

Artículo de Revisión

Una propuesta de análisis sistémico para la selección de tecnologías para remediación de suelos a partir de un análisis multicriterio

A systemic analysis proposal for the selection of soil remediation technologies based on a multi-criteria analysis

Leidy Villarreal-Tapia

<https://orcid.org/0009-0008-3528-0002>

Semillero de investigación, Grupos COFA y SustalnnovaR
Ingeniería de petróleos, Universidad Surcolombiana,
Neiva-Colombia

E-mail: leidykaterinevillareal@gmail.com

Kevin Duvan Scarpetta Molano

<https://orcid.org/0009-0004-6558-1480>

Semillero de investigación, Grupos COFA y SustalnnovaR
Ingeniería de petróleos, Universidad Surcolombiana,
Neiva-Colombia

E-mail: kevin.escarpetta@gmail.com

Fecha de recepción: febrero de 2023

Fecha de aprobación: junio 2023

DOI: 10.25054/22161325.3964

Resumen

La remediación de sitios contaminados en la industria del petróleo y gas representa una tarea crítica para salvaguardar el medio ambiente y la salud pública. La selección precisa de tecnologías de remediación resulta fundamental para alcanzar resultados eficientes y sostenibles. En este artículo, se propone un enfoque de análisis sistémico para la selección de tecnologías de remediación de suelos, mediante la aplicación de un marco de análisis multicriterio basado en el Proceso Jerárquico Analítico (AHP). Este método considera diversos factores, como la naturaleza de los contaminantes, condiciones específicas de desplazamiento, el impacto ambiental, la viabilidad económica y la aceptación social. Al integrar estos criterios, los responsables pueden tomar decisiones fundamentadas y exhaustivas respecto a las técnicas de rehabilitación más apropiadas para sitios contaminados específicos.

Palabras clave: Técnicas de remediación; Contaminación de suelos; Proceso Analítico Jerárquico (AHP); Medio ambiente; Toma de decisiones.

Abstract

The remediation of contaminated sites in the oil and gas industry is a critical task for environmental protection and public health. The selection of appropriate remediation technologies is crucial to achieve effective and sustainable results. In this paper, we propose a systemic analysis approach for the selection of remediation technologies through a multi-criteria analysis (MCA) framework using the Analytic Hierarchy Process (AHP) developed by Saaty. The proposed method considers various factors, including the nature of contaminants, site-specific conditions,

Leidy Villarreal-Tapia, Kevin Duvan Scarpetta Molano

environmental impact, cost-effectiveness, and societal acceptance. By integrating these criteria, decision-makers can make informed and comprehensive decisions regarding the most suitable remediation techniques for specific contaminated sites.

Keywords: Remediation technologies; Soil contamination; Analytic Hierarchy Process (AHP); Environmental protection; Decision-making.

1. Introducción

La demanda global de energía, impulsada por factores socioeconómicos y escasez de reservas convencionales, está llevando a un aumento en el consumo de combustibles fósiles. Se estima un aumento del 15% en la demanda total de energía residencial y comercial para 2050, principalmente debido al crecimiento económico en naciones en desarrollo, lo que intensificará la dependencia de combustibles fósiles (ExxonMobil, 2022). Según la Administración de Información Energética (EIA), el consumo mundial de energía no renovable representa el 79% del total, siendo el 60.3% del consumo primario de energía (EIA, 2022).

Los datos anteriores resaltan la fuerte dependencia de los combustibles fósiles; sin embargo, la explotación de hidrocarburos representa riesgos ambientales debido a accidentes durante la producción de petróleo y transporte, lo que genera impactos locales y dispersos en el medio ambiente. Estos derrames afectan adversamente ecosistemas terrestres y marinos, teniendo consecuencias extendidas en tiempo y espacio. Lo que perjudica gravemente actividades como la pesca, el turismo y la agricultura (Dhaka & Chattopadhyay, 2021). Además, se destaca que el 30-50% de los derrames se atribuyen a errores humanos; mientras que, el 20-40% resulta de fallas en maquinaria o equipo (Michel & Fingas, 2016).

