dada la dificultad de poner en contacto íntimo a los agentes de descontaminación con toda la masa de suelo contaminada. Por el contrario, los tratamientos *“ex situ”* suelen ser más costosos pero también más rápidos, consiguiéndose normalmente una recuperación más completa de la zona afectada que con los realizados *“in situ”*.

También se pueden clasificar en función de los objetivos que se quieren alcanzar a la hora de recuperar un suelo contaminado en (Kaifer et al, 2004):

- *Técnicas de contención*, con las que se aísla el contaminante en el suelo sin tener que actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en el propio suelo.
- *Técnicas de confinamiento*, empleadas para reducir la movilidad y evitar la migración de los contaminantes en el suelo, actuando sobre sus condiciones fisicoquímicas.
- *Técnicas de descontaminación*, dirigidas a disminuir la concentración de los contaminantes presentes en el suelo.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales técnicas empleadas para la recuperación de suelos contaminados.

En el presente artículo se realiza una recopilación bibliográfica y puesta a punto del estado del arte de las técnicas de recuperación de los suelos contaminados basadas en la descontaminación *“in situ”* del suelo, ya que este conjunto de técnicas alteran lo menos posible el terreno contaminado antes de que éste vaya a ser empleado como cimiento

en Ingeniería Civil o en edificación y construcción. Además, cuando se trata un suelo contaminado ya de por sí degradado por la presencia de contaminantes, no suele ver disminuidas aún más sus propiedades geomecánicas por la alteración o removilización del terreno causada tras la aplicación de técnicas de recuperación del suelo del tipo contención, confinamiento o descontaminación *“ex situ”*, ya que el suelo contaminado es tratado en su emplazamiento original sin realizar ningún tipo de excavación.

A continuación se exponen los diferentes procedimientos para la descontaminación *“in situ”* del suelo que se dividen en físico-químicos, biológicos o mixtos según el método que se emplee.

Tabla 1. Principales técnicas de recuperación de suelos (Ortiz et al, 2007)

Tipo de técnica	Aplicación	Tratamiento
Contención	<i>“in situ”</i>	Barreras verticales Barreras horizontales Barreras de suelo seco Sellado profundo Barreras hidráulicas
	<i>“in situ”</i>	Inyección de solidificantes Vitrificación
Confinamiento	<i>“ex situ”</i>	Estabilización físico-química Vitrificación
	<i>“in situ”</i>	Extracción Soil flushing Electrocinética Adición de correctores Barreras permeables reactivas Inyección de aire comprimido Pozos de recirculación
Descontaminación físico-química	<i>“ex situ”</i>	Lavado Oxidación ultravioleta
	<i>“in situ”</i>	Biodegradación asistida Biotransformación de metales Fitorrecuperación Bioventing Biosparging Lavado de suelos biológico
Descontaminación biológica	<i>“ex situ”</i>	Landfarming Biopilas Compostaje Lodos biológicos
	<i>“ex situ”</i>	Incineración Desorción térmica
Descontaminación térmica	<i>“ex situ”</i>	Extracción multifase Atenuación natural
Descontaminación mixta	<i>“in situ”</i>	

2. TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN “IN SITU” DE SUELOS

2.1. Extracción de vapor del suelo

La extracción de vapor del suelo consiste en aplicar un vacío para inducir el flujo de aire subterráneo y llevar los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y semivolátiles (SVOCs) del terreno a la superficie para su tratamiento. Para ello, se instalan inyectores de aire para pozos de extracción con los que inducir el flujo de aire a través de la matriz del suelo. El aire contaminado se hace llegar a la superficie pasando previamente por un separador de líquido/vapor para eliminar toda la humedad existente. El aire se descontamina por adsorción con filtros de carbón activo o mediante oxidación térmica.

En general, la extracción de aire se realiza de forma continua, hasta que la concentración de los contaminantes en el aire extraído alcanza un nivel mínimo y relativamente constante. El mantenimiento de niveles constantes durante períodos de varios meses se suele interpretar como un éxito del sistema SVE, dándose en tal caso el tratamiento por finalizado. En la figura 1 se muestra un esquema típico de un sistema de extracción de vapor (SVE) del suelo.

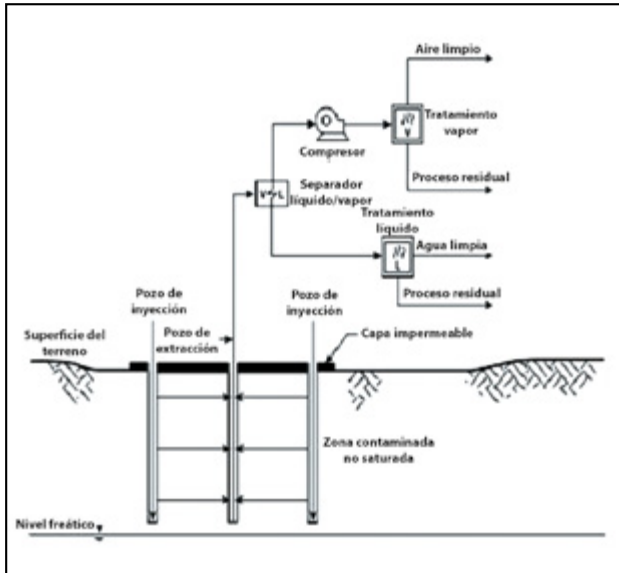


Figura 1. Esquema bidimensional del sistema de extracción de vapor del suelo (EPA 600/R-99/107, 2006).

Esta técnica es aplicable a suelos contaminados con sustancias volátiles y semivolátiles con una presión de vapor de al menos 100 N/m^2 y una constante de Henry superior a 0,01. Las condiciones óptimas de aplicación de esta técnica se dan cuando se trata un suelo con una permeabilidad mayor de 3 m/día y una concentración de VOCs inferior a 3.000 mg/kg , alcanzándose rendimientos de recuperación superiores al 95% en un periodo de tiempo de entre 3 y 9 meses.

