
APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS

MAROTO ARROYO, M^a Esther y ROGEL QUESADA, Juan Manuel

GEOCISA. Div. Protección Ambiental de Suelos.

RESUMEN

Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

Las medidas biocorrectoras se llevan empleando en la descontaminación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos desde hace décadas con importante éxito. Estas técnicas biológicas pueden ser de tipo aerobio, si se producen en condiciones aerobias (presencia de un medio oxidante), o bien de tipo anaerobio, en condiciones anaerobias (medio reductor). El presente artículo se centrará en tres tipos de medidas biocorrectoras de tipo aerobio: la ventilación forzada del aire en el suelo o **bioventing**, el compostaje de suelos o **biopilas**, y la biorrecuperación natural del suelo o **atenuación natural**.

PALABRAS CLAVE: biodegradación, bioventing, biopilas, atenuación natural.

1. INTRODUCCIÓN

Estos sistemas de descontaminación se basan en la digestión de las sustancias orgánicas por los microorganismos, de la cual obtienen la fuente de carbono necesaria para el crecimiento de sus células y una fuente de energía para llevar a cabo todas las funciones metabólicas que necesitan sus células para su crecimiento. Para que estos procesos metabólicos se lleven a cabo, y puedan ser utilizados como una técnica remediativa, será necesario que existan en el medio unas condiciones físico-químicas óptimas.

Cada uno de estos sistemas, bioventing, biopilas y atenuación natural, precisarán de unos parámetros de evaluación adecuados a cada uno, que deben encontrarse dentro de un intervalo óptimo para que la aplicación de dicha técnica sea factible y efectiva. En general, se necesitará la existencia de determinadas poblaciones de microorganismos autóctonos capaces de utilizar los hidrocarburos como fuente nutricional y de energía. A su vez, será necesario un determinado número de aceptores de electrones que enzimáticamente oxide

los carbonos procedentes de los hidrocarburos, así como unas condiciones adecuadas de pH, nutrientes, temperatura, humedad, textura y estructura del suelo, y concentración de los contaminantes.

El diseño de estos sistemas de tratamiento se llevará a cabo estableciendo varias etapas de trabajo:

- Investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento
- Análisis y elección de las medidas biocorrectivas
- Evaluación de la efectividad del sistema elegido
- Diseño y evaluación del sistema
- Evaluación del control y seguimiento
- Análisis e interpretación de resultados

2. FUNDAMENTO BIOQUÍMICO DE LA BIODEGRADACIÓN

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa en que en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico (compuestos hidrocarburoados) que es externo a la célula y que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia.

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio (Fig. 1)

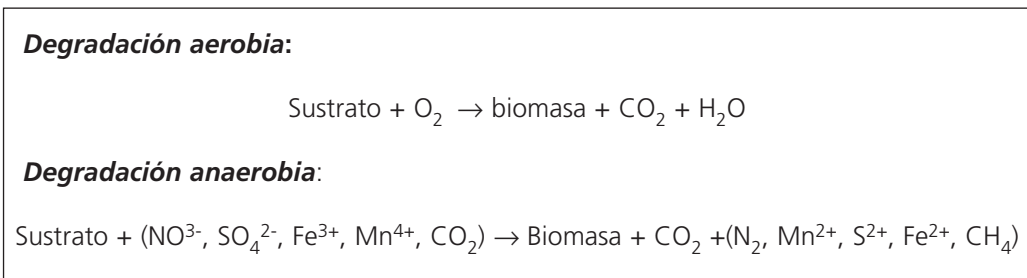


Figura 1. Esquema de las reacciones

La concentración y composición de la comunidad microbiana y la tasa de transformación de contaminantes está influenciada por diversos factores:

- Necesidad de nutrientes: El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno. Por lo general suele haber en el suelo una concentración de nutrientes suficiente, sin embargo, si estos no se encuentran en el rango normal se puede adicionar mayor cantidad al medio. El rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.
- pH del suelo: afecta significativamente en la actividad microbiana. El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.
- Temperatura: generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 15 y 45 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C.
- Humedad: los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo. El rango varía en función de la técnica.
- Estructura química del hidrocarburo: la inherente biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

3. FACTORES QUE DETERMINAN LA EFICACIA DE LA TÉCNICA

3.1. Bioventing o inyección de aire

La técnica del bioventing es un tratamiento de biorrecuperación de tipo “in situ”, consistente en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada del suelo a través de pozos de inyección.

Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes, y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se van a estimular la actividad bacteriana.

Los factores a tener en cuenta en la aplicación del bioventing o inyección de aire natural son:

- Se degradarán más fácilmente las moléculas más pequeñas (hasta C_{20}), siendo más fácilmente biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal que los compuestos aromáticos. En general, son favorables los compuestos de alta volatilidad (presión de vapor mayor de 10 mm de Hg a 20°C).
- Los suelos deben contener bajos contenidos en arcilla y ser lo más homogéneamente posible, con un valor de permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10} \text{ cm}^2$).
- El principal problema es la biodisponibilidad de los microorganismos. Cuanto menor es la solubilidad de los contaminantes menor será la biodisponibilidad.
- Los aportes de oxígeno deben ser suficientes, así como la existencia de fuentes de carbono, aceptores de electrones y energía suficientes.
- No debe existir de producto libre en flotación sobre el nivel freático.
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (12-30% en peso), potencial redox mayor de -50 mV, temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.
- Necesidad de tiempos de actuación cortos (meses) y coste medio-alto.

3.2. Biopilas

La técnica de biopilas es un tratamiento de biorrecuperación de tipo “ex situ” en condiciones no saturadas, consistente en la reducción de la concentración de contaminantes derivados del petróleo en suelos excavados mediante el uso de la biodegradación.

La técnica consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado y materia orgánica (compost) en condiciones favorables para el desarrollo de los procesos de biodegradación de los contaminantes. Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación.

En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero.

Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas destacan:

- Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm.
- Dada la necesidad de excavación y posterior depósito del suelo contaminado, se requiere una superficie de trabajo relativamente grande cuyas dimensiones dependen del volumen de suelo a tratar.
- Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas ($>1.000 \text{ CFU/gramo de suelo}$), condiciones de humedad (40-85% de capacidad de campo), temperatura (10 y 45°C),

textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 y 8) y baja presencia de metales pesados (< 2.500 ppm).

- La concentración de nutrientes en el suelo cuyo rango normal de C:N:P sea de 100:10:1.
- El tiempo de actuación puede ser alto (meses a años) y el coste bajo.

3.3. Atenuación natural

La atenuación natural, aunque no está considerada como una técnica de descontaminación propiamente dicha, está englobada dentro de las técnicas de remediación in situ de muy bajo coste. Su característica principal es la utilización de los procesos físico-químicos de interacción contaminante-suelo y los procesos de biodegradación que tienen lugar de forma natural en el medio. Estos procesos se conocen como procesos de biotransformación natural.

Los procesos de biotransformación natural son aquellos que van a reducir la concentración de los contaminantes y entre los que se encuentran la dilución, dispersión, volatilización, adsorción, biodegradación y aquellas reacciones químicas que se producen en el suelo o en el agua y que contribuyen de alguna forma a la disminución de la contaminación.

Esta técnica se aplica en aquellos casos en los que exista contaminación tanto en suelos como aguas subterráneas producida por hidrocarburos de tipo halogenado o no halogenado.

Entre los factores que influyen en la eficacia y viabilidad de la atenuación natural destacan:

- La exigencia de protección y el riesgo de los potenciales receptores durante el tiempo que dura la atenuación.
- La existencia de unas condiciones geológicas y geoquímicas favorables.
- Las necesidades de reducción de la masa contaminante en un intervalo razonable de tiempo (meses a años), tanto en la superficie del suelo como en la zona más subsuperficial del mismo, así como de la calidad de las aguas subterráneas.
- Confirmación de la existencia de los tipos y número de poblaciones de microorganismos que puedan biodegradar los contaminantes.
- Producción y conservación en el medio de subproductos de carácter persistente o más tóxicos que los iniciales, durante y después de la atenuación natural.
- No existencia de producto libre en flotación sobre el nivel freático
- Para condiciones aerobias la condición ambiental óptima de concentración de oxígeno disuelto en el agua debe ser superior a 0,5 mg/l.
- La concentración de los compuestos utilizados como aceptores de electrones en condiciones anaerobias debe ser superior a 0,21 mg/l para nitratos, la de Fe³⁺ para que pueda ser reducido a Fe²⁺ debe ser superior a 21,8 mg/l y la de sulfatos mayor de 0,21 mg/l.