Durante las últimas tres décadas, se han registrado a nivel mundial vertimientos que han causado daños irreversibles en ecosistemas marinos y terrestres. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) informa que, en 2018 EE. UU. presentó 137 derrames, (11 derrames al mes). Sin embargo, el incidente más significativo ocurrió en 2010 en el Golfo de México, cuando el pozo offshore Macondo de British Petroleum Company vertió descontroladamente más de 50.000 barriles de crudo diarios durante tres meses, estableciendo el mayor récord de vertimiento en la historia. Esto afectó una extensa área de 149.000 km² en el golfo y más de 2.000 km de costa desde Texas hasta Florida (Bly, 2011; Colorado, 2020; P. Li *et al.*, 2016; Saadoun, 2015).

A pesar de ser un productor modesto de petróleo, Colombia enfrenta incidentes ambientales significativos, siendo notables los vertimientos involuntarios de la industria petrolera y los causados por actos terroristas (Velásquez Arias, 2017). En los últimos 40 años, la infraestructura petrolera ha sufrido múltiples ataques terroristas, resultando en derrames que superan los 3.7 millones de barriles de crudo (El Tiempo, 2018). En la actualidad se presenta una disminución en las tendencias de derrames según el reporte de Ecopetrol en 2018 como se evidencia en la Figura 1; lo cual, está relacionado con procesos de paz en Colombia; no obstante, las secuelas ambientales persisten (El Tiempo, 2018).

Considerando que en Colombia las cuencas de mayor producción petrolera, como los valles Superior y Medio del Magdalena, Catatumbo, Putumayo y Llanos Orientales, son también áreas de gran importancia en la producción agropecuaria, existe una conexión directa entre la industria petrolera y extractiva con los suelos agrícolas ricos en nutrientes de origen vegetal. Esta interacción ha llevado a una pérdida productiva en el desarrollo agrícola y ha generado riesgos para los ecosistemas, la biodiversidad y la salud pública, debido a la exposición a contaminantes, muchos de los cuales tienen una baja capacidad de biodegradación (UPME, 2018).

La exposición de riesgos medioambientales globales derivados de la explotación industrial, ha impulsado el desarrollo e implementación de técnicas de restauración ambiental, especialmente enfocadas en sectores clave como la industria del petróleo y gas (Li *et al.*, 2016). Abordar los impactos ambientales directos de la explotación y transporte de hidrocarburos requiere una gestión preventiva eficaz. Esto implica procesos que parten de la identificación de las propiedades del ecosistema afectado y del contaminante, tales como capacidad absorbente, selectividad, densidad, solubilidad, miscibilidad y reciclabilidad etc. Según la definición dada por Environmental Protection Agency (EPA), las técnicas de remediación deben restituir las características originales del ecosistema afectado e involucra operaciones unitarias diseñadas para modificar, aislar o destruir la estructura y composición química de sustancias peligrosas a través de procesos biológicos, químicos y/o físicos, con el objetivo de reducir la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 1994b).

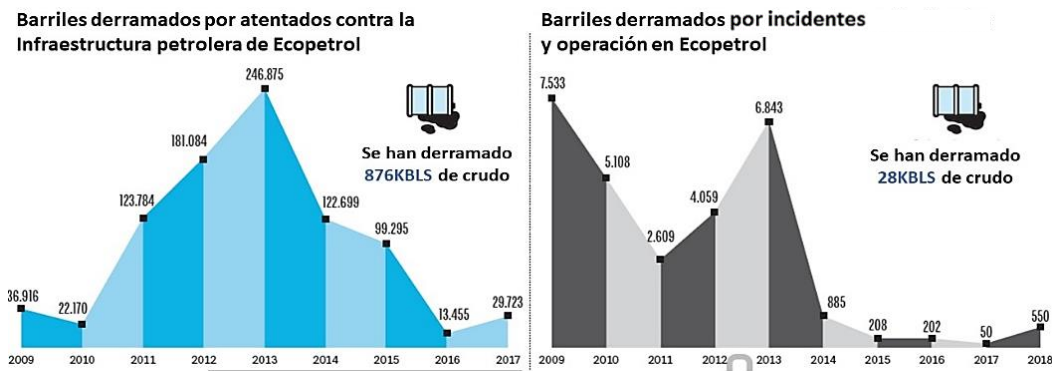


Figura 1. Derrames de petróleo en Colombia, reportado por Ecopetrol y Cenit, Vicepresidencia HSE y Ambiental, 2018.