La técnica SVE es más efectiva para el tratamiento de suelos bien drenados con permeabilidad elevada, tales como arenas y gravas, y un contenido bajo de carbono orgánico, siendo los suelos de baja permeabilidad o heterogéneos con alto contenido en materia orgánica los más difíciles de tratar mediante este procedimiento. En caso de tratar así un suelo heterogéneo resulta recomendable realizar de forma previa estudios piloto.

2.2. Extracción de agua

La extracción de agua se puede realizar tanto en la zona saturada del suelo como en la insaturada. Para la zona saturada se extrae el agua subterránea y se trata en la superficie, proceso denominado como "pump & treat". Para la zona no saturada, primero hay que infiltrar agua que pasa por la zona contaminada, lava los compuestos y al llegar a la zona saturada, se extrae y se tratan en superficie. En la página web http://infohouse.p2ric.org/ref/14/0_initiatives/init/feb97/novocs.htm se muestra el esquema de un sistema típico de este tipo de tratamiento.

La extracción de agua puede provocar asentamientos en suelos arcillosos y limosos, por lo que hay que considerar la

reinfiltración de agua ya tratada para aminorar tal efecto. Por otra parte, el plazo de recuperación está condicionado por la transmisividad del suelo y por el grado de adsorción de los contaminantes a las partículas del mismo. Esta técnica se aplica con mayor efectividad en terrenos poco permeables (arcillas, limos y turbas). El agua extraída debe ser depurada en todos los casos escogiendo la técnica más apropiada al efecto.

2.3. Extracción de fase libre

La extracción de fase libre se utiliza para eliminar los hidrocarburos en esta fase que se sitúan por encima del nivel freático. La instalación es muy similar a las empleadas en la extracción de agua, aunque se utilizan materiales de construcción compatibles con la fase libre. En la figura 2 se puede observar un pozo de extracción de fase libre.

Para la extracción se suelen utilizar bombas tipo "skimmer" que permiten la entrada selectiva de producto a través de una membrana. La permeabilidad del suelo puede ser un factor limitante, ya que debe ser suficiente para garantizar la afluencia de la fase libre a los sistemas de extracción. Otro factor que modula el tiempo de extracción es la viscosidad de los fluidos a extraer, ya que para fluidos muy viscosos como alquitrán o aceites de motor, el flujo hacia los pozos de extracción es muy lento. La fase libre puede ser recuperada y reutilizarse como combustible de bajo poder calorífico, siempre que tenga calidad suficiente para ello.

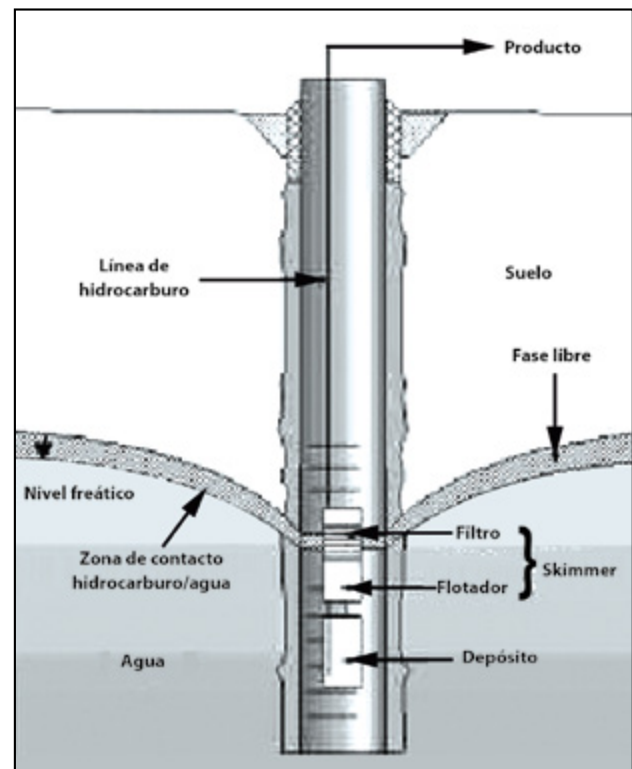


Figura 2. Esquema del pozo de extracción de fase libre (Kaifer et al, 2004).

2.4. Eliminación de la fase no acuosa pesada

Dentro de los distintos tipos de contaminación que afectan a los suelos, se encuentran los DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquids*), contaminantes más densos que el agua, que tienden a descender por debajo del nivel freático

y acumularse en la superficie de contacto entre los materiales permeables y los menos permeables subyacentes.

La eliminación de este tipo de contaminación se apoya en su extracción y posterior tratamiento en superficie. La extracción se realiza de forma similar a la de la fase libre pero colocando el filtro y el skimmer en la interfase agua-fase densa. Para poder diseñar correctamente los sistemas de recuperación de DNAPL resulta fundamental conocer su localización en el subsuelo, la cual suele ser, por regla general, bastante irregular. Debido a esto y a la densidad y viscosidad de los compuestos, su extracción puede llegar a durar hasta 60 años.

2.5. Soil Flushing

El lavado de suelo “*in situ*” mediante la técnica “*soil flushing*” implica inundar una zona contaminada con una solución apropiada para eliminar los contaminantes del suelo que hace que se movilicen por solubilización, formación de emulsiones o reacción química con las soluciones de lavado. Después de pasar por la zona de contaminación, el agua subterránea y los fluidos extractantes se capturan y bombean a la superficie utilizando pozos de extracción, donde son finalmente tratados (Son et al, 2003). En la figura 3 se muestra un esquema del sistema “*soil flushing*”.

El “*soil flushing*” es más eficiente en suelos homogéneos con una permeabilidad hidráulica $K = 10^{-3}$ cm/s (NAVFAC, 2002). Otros factores del suelo que pueden afectar a la eficiencia del tratamiento son una alta capacidad de intercambio catiónico, elevado contenido en materia orgánica y pH del terreno tratado.