- El potencial redox debe estar situado entre un rango de -400 y 800 mV.
- Existencia de un coeficiente de retardo favorable para que se produzcan los fenómenos de sorción con suficiente eficacia.
- Que se produzca una dilución suficiente para que la concentración se vea disminuida aguas abajo del foco contaminante.
- La dispersión de los contaminantes aguas abajo del foco y en la dirección de flujo debe ser adecuada para que exista una mayor disponibilidad proporción entre los contaminantes y los aceptores de electrones.

4. DISEÑO Y APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOTRATAMIENTO

El diseño de estos sistemas de tratamiento se llevará a cabo estableciendo varias etapas de trabajo (Fig. 2):

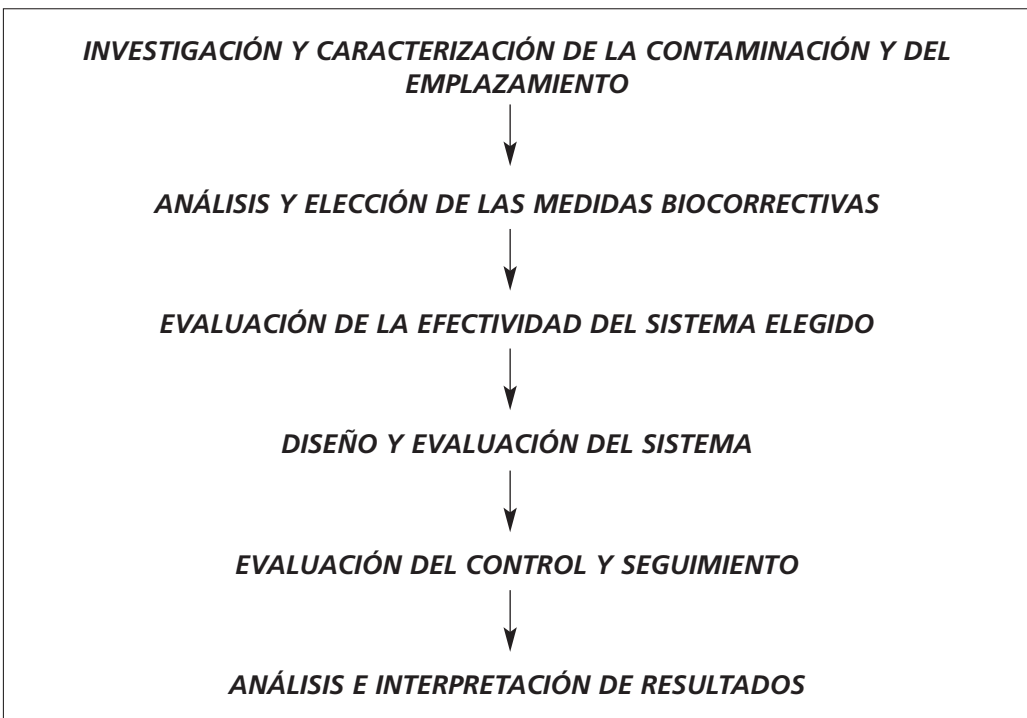


Figura 2. Esquema de diseño y aplicación de los sistemas de biotratamiento
IV.2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas

4.1. Fase de investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento

El primer paso para preparar el diseño de biotratamiento en el suelo es la realización de una completa investigación del medio, que incluye principalmente el estudio exhaustivo de la caracterización del emplazamiento y del tipo y concentración de la contaminación existente.

La caracterización del emplazamiento se llevará a cabo mediante el estudio del mismo detallando la volumetría del suelo a tratar, las condiciones geológicas e hidrogeológicas, analizando las características del suelo y sus propiedades (pH, granulometría, humedad, porosidad, etc).

La caracterización del contaminante se centrará en la investigación del tipo y concentración del mismo, así como la biodisponibilidad de los compuestos en el suelo (aceptores de electrones, metales pesados, nutrientes, etc).