Las técnicas de remediación ambiental, pese a su diversidad y extensa investigación (Benavides *et al.*, 2006; Juwarkar *et al.*, 2010; Befkadu & Chen, 2018); muestran que los métodos tradicionales (excavación, vertido e incineración) no son eficientes. La excavación y el relleno sanitario no eliminan los contaminantes, y la incineración resulta costosa y puede generar contaminación secundaria, como compuestos orgánicos volátiles (COV) (Michael-Igolima *et al.*, 2022). La extracción del aceite mediante sorbentes, actualmente la opción más sostenible, lo que ha ganado prominencia (Choi *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2012). No obstante, surgen opciones innovadoras y disruptivas, aún en fase de desarrollo, buscando minimizar riesgos de propagación de contaminantes y la necesidad de restricciones post-remediación al ecosistema (Hashim *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014), reforzando la importancia del monitoreo continuo.

Sin embargo, la toma de decisión respecto a la selección de la técnica más adecuada para la remediación debe estar soportada en un análisis que considere variedad de criterios, pero teniendo siempre presente que los costos de implementación deben ser proporcionales al resultado de la remediación. En este orden de ideas, en esta investigación se realizó una revisión con fines de caracterización de los métodos de remediación tecnológicamente maduros y comúnmente empleados; posteriormente, dada la gran variedad de opciones que se encontraron se ejecutó una metodología multicriterio de selección y jerarquización de las mejores alternativas de remediación en función del tipo de contaminante, el suelo y aspectos de índole social, económicos, ambientales y de desempeño del proceso, lo cual representa un ejemplo metodológico y sistémico novedoso que puede ser considerado para la gestión de los procesos de remediación ambiental.

2. Materiales y métodos

2.1 Metodologías de remediación

En la actualidad, se cuenta con una amplia gama de metodologías de remediación diseñadas para diversos ecosistemas, todas consideradas apropiadas desde distintas perspectivas. Su clasificación se realiza teniendo en cuenta la forma de aplicación, la función, el objetivo del proceso y el principio o mecanismo de operación del tratamiento (EPA, 1994b), se ilustra en la Figura 2.

Según la locación hay dos tipos de operación, *In Situ* que actúan directamente sobre la zona impactada y *Ex situ* que requiere la extracción y traslado del suelo a otro lugar, este último permite una recuperación integral de la zona impactada; sin embargo, aunque es más rápido, también es costoso. En ambas operaciones, el reto es garantizar un contacto íntimo entre los agentes de descontaminación y el suelo contaminado (Fundación Chile, 2015). Las técnicas de remediación, también se pueden clasificar de acuerdo con el principio fenomenológico que gobierna la transformación, a partir de los cuales es posible establecer las cuatro metodologías ilustradas en la Figura 2.

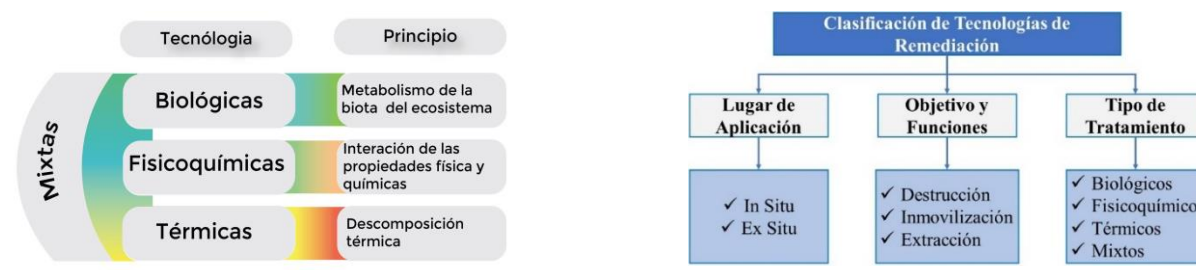


Figura 2. Clasificación de técnicas de remediación de suelos según su funcionamiento.

2.2 Tratamientos Térmicos

2.2.1 Incineración

Es el proceso que modifica las propiedades específicas del suelo, disminuyendo su volumen, peso y composición química. Realizado a temperaturas elevadas entre 870°C y 1200°C, para volatilizar y quemar (en presencia de oxígeno) componentes orgánicos de desechos peligrosos (Vidonish *et al.*, 2016). Los incineradores óptimos logran eficiencias de eliminación superiores al 99.99% para residuos peligrosos y para bifenilos policlorados (PCBs) y dioxinas (EPA, 1994b; Nhung *et al.*, 2022). En la Figura 3 se resume este proceso.