Esta técnica se aplica a todo tipo de contaminantes, especialmente a compuestos inorgánicos, y se suele combinar con otros tratamientos como la biodegradación y el “*Pump & Treat*” (Boulding, 1996), pero requiere una vigilancia estrecha para impedir que los contaminantes migren en otra dirección distinta a la deseada.

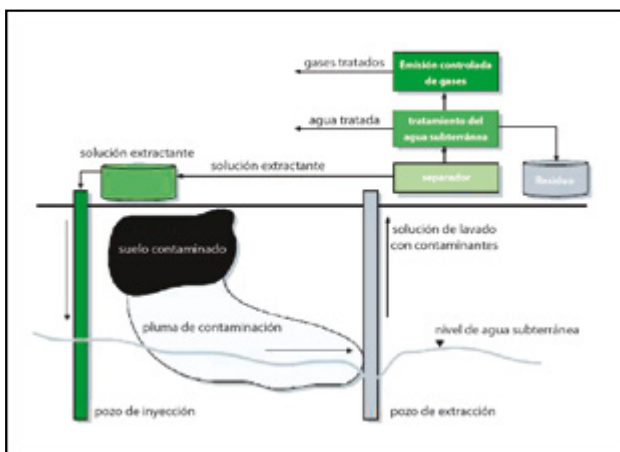


Figura 3. Esquema de tratamiento de lavado de suelos “*in situ*” (Mulligan et al, 2001).

2.6. Electrocinética

La electrocinética, o electromigración, se basa en la aplicación de una corriente continua de baja intensidad a través del suelo que favorece la movilización del agua y los compuestos iónicos para separar y extraer radionúclidos,

metales pesados y contaminantes orgánicos, contenidos en sedimentos, lodos y suelos no saturados de baja densidad. Para ello, se instalan electrodos a cada lado de la zona contaminada y se aplica una corriente a través de ellos. La extracción de los compuestos resultantes se suele hacer mediante galvanizado de los electrodos, por procesos de precipitación en la zona cercana a ellos o extrayendo el agua de alrededor de los mismos. En la figura 4 se aporta un esquema de la aplicación de esta técnica.

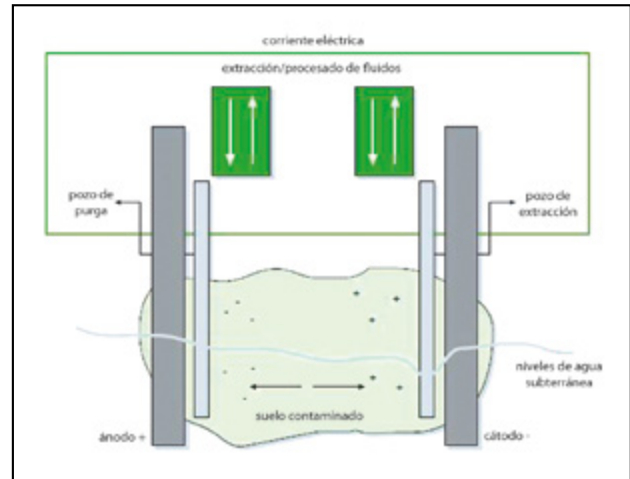


Figura 4. Esquema de tratamiento de electrocinética (Ortiz et al, 2007).

2.7. Adición de correctores

Los suelos contaminados por sales o metales pesados pueden recuperarse con la adición de correctores capaces de transformar este tipo de contaminantes. Para ello se emplean aguas de riego con cal, carbonatos, zeolitas o fosfatos entre otros, que varían el pH y temperatura del suelo, y reducen la disponibilidad o el riesgo de volatilización de los contaminantes citados. Una vez modificados los contaminantes pueden ser extraídos mediante otras técnicas físico-químicas o bien ser inmovilizados. Los mecanismos de inmovilización de metales en suelos con correctores no se conocen por completo. No obstante, aunque los experimentos en campo indican la eficacia de estos tratamientos “*in situ*”, existen dudas sobre si los mecanismos de recuperación son permanentes o reversibles en el tiempo (Hamon et al, 2002).

2.8. Barreras permeables reactivas

La barrera reactiva permeable consiste en la instalación de una pantalla perpendicular al flujo de la pluma de contaminación que permite el paso del agua e impide el movimiento de los contaminantes, quedando retenidos en el material de relleno de la barrera. Este relleno se compone de material reactivo capaz de eliminar las sustancias contaminantes mezclado con arena u otros materiales porosos para generar vías de agua preferenciales y favorecer su paso por la pantalla. La selección del medio reactivo se basa en el tipo y concentración de los contaminantes de las aguas subterráneas, las velocidades de las aguas, la calidad de las mismas y los mecanismos de reacción para eliminar los contaminantes (Radisav et al, 1996). En la figura 5 se observa un esquema de una barrera reactiva permeable.

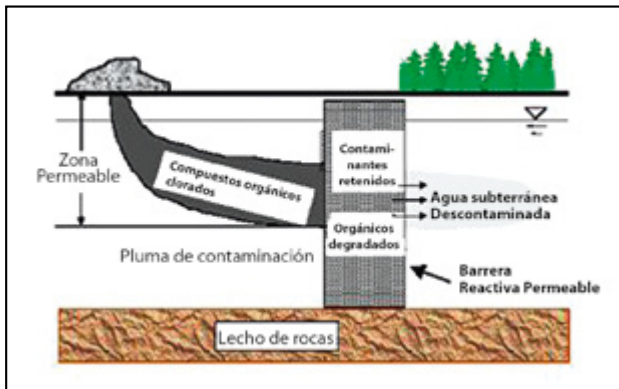


Figura 5. Descontaminación mediante una barrera permeable reactiva (Franz-Georg et al, 2000).

Dependiendo del tipo de relleno se pueden eliminar los contaminantes mediante distintos procesos, con lo que se definen tres tipos de pantallas: pantallas de adsorción, pantallas de precipitación y pantallas de degradación. Con ellas se puede tratar la contaminación por VOCs, SVOCs y compuestos inorgánicos y tienen la ventaja de que se pueden colocar en serie en caso de que existan varios contaminantes que necesiten diferentes agentes.