4.2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas

De la fase de investigación inicial, una vez identificadas las características del emplazamiento, del suelo y del contaminante, se podrá pasar al análisis y elección de las medidas biocorrectivas más adecuadas. Para ello será necesario:

1. Identificar y cuantificar los contaminantes. Definiendo sus propiedades físico-químicas más importantes.
 - Identificación y clasificación de compuestos.
 - Concentración en suelos y aguas subterráneas.
 - Caracterización de la presión de vapor, constante de Henry, densidad y grado de solubilidad.
2. Conocer los factores que influyen en la transformación biológica de los contaminantes
 - Factores ambientales: tales como humedad, oxígeno disuelto, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes.
 - Factores microbiológicos: presencia de microorganismos y aclimatación de las poblaciones microbianas.
3. Designar las medidas biocorrectivas. En función de los factores anteriormente expuestos, se elegiría el sistema de biotratamiento más adecuado.

4.3. Diseño y evaluación del sistema

Para el diseño de un sistema de biorrecuperación es necesario establecer unas etapas de trabajo, en las cuales se determinan y evalúan los parámetros fundamentales necesarios para su eficacia.

Las etapas a seguir en el diseño de un sistema de biotratamiento son:

1. Evaluación de la viabilidad de la técnica. Se estudiarán los parámetros de evaluación que definen el sistema elegido, así como se evaluará las condiciones de biotratabilidad, los objetivos de limpieza exigidos y los costes de tratamiento necesarios.
2. Evaluación del diseño. Se estudiarán los factores que afectan la eficacia de la técnica y las posibles mejoras o acondicionamientos a aplicar.
3. Evaluación del control y seguimiento

IV.4. Control y seguimiento

Para asegurar la correcta ejecución y un progreso adecuado del tratamiento se debe llevar a cabo un plan de control y seguimiento del sistema.

Para una correcta optimización se deberán controlar los siguientes puntos:

1. Control de las condiciones de degradación y biodegradación. Se registrará la variación de concentración de TPH, BTEX, COV's, CO₂ desprendido y Oxígeno disuelto, variación de nutrientes (N, P, etc)
2. Control de los parámetros que afectan directamente en el funcionamiento del sistema

4.5. Análisis e interpretación de resultados

En esta última etapa se analizan los resultados obtenidos, haciendo un balance de los objetivos alcanzados y los marcados inicialmente. En este punto, si fuese necesario, se deberán proponer y estudiar aquellas mejoras o modificaciones necesarias para la optimización del sistema.

5. CONCLUSIONES

Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación son técnicas de descontaminación suficientemente estudiadas y evaluadas, basados en los procesos de biodegradación y fácilmente aplicables.

Es necesario una investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento de forma rigurosa para evaluar y elegir la medida biocorrectiva más adecuada y diseñar el sistema de manera óptima, así como es necesario llevar a cabo un control y seguimiento del mismo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- DANIEL, D. Geotechnical Practice for waste disposal. Ed. Chapman & Hall. (1993)
- EWEIS, J et al. Principios de biorrecuperación. Ed. Mac Graw Hill. (1999).
- ITGE. Contaminación y depuración de suelos. (1995)
- LAGREGA, M. et al. Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. Ed. Mc Graw Hill. (1996)
- LEVIN, L.; GEALT M. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Selección, estimación, modificación de microorganismos y aplicación. Ed. Mc Graw Hill. (1997).
- NATONAL RESEARCH COUNCIL. In situ Bioremediation. (1993)
- RISER-ROBERS, E. Remediation of petroleum Contaminated Soils. Biological Physical, and Chemical Processes. Ed. LLC. (1996).
- USEPA. Biorremediation of Hazardous wastes. EPA 540-R-95-532. (1995).
- USEPA. Soil Vapor extraction (SVE) enhancement technology resource guide: air sparging, bioventing, fracturing, thermal enhancements. EPA 542-B-95-003 (1995).
- USEPA. Bioremediation of hazardous waste sites: practical approaches to implementation. EPA 625-K-96-001. (1996).
- USEPA. Aerobic biodegradation of BTEX in Acuífers Material; Enviromental Research Brief. EPA 600-S-97-003 (1997).