

TECNOLOGÍAS DE DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS: UN ENFOQUE INTEGRAL PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Data de submissão: 26/09/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Eduardo Jahir Gutiérrez Alcántara

Facultad de Ciencias Químico Biológicas,
Universidad Autónoma de Campeche,
México

Ramses Antonio Novelo Puc

Facultad de Ciencias Químico Biológicas,
Universidad Autónoma de Campeche,
México

Betty Saravia Alcocer

Facultad de Medicina, Universidad
Autónoma de Campeche, México

Tomas Joel López Gutiérrez

Facultad de Ciencias Químico Biológicas,
Universidad Autónoma de Campeche,
México

Baldemar Ake Canché

Facultad de Ciencias Químico Biológicas,
Universidad Autónoma de Campeche,
México

Román Alberto Pérez Balán

Facultad de Ciencias Químico Biológicas,
Universidad Autónoma de Campeche,
México

RESUMEN: La creciente preocupación por la contaminación ambiental, especialmente

en áreas urbanas e industriales, subraya la importancia de las tecnologías de descontaminación de suelos. Con la industrialización y el desarrollo urbano en aumento, la contaminación del suelo representa un desafío significativo para la salud humana y la sostenibilidad ambiental. Estas tecnologías tienen como objetivo principal la eliminación o reducción de contaminantes presentes en el suelo, restaurando su salud y funcionalidad original (Posada, 2019). La clasificación de tecnologías de descontaminación de suelos es esencial para comprender y abordar eficazmente la contaminación ambiental. Al categorizar los contaminantes según su naturaleza y comportamiento en el suelo, se pueden seleccionar y aplicar las tecnologías de remediación más adecuadas para cada situación específica.

MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN

Las tecnologías de remediación de suelos abarcan una variedad de métodos, incluyendo procesos físicos, químicos y biológicos. Estos métodos no solo buscan mejorar la calidad del suelo, sino también

proteger la salud humana y la biodiversidad. Además, al restaurar áreas contaminadas, estas tecnologías permiten la reutilización de terrenos, promoviendo un desarrollo urbano más sostenible.

Actualmente, existe una amplia gama de tecnologías de remediación disponibles, desde aquellas de uso común hasta otras en fases experimentales. Estas tecnologías están diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes en el suelo. Sin embargo, la efectividad de estas tecnologías y el comportamiento de los contaminantes son influenciados por una serie de factores complejos. Estos factores incluyen las características específicas del contaminante y del sitio afectado.

Según Candia en su obra “Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados” (2019), las técnicas de remediación se pueden clasificar de acuerdo con su función u operación, proporcionando un marco conceptual para su aplicación eficaz en la descontaminación de suelos. Este enfoque sistemático permite la selección de la tecnología más apropiada basada en las condiciones específicas del sitio y las características del contaminante, asegurando así una remediación efectiva y sostenible.

FACTORES DETERMINANTES EN LA EFICACIA DE LA REMEDIACIÓN

La selección de la tecnología de remediación más adecuada requiere una consideración detallada tanto de las propiedades del contaminante como del entorno contaminado. Factores como la composición química del contaminante, la estructura del suelo y las condiciones ambientales locales son cruciales para determinar la estrategia de remediación más efectiva (Volke Sepúlveda, 2002).

LUGAR DE APLICACIÓN DE LA REMEDIACIÓN

- 1. In Situ:** Las tareas de remediación se realizan directamente en el sitio contaminado, sin necesidad de excavación ni traslado del suelo.
- 2. Ex Situ:** Este tipo de tecnologías requiere la excavación, dragado u otros procesos para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento, que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).

OBJETIVOS DE LA REMEDIACIÓN

En función de los objetivos de remediación, se pueden distinguir tres técnicas principales:

- 1. Técnicas de Contención:** Estas técnicas aíslan el contaminante en el medio sin actuar directamente sobre él, evitando su dispersión.
- 2. Técnicas de Confinamiento:** Actúan mediante la alteración de las condiciones fisicoquímicas del medio para reducir la movilidad del contaminante.

3. Técnicas de Descontaminación: Enfocadas en la disminución o eliminación de la concentración de contaminantes presentes en el medio (Kaifer et al., 2004).

SEGÚN EL TIPO DE TRATAMIENTO

- **Tratamientos Biológicos:**

Estas técnicas utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos, como plantas, hongos y bacterias, para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

Los ejemplos más importantes son los siguientes :

Biodegradación Asistida

La biodegradación asistida implica la circulación de soluciones acuosas, que contienen nutrientes y/u oxígeno, a través del suelo contaminado. Este proceso está diseñado para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y mejorar la biodegradación de contaminantes orgánicos, así como la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ (Van Deuren et al., 1997). Al proporcionar los elementos necesarios para la actividad microbiana, se potencia la capacidad natural del suelo para degradar y neutralizar contaminantes, lo que resulta en una remediación más eficiente y sostenible.