2.9. Inyección de aire comprimido

Se emplea en la zona saturada del suelo, aunque también pueden tratarse algunos contaminantes de la zona no saturada. Para ello se instalan pozos de inyección en la zona saturada y se evaporan o volatilizan los contaminantes, desplazándolos hacia la zona no saturada donde se extraen y se depuran en superficie. Con esta técnica se eliminan sustancias con una presión de vapor de 100 N/m^2 y una constante de Henry superior a 0,01 (VOCs y SVOCs), debiendo ser el suelo homogéneo y permeable para tal efecto.

Aparte de la tipología y distribución espacial de la contaminación, tanto en extensión como en profundidad, es necesario conocer los siguientes parámetros del suelo: estructura litológica, permeabilidad, espesor de la columna de agua y pH. En la figura 6 se puede observar un esquema del tratamiento por inyección de aire comprimido.

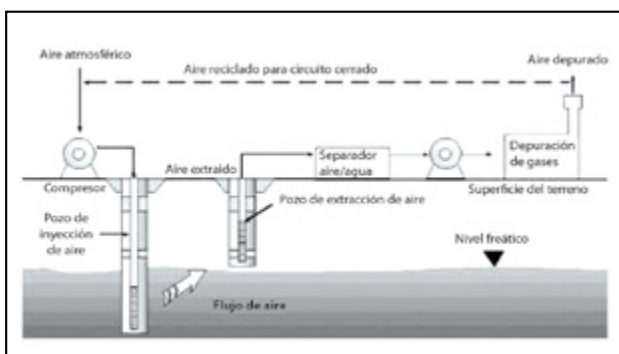


Figura 6. Tratamiento por inyección de aire comprimido (Kaifer et al, 2004).

2.10. Pozos de recirculación

Los pozos de recirculación constituyen una tecnología centrada en la recuperación de agua subterránea contaminada, principalmente con VOCs, basándose en los mismos

principios de acción que la inyección de aire comprimido. Estos pozos tienen un doble revestimiento y dos tramos de filtros dentro de la zona saturada: uno en el límite superior y otro en el límite inferior del nivel freático del acuífero. La técnica consiste en inyectar aire por el espacio interno del pozo que hace que el agua entre por el tramo inferior del filtro, ascienda y salga por su parte superior, creándose una célula de recirculación en la que se volatilizan los contaminantes.

En la figura 7 se muestra un esquema general de funcionamiento de un sistema compuesto por pozos de recirculación. En este caso el tipo de suelo no es una limitación pero afecta al rendimiento, siendo más efectiva en sustratos arenosos. También se debe tener en cuenta el espesor del acuífero.

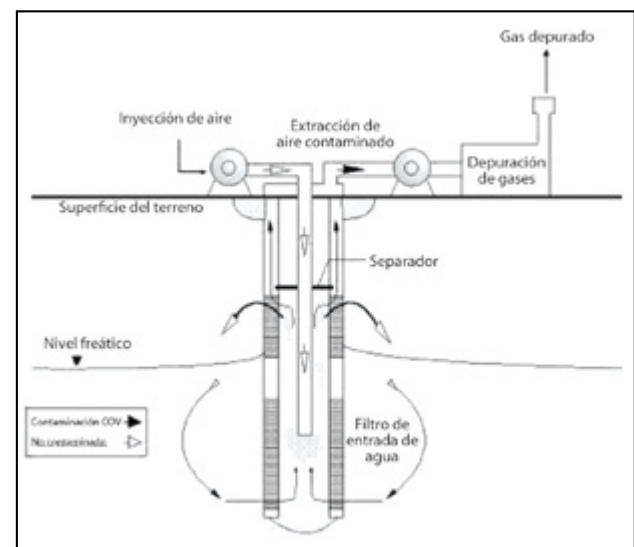


Figura 7. Pozos de recirculación (Kaifer et al, 2004).

2.11. Biodegradación asistida

La biodegradación es el proceso por el que ciertos microorganismos, ya sean autóctonos o inoculados, metabolizan los contaminantes y los transforman en productos inoos. Hay tres procesos por los cuales los microorganismos pueden biodegradar compuestos orgánicos: fermentación, respiración aerobia y respiración anaerobia.

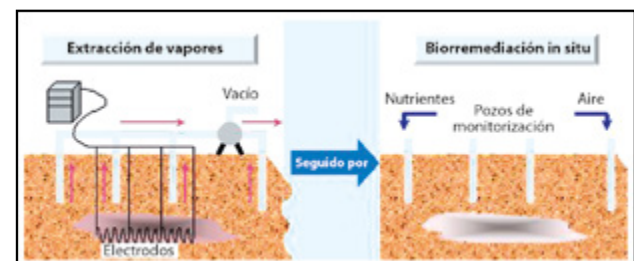


Figura 8. Esquema de aplicación de la biodegradación asistida

En la literatura se pueden encontrar numerosos estudios de biodegradación de compuestos orgánicos tóxicos, ya que en los últimos años se está estudiando el bioaumentación con organismos mutados con genes adicionales específicos para degradar contaminantes. Algunos autores han diseñado incluso estrategias de muerte celular, programando estos organismos a que se suiciden después de realizar la descontaminación (Ronchel et al, 1998), pero actualmente

existen problemas burocráticos para su aplicación. En la Figura 8 se muestra un esquema de aplicación de esta técnica tras llevar a cabo una extracción previa de vapores.

2.12. Biotransformación de metales

Los microorganismos no pueden degradar ni destruir compuestos metálicos, pero sí controlar su especiación, su transformación a formas menos tóxicas y su inmovilización. En la página web <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/Actualizaciones/metales/metales.htm> se desarrollan los cinco mecanismos por los que se produce la biotransformación: (procesos de lavado, quelación, transformaciones redox, mutilación, volatilización).

Las perspectivas futuras en la biotransformación de metales con aplicación en biorrecuperación incluyen el avance en ingeniería genética y la adaptación de las metodologías actuales a problemas de contaminación reales a gran escala (Valls et al, 2002). Al igual que en la biodegradación, en este caso también existen problemas burocráticos con los organismos modificados genéticamente.

2.13. Fitorrecuperación

La fitorrecuperación usa la capacidad de ciertas plantas para sobrevivir en ambientes contaminados y extraer, acumular, inmovilizar o transformar los contaminantes del suelo y aguas subterráneas. La aplicación de la fitorrecuperación comienza con la selección de las especies más adecuadas para el tipo de suelo y de contaminantes a tratar, así como la profundidad a la que se encuentren los contaminantes, lo que determina la longitud de raíces deseada.

Con esta técnica se pueden tratar grandes áreas con niveles bajos y moderados de contaminación superficial, y es válida aplicable a una amplia variedad de contaminantes de tipo metales pesados, disolventes o hidrocarburos pesados, entre otros. Dependiendo del tipo de emplazamiento, las especies vegetales introducidas pueden incorporarse a la cadena trófica del entorno, por lo que es necesario establecer la concentración de contaminante que puede quedar absorbido en el tejido vegetal y la proporción que puede pasar al resto de los componentes de la cadena trófica (EPA 542/F-06/013, 2006). Una vez que el ciclo vital de las plantas ha concluido o se han alcanzado los niveles de descontaminación esperados, las plantas se retiran y se gestionan como residuo.

2.14. Bioventing

La descontaminación de suelos por “bioventing” se centra en la zona no saturada del suelo que consiste en hacer circular aire y nutrientes a través del suelo para estimular la biodegradación de contaminantes volátiles (Mihopoulos et al, 2001). De esta manera se pueden tratar hidrocarburos derivados del petróleo de peso medio. La permeabilidad, el tamaño de partículas, la humedad y la temperatura condicionan el resultado del proceso. También se debe tener en cuenta que altas concentraciones de contaminante retardan la biodegradación. En la figura 9 se observa el esquema del proceso de tratamiento de un suelo con esta técnica.

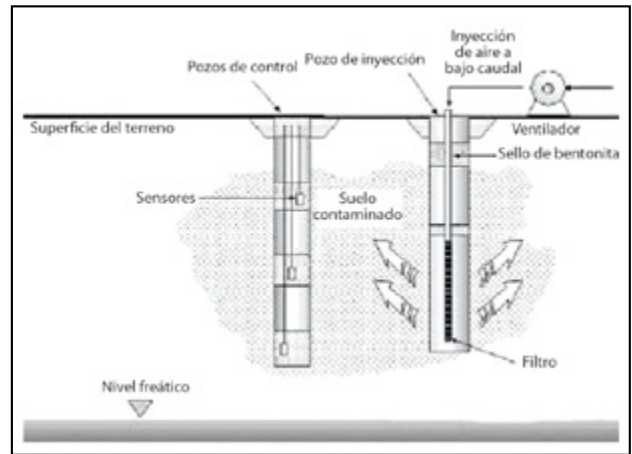


Figura 9. Esquema de aplicación de “bioventing” (Kaifer et al, 2004).

2.15. Biosparging

Esta técnica es similar a la técnica físico-química de inyección de aire comprimido, pero en este caso el caudal de inyección es más bajo para favorecer la biodegradación de VOCs y de contaminantes biodegradables existentes en la zona saturada del suelo. La velocidad del proceso depende del tipo de contaminante y de características del suelo tales como el pH o la temperatura.

2.16. Lavado biológico de suelos

En este lavado se inyecta agua con los componentes necesarios para la biodegradación de contaminantes disueltos. El terreno debe ser homogéneo y permeable para garantizar la adecuada circulación del agua infiltrada. Esta técnica es eficaz en el tratamiento de suelos con concentraciones no muy elevadas del orden de cientos de mg/kg, y se aplica en suelos contaminados con hidrocarburos ligeros y medios derivados del petróleo. En la figura 10 se muestra un esquema de un sistema típico.

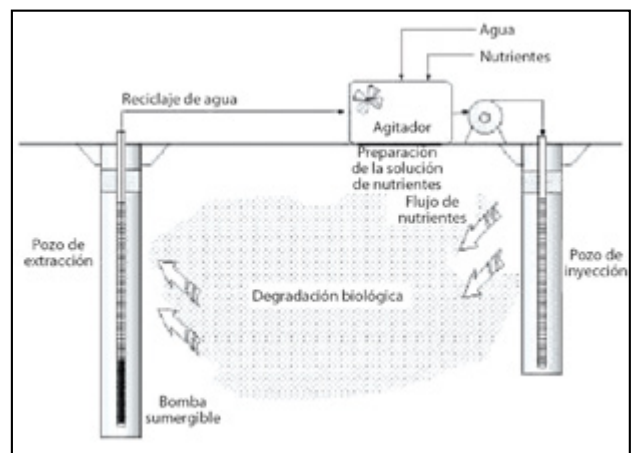


Figura 10. Esquema de tratamiento de lavado biológico de suelos (Kaifer et al, 2004)

2.17. Extracción multifase

La extracción multifase comprende una categoría general de tecnologías de recuperación “in situ” que extraen más de un tipo de fase de producto de forma simultánea, ya sea a través de zanjas o de pozos. Las fases incluidas son tres: la fase gaseosa (VOCs), la acuosa (contaminantes en

disolución) y la fase libre. Los factores que limitan la aplicación de estos métodos son la permeabilidad del emplazamiento, ya que para una aplicación óptima se recomienda que ésta se sitúe entre 10^{-3} - 10^{-5} cm/s; las características y distribución de los contaminantes, y la necesidad de tratamientos posteriores para el agua y el aire extraídos. Como ocurre en cualquier proceso de biodegradación, temperaturas ambientales bajas podrían disminuir la eficacia del tratamiento.

2.18. Atenuación natural monitorizada

Consiste en la disminución de las concentraciones de contaminantes en suelos y aguas subterráneas sin intervención antrópica significativa, dejando que se realice mediante procesos naturales de tipo físico-químico (evaporación, dilución, estabilización, porción), biológico (biodegradación), que suele ser el más importante, por lo que será más efectiva con compuestos biodegradables y en suelos permeables. En todo caso es importante realizar los modelos necesarios para caracterizar las tasas de degradación de los contaminantes y sus vías de migración en el emplazamiento, así como la concentración de contaminante en receptores potenciales próximos a la fuente.

La atenuación natural requiere plazos muy largos, pero los costes son inferiores, porque sólo requieren de modelos,

estudio de viabilidad y control y seguimiento continuo del emplazamiento. En la figura 11 se observan las fases de la atenuación natural para una pluma de hidrocarburos del petróleo.

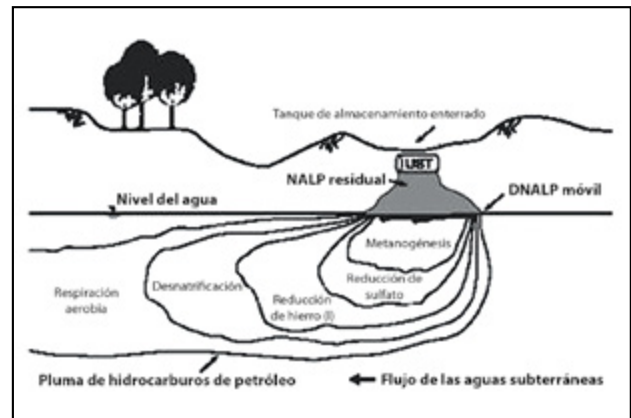


Figura 11. Sistema de atenuación natural de una pluma de hidrocarburos de petróleo.

3. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN "IN SITU"

En la tabla 2 se aportan los tipos más importantes de contaminantes que pueden ser tratados con las técnicas de

Tabla 2. Comparativa de las técnicas de descontaminación de suelos "in situ" respecto a contaminantes, tipo de terreno y limitaciones de cada una de ellas

Técnica	Contaminantes	Características del suelo	Limitaciones principales
Extracción de aire	VOCs, SVOCs e hidrocarburos ligeros	Drenado. Permeable. No permeable fracturado.	$P_{vapor} > 100 \text{ N/m}^2$. Cte. Henry > 0.01 . Mal rendimiento en suelos muy contaminados
Extracción de agua	Solubles en agua	Permeable (con pozos). No permeable (con drenes)	No permite extraer contaminantes en fase libre. Va mal en terrenos ferruginosos. Obstrucciones
Extracción de fase libre	Hidrocarburos derivados del petróleo	Permeable	Precaución con VOCs. Mal para fase libre viscosa. Bajos rendimientos
Extracción de fase no acuosa pesada	DNALPs	Permeable	Requiere conocer localización exacta. Sólo para zonas de hasta 8 m de profundidad
Flushing	Inorgánicos	Homogéneo y permeable. No permeable fracturado	Requiere inundar la zona contaminada. Problemas con tramos de baja permeabilidad
Electromigración	Solubles a pH ácido	Sedimentos y lodos (\downarrow densidad y $W^{**} = 15-18\%$)	Requiere ausencia de cuerpos extraños de alta conductividad eléctrica. pH de terreno > 3
Adición de correctores	Sales y metales pesados	Cualquiera	Adición de un agente corrector por cada contaminante. Influencia del pH del suelo
Barreras permeables reactivas	VOCs, SVOCs e inorgánicos disueltos	Permeable (mejor arenoso)	Requiere conocer dinámica hidráulica de zona. Flujo continuo de agua. Profundidad $< 15 \text{ m}$
Inyección de aire comprimido	VOCs, SVOCs e hidrocarburos ligeros	Homogéneo y permeable ($K^* > 10^{-5} \text{ m/s}$). No permeable fracturado	Zona saturada. $P_{vapor} > 100 \text{ N/m}^2$. Cte. Henry < 0.01 . Requiere primero eliminar la fase libre. No válido en acuíferos confinados
Pozos de recirculación	VOCs y SVOCs	Cualquiera, pero afecta al rendimiento	Sólo aplicable a zonas saturadas. Influye espesor del acuífero en la recirculación
Biodegradación asistida	Orgánicos	Cualquiera	Requiere existencia de donadores y aceptores de electrones. Capacidad de microorganismos
Biotransformación de metales	Metales pesados	Cualquiera	No degrada los metales, sólo los transforma. Influyen pH, T^a y concentración de metales
Fitorrecuperación	Metales, PAHs y PCBs	Cualquiera	Requiere contaminación baja y superficial
Bioventing	VOCs, SVOCs y algunos inorgánicos	Permeable y no saturado. No permeable fracturado	$P_{vapor} > 100 \text{ N/m}^2$, Cte. Henry > 0.01 . Mal rendimiento con elevadas concentraciones
Biosparging	VOCs y biodegradables	Permeable	Va mal en suelos ferruginosos. Obstrucciones
Lavado biológico de suelos	Hidrocarburos ligeros o medios y PAHs	Homogéneo y permeable ($K^* > 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)	Mal rendimiento con concentraciones elevadas y moléculas grandes. Obstrucciones

Continúa en la página siguiente

Técnica	Contaminantes	Características del suelo	Limitaciones principales
Extracción multifase	VOCs en fase vapor. Disueltos o en fase libre	Homogéneo y permeable ($K^* > 10^{-5}$ m/s). Viable en arcillas y limos	El terreno ha de ser homogéneo. Humedad y T^a del suelo importantes Requiere separadores de grasas y aceites
Atenuación natural monitorizada	Biodegradables (VOCs, SVOCs, hidrocarburos y pesticidas, entre otros).	Permeable ($K^* > 10^{-5}$ m/s)	Concentración total de hidrocarburos < 10 g/kg. No ha de haber contaminantes en fase libre. Suelo receptor potencial que permita migración

* K es la permeabilidad hidráulica, expresada en m/s

** W es la humedad del suelo, expresada en %

Tabla 3. Comparativa de los rendimientos y aspectos económicos y ambientales de las técnicas de descontaminación de suelos "in situ"

Técnica	Rendimiento	Costes	Duración	Aspectos ambientales
Extracción de aire	95% para $K^*=3 \times 10^{-5}$ m/s y 3 g/kg de contaminante	10-15 €/m ³	3-9 meses	Alto consumo energético. Tratamiento de gases
Extracción de agua	Muy variable	Pozos: 150-250 €/m y 40-125 €/semana mantenimiento Zanjas: 50-60 €/m, 75-125 €/m de tubería y 25-50 €/día de mantenimiento	Según K^*	Reinfiltración para evitar posibles asientos
Extracción de fase libre	Inferior al 50%	375-500 €/semana y 150-250 €/m ³ para tratar material extraído	Según K^* y concentración	La fase libre puede ser reutilizada
Extracción de fase no acuosa pesada	Total	60-75 €/m en pozos verticales 40-50 €/m en pozos horizontales 50-125 €/semana mantenimiento	Hasta 60 años	Alto consumo energético
Flushing	Según concentración y características de suelo	60-300 €/m ³	4-9 meses	La disolución recuperada y tratada puede ser tóxica
Electromigración	De hasta el 95% para metales pesados	75-325 €/m ³ , según tipo de contaminante su concentración	De semanas a meses	Los electrodos generan productos corrosivos
Adición de correctores	Según contaminante y agente corrector	0,25-25 €/m ²	Según agente y contaminante	Mayor estabilización en arcillas o como complejos
Barreras permeables reactivas	90%. Más bajo en zonas con gran flujo hidráulico	Muy variable. En torno al 50% del coste de una extracción de agua	6-12 meses	No requieren energía. Con varios contaminantes se ponen pantallas en serie
Inyección de aire comprimido	De hasta el 85%	5.000-10.000 € de instalación y 12-25 €/m ³ para tratar gases	2-4 años	Elevado gasto energético. Se generan ruido y olores
Pozos de recirculación	Entre el 70% y el 90%	50.000-175.000 € de instalación y 25.000-70.000 € de explotación	Según suelo y concentración	Alto consumo energético
Biodegradación asistida	Total	30-100 €/m ³	Prolongado	Problemas burocráticos con OMGs
Biotransformación de metales	Según concentración, T^a , pH y presencia de iones	Bajo. Depende de los metales presentes en el suelo	Prolongado	Problemas burocráticos con OMGs
Fitorrecuperación	De hasta el 100%	30-60 €/m ³	Prolongado	A veces, tasas altas de crecimiento de plantas
Bioventing	De hasta el 95%	30-60 €/m ³	6-12 meses	Alto consumo energético. Se generan ruido y olores
Biosparging	En torno al 75%	10-35 €/m ²	Unos 2 años	Alto consumo energético. Efluentes menos tóxicos
Lavado biológico de suelos	Total	40-225 €/m ³ . Entre otros factores, depende de contaminantes, aditivos y profundidad de pozos.	Varios meses	Alto consumo energético. Uso de nitratos. Se generan productos tóxicos
Extracción multifase	De hasta el 95% De la fase libre	100.000-500.000 € según equipos y duración del tratamiento	Varía según concentración	Alto consumo energético. Generación de residuos. Asientos (reinfiltración)
Atenuación natural monitorizada	Según contaminantes y tipo de suelo	Dado por el estudio de viabilidad, y por seguimiento del suelo	Varios años	Requiere monitorización constante del suelo

Nota: K es la permeabilidad hidráulica, expresada en m/s

descontaminación "in situ" de suelos tratadas en este trabajo, así como las características del terreno más adecuadas para su uso y las principales limitaciones a la hora de su aplicación. Las técnicas de carácter físico-químico están destacadas en color azul en esta tabla, mientras que las de

carácter biológico lo están en color verde y las mixtas en color marrón.

En la tabla 3 se muestra una comparación de los rendimientos obtenidos y los costes generalmente derivados de la aplicación de las técnicas citadas a suelos contaminados,

así como la duración estimada de estos tratamientos y los principales aspectos ambientales a tener en cuenta para cada uno de ellos.

4. CONCLUSIONES GENERALES

En el presente artículo se ha realizado un resumen de los procedimientos empleados para disminuir o eliminar en el propio emplazamiento original ó “*in situ*” la concentración de las sustancias tóxicas presentes en suelos contaminados, ya sea mediante procesos físico-químicos, biológicos o mixtos. A partir de la información bibliográfica recogida en este artículo, se pueden extraer de tales técnicas las siguientes conclusiones generales.

1. La descontaminación de un suelo es relevante para su uso posterior como material de cimentación, tanto en obras públicas como en edificación, debido a que los contaminantes pueden llegar a modificar características geomecánicas del suelo tales como su ángulo de rozamiento, cohesión, distribución de tamaños de partículas, estructura o su densidad.
2. Tal y como se puede comprobar en la tabla 2, cada técnica es viable para un determinado conjunto de sustancias contaminantes y de materiales.
3. A la hora de seleccionar la técnica más adecuada para cada caso también se deberán tener en cuenta otros aspectos relacionados con los contaminantes tales como la profundidad o el estado en que éstos se encuentren y la posibilidad de que dicho estado varíe en función de parámetros del suelo tales como el pH o la temperatura, entre otros.
4. El presupuesto de actuación se ha de estimar principalmente en función del coste del tratamiento seleccionado y del nivel de descontaminación o rendimiento que se pretenda alcanzar (costes resumidos en la tabla 3).
5. Las técnicas de extracción empleadas para tratar contaminantes orgánicos conllevan generalmente tiempos y costes de extracción relativamente bajos.
6. La técnica que emplea barreras permeables reactivas es, hoy en día, la más estudiada y prometedora de entre todos los métodos de descontaminación “*in situ*”, ya que es válida para cualquier contaminante que se encuentre en disolución, ya que no sólo detiene su migración como cualquier técnica de contención, sino que también lo elimina del suelo.
7. Las técnicas de pozos de recirculación y de inyección de aire comprimido son las más adecuadas cuando la contaminación se deba principalmente a la presencia de VOCs y SVOCs en la zona saturada del suelo.
8. Las técnicas de tipo biológico suelen presentar altos rendimientos de descontaminación, independientemente de la naturaleza del suelo tratado. Pero son tratamientos muy lentos y actúan a muy poca profundidad si no se perfora el terreno mediante pozos.
9. La atenuación natural monitorizada solamente es factible si existen condiciones limitadas de permeabilidad y concentración de sustancias tóxicas.