Bioventing

El Bioventing es una técnica que estimula la biodegradación natural de compuestos contaminantes bajo condiciones aeróbicas. Esto se logra mediante el suministro de aire enriquecido en oxígeno a través de pozos de inyección, proporcionando únicamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores. Este método es especialmente efectivo para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y otros compuestos orgánicos volátiles, ya que optimiza el entorno para la actividad microbiana sin necesidad de aditivos químicos externos.

Lodos Biológicos

Los lodos biológicos representan una técnica de degradación en fase acuosa, llevada a cabo mediante microorganismos en suspensión o inmovilizados en una fase sólida. El tratamiento puede realizarse en lagunas especialmente construidas para este fin o en reactores sofisticados con control automático de mezclado. Este enfoque permite un control preciso sobre las condiciones de tratamiento, como la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes, optimizando así la eficiencia del proceso de biodegradación. Los lodos biológicos son particularmente útiles para la remediación de aguas residuales y suelos altamente contaminados, proporcionando una solución robusta y adaptable para diversas condiciones ambientales.

- **Tratamientos Físicoquímicos**

Los tratamientos físicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los

contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Estas técnicas son esenciales para abordar una amplia gama de contaminantes y pueden aplicarse tanto in situ como ex situ, dependiendo de las características específicas del sitio contaminado y del contaminante.

Extracción de Aire

La extracción de aire es una técnica que implica la volatilización o evaporación de contaminantes adsorbidos en las partículas de suelos no saturados mediante pozos de extracción, que pueden ser verticales y/u horizontales. El aire contaminado se conduce a la superficie, donde los contaminantes pueden ser tratados mediante sistemas especializados o degradados naturalmente en la atmósfera. Este método es particularmente efectivo para la remediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, facilitando su eliminación de manera eficiente y segura (Posada, 2019).

Lavado de Suelos

El lavado de suelos es un tratamiento generalmente ex situ que consiste en la excavación y separación física del suelo contaminado. Inicialmente, el suelo es tamizado para eliminar las partículas de grava más gruesas, que tienen poca capacidad de adsorción, de la fracción fina. Luego, la fracción fina se lava con extractantes químicos que permiten desorber y solubilizar los contaminantes (Van Benschoten et al., 1997). Este proceso permite la recuperación de suelos contaminados y la concentración de los contaminantes en una fase líquida, que puede ser tratada posteriormente.

Tratamiento Electrocinético

El tratamiento electrocinético consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad entre electrodos introducidos in situ en el suelo contaminado. Esta técnica moviliza agua, iones y partículas pequeñas cargadas, provocando el movimiento de aniones hacia el electrodo positivo y cationes hacia el negativo. La oxidación del agua en el ánodo genera protones (H^+), que se mueven hacia el cátodo creando un frente ácido, favoreciendo la desorción de cationes del suelo y la disolución de contaminantes precipitados como carbonatos e hidróxidos. Simultáneamente, los iones OH^- generados en el cátodo por la reducción del agua provocan la precipitación de metales (Pazos et al., 2006). Este método es particularmente útil para la remediación de suelos contaminados con metales pesados y otros compuestos inorgánicos.

- **Tratamientos Térmicos**

Los tratamientos térmicos utilizan calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir (inmovilizar) los contaminantes presentes en el suelo. Estas técnicas son eficaces para la remediación de una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos, proporcionando una solución robusta para la descontaminación de suelos afectados por diversas actividades industriales y urbanas.

Incineración

La incineración es un proceso que implica la oxidación y volatilización de compuestos orgánicos contaminantes mediante su exposición a altas temperaturas de operación, que oscilan entre 870 °C y 1200 °C, en presencia de oxígeno (Carlos Dorronsoro Fernández, s.f.). Este proceso genera gases y cenizas residuales, que incluyen contaminantes orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfurados, compuestos oxigenados, compuestos aromáticos nitrogenados) e inorgánicos (metales pesados volátiles, CO₂, NO_x, SO_x). Los subproductos generados deben ser depurados para minimizar su impacto ambiental y asegurar una remediación efectiva y segura.

Inyección de Agua Caliente

La inyección de agua caliente es una técnica in situ que implica la movilización de contaminantes presentes en el suelo y en las aguas subterráneas mediante la inyección de agua caliente. Este método es especialmente efectivo para tratar contaminantes como compuestos orgánicos volátiles (COVs), semivolátiles (SCOVs), líquidos de fase no acuosa (LFNA), pesticidas y combustibles. Al aumentar la temperatura del suelo, se facilita la desorción y movilidad de los contaminantes, mejorando así su extracción y tratamiento posterior.

Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición química de compuestos orgánicos mediante el uso de calor en ausencia de oxígeno. Este tratamiento se realiza a alta presión y a temperaturas superiores a 430°C. Aunque los equipos de pirólisis pueden parecerse a los de incineración, operan a temperaturas más bajas y sin la presencia de aire. Esta técnica, generalmente aplicada ex situ, es eficaz para tratar contaminantes como compuestos orgánicos semivolátiles, pesticidas, bifenilos policlorados (PCB), dioxinas, residuos de alquitrán y pintura, así como suelos contaminados con creosota e hidrocarburos. La pirólisis permite la descomposición de contaminantes en productos menos nocivos, que pueden ser manejados y eliminados de manera segura (Pirólisis: método termoquímico para la transformación de residuos, 2024).