Por último, cabe destacar que actualmente se dispone de la tecnología avanzada y de los materiales necesarios

para realizar de forma adecuada el tratamiento de un suelo contaminado en su propio emplazamiento original. Eso sí, en todo caso se ha de tener en cuenta que el grado de descontaminación no depende sólo de la técnica empleada, sino de otros factores tales como las características del suelo, tipo de contaminante, tiempo de tratamiento o del presupuesto disponible para su remediación.

5. BIBLIOGRAFÍA

Boulding, J. R. (1996). *USEPA Environmental Engineering Sourcebook*. Ann Arbor Press. Chelsea, MI. 404 p. ISBN: 9781575040028.

EPA 542/F-06/013. (2006). *In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil*. Engineering Forum Issue Paper. USEPA.

EPA 600/R-99/107. (2000). *Introduction to Phytoremediation*. Office of Research and Development, USEPA.

Franz-Georg, S. & Tamás M. (2000). *Removal of organic and inorganic pollutants from groundwater using permeable reactive barriers. Part 1. Treatment processes for pollutants*. Land Contamination & Reclamation, 2000. Vol 8, N°2, 103-116.

Hamon, R. E., Mclaughlin, J. M. & Cozens, G. (2002). *Mechanisms of attenuation of metal availability in situ remediation treatments*. Environmental Science and Technology, 2000. Vol 36, 3991-3996.

Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, A., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M. & Pijls, C. (2004). *Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados*. Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Madrid. 175 p.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (BOE nº 181, 29-07-2011).

Mihopoulos, P. G., Cuidan, M. T. & Sayles, G. D. (2001). *Complete remediation of PCE contaminated unsaturated soil by sequential anaerobic-aerobic bioventing*. Water Science and Technology, 2001. Vol 43, N° 5 365-372.

Mulligan, C.N., Yong, R. N. & Gibbs, B. F. (2001). *Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review*. Engineering Geology, 2001. Vol 60, 371-380.

NAVFAC. (2002). *Surfactant-Enhanced Aquifer Re-mediation (SEAR) Design Manual*, NFESC Technical Report TR-2206-ENV. 110 p.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. & Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Colección coordinada por la Fundación para el conocimiento Madrid, Universidad de Alcalá, Dirección General de Universidades e Investigación. 108 p.

Radisav, D.V. & Frederick, G. P. (1996). *Treatment Walls*. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Centre (GWRAC), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, PA.

Ronchel, M. C., Molina, L., Witte, A., Lutbiz, W., Molina, S., Ramos, J. L. & Ramos, C. (1998). *Characterization of cell lysis in Pseudomonas putida induced upon expression of heterologous killing genes*. Applied and Environmental Microbiology, 1998. Vol 64, N° 12. 4904-4911.

Son, A. J., Shin, K. H., Lee, J. U. & Kim, K. W. (2003). *Chemical and ecotoxicity assessment of PAH contaminated soils remediated by enhanced soil flushing*. Environmental Engineering Science, 2003. Vol 20, N° 3. 197-206.

Valls, M. & De Lorenzo, V. (2002). *Exploiting the genetic and biochemical capacities of bacteria for the remediation of heavy metal pollution*. FEMS Microbiology Reviews, 2002. Vol 26. 327-338.



La imagen del hormigón armado

Autores: Varios

ISBN: 978-84-7790-510-3

Año: 2009

PVP: 35€

Esta publicación, planteada como una recreación estética de las posibilidades visuales que pueden tener las construcciones de hormigón armado, muestra imágenes de obras construidas en los primeros tiempos que permanecen en pie en la actualidad. Se trata de una publicación visual en la que el lector se puede deleitar con imágenes de alta calidad realizadas por reputados profesionales de la fotografía.



La ingeniería civil en la pintura. Catálogo de la exposición

ISBN: 84-7790-396-4

Año: 2004

PVP: 40€

Se trata de una publicación que recoge los contenidos de la exposición "La ingeniería civil en la pintura", inaugurada el 26 de febrero de 2004 en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. En ella se muestra como las creaciones de los ingenieros han servido, a menudo, de motivo de inspiración para los artistas. En este catálogo se reúnen obras significativas desde el punto de vista de las obras públicas (el puente de Westminster, el faro de Buda o la torre Eiffel, entre otras) que han sido reproducidas en la obra pictórica, conjugando así la doble perspectiva del arte y de la ingeniería a través de la historia.



El Túnel. Historia y mito

Autores: José Antonio Juncà Ubierna

ISBN: 84-380-0043-6

Año: 1991/2007

PVP: 39,07€

Esta es una aproximación a la construcción subterránea enfocada desde el punto de vista histórico. Comenzando en la Antigüedad, en esta publicación se realiza un análisis pormenorizado de los sistemas constructivos de las diferentes culturas y su evolución hasta nuestros días. El libro cuenta, además con un extenso apoyo gráfico tanto desde el punto de geográfico, es decir, la ubicación de las distintas obras en su entorno, como desde el punto de vista técnico a través de numerosos esquemas, en su mayor parte obra del propio autor, además de numerosas fotografías que ayudan a visualizar la descripción literaria.