• Tratamientos Mixtos

Los tratamientos mixtos combinan diversas técnicas y procesos para abordar la contaminación del suelo de manera integral y efectiva. Estos métodos aprovechan tanto los procesos naturales como las intervenciones tecnológicas para reducir la concentración de contaminantes y restaurar la calidad del suelo y las aguas subterráneas.

Atenuación Natural

La atenuación natural, según la USEPA (1999), implica el uso de procesos naturales para contener la propagación de la contaminación y reducir la concentración de agentes tóxicos en áreas contaminadas. Este enfoque incluye una variedad de procesos biológicos, físicos y químicos:

1. Biológicos: La biodegradación aerobia y anaerobia, donde microorganismos naturales descomponen contaminantes orgánicos en condiciones con o sin oxígeno.

2. Físico-Químicos: Procesos como la volatilización (donde los contaminantes se evaporan), dispersión, dilución, desintegración radioactiva, estabilización química y bioquímica, precipitación y sorción en partículas de materia orgánica y arcillas del suelo.

Este método se está utilizando cada vez más debido a su bajo costo y efectividad en la recuperación de suelos y aguas contaminadas (Mulligan y Yong, 2004). La atenuación natural es particularmente adecuada para sitios donde las condiciones naturales favorecen estos procesos, proporcionando una solución sostenible y económica para la remediación ambiental (María Concepción Román Román, 2002).

Extracción Multifase

La extracción multifase es una técnica in situ que permite la remoción simultánea de contaminantes presentes en diferentes fases en el suelo. Este método implica la extracción de sustancias en fase vapor (compuestos orgánicos volátiles), fase líquida (contaminantes disueltos) y, especialmente, compuestos no acuosos en fase libre.

Dos ejemplos notables de aplicación de la extracción multifase son:

1. Bioslurping: Combina la extracción de fase líquida y vapor con la estimulación biológica de los microorganismos en el suelo, mejorando la biodegradación de los contaminantes.

2. Extracción Dual: Utiliza pozos o zanjas para extraer simultáneamente contaminantes en fase vapor y líquida, optimizando la remediación del suelo y las aguas subterráneas contaminadas.

La extracción multifase es eficaz para la remediación de sitios contaminados con una mezcla de compuestos volátiles y no volátiles, ofreciendo una solución adaptable y efectiva para diferentes tipos de contaminación.

La clasificación de tecnologías de descontaminación de suelos es esencial para comprender y abordar eficazmente la contaminación ambiental. Al categorizar los contaminantes según su naturaleza y comportamiento en el suelo, se pueden seleccionar y aplicar las tecnologías de remediación más adecuadas para cada situación específica.

Esta clasificación proporciona una base sólida para evaluar los costos y la disponibilidad de los materiales y equipos necesarios para el tratamiento. Las tecnologías de biorremediación, efectivas para compuestos orgánicos biodegradables, también pueden reducir la toxicidad de compuestos inorgánicos no biodegradables. Estas tecnologías son ambientalmente favorables y presentan costos relativamente bajos, aunque los tiempos de limpieza suelen ser prolongados.

REFERENCIAS

Carlos Dorronsoro Fernandez. (s.f). Edafología. (D. E. Granada, Editor) Obtenido de <http://edafologia.net/desconta/sve1.pdf>

Irene Ortiz, J. S. (s.f). Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados. Madrid, España.: Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Universidad de Alcalá, Universidad Rey Juan Carlos, CIEMAT.

Juan Ramon Candia, G. d. (2019). Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados. Chile : CORFO.

Kaifer, M.J, A. Aguilar, A., Arana, E., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M., y C. Pils,. 2004. Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. Madrid: Comunidad de Madrid, Consejería del Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

María Concepción Román Román Source: OAI, 2002. Guía técnica de Atenuación Natural Monitorizada en emplazamientos contaminados. Técnicas de bioestimulación y Bioaumentación para la potenciación de la biodegradación de contaminantes

Mulligan, C. N., and Yong, R. N. 2004. Natural attenuation of contaminated soils. Environment International, 30: 587-601.

Pazos, M., Sanromán, M. A., y Cameselle, C. 2006. Mejora en la remediación electrocinética de caolín contaminado con metales pesados mediante la técnica de intercambio de polaridad. Chemosphere, 62 (5): 817-822.

Pirólisis: método termoquímico para la transformación de residuos. (2024, 14 enero). AIMPLAS. <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

Posada. (2019b, mayo 16). Descontaminación de suelos. <https://www.posada.org/descontaminacion-de-suelos/>

Tania Volke Sepúlveda, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. (R. M. Lalli, Ed.) México, D.F: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

USEPA. 1999. Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action and underground storage tank sites. OSWER Directive Number 9200.4-17P. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC.

Van Deuren, J., Z. Wang, Z. y J. Ledbetter 1997. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.

Van Benschoten, J. E., Matsumoto, R. R., and Young, W. H. 1997. Evaluation and analysis of soil washing for seven lead-contaminated soils. Journal of Environment Engineering (ASCE), 123 (3): 217-224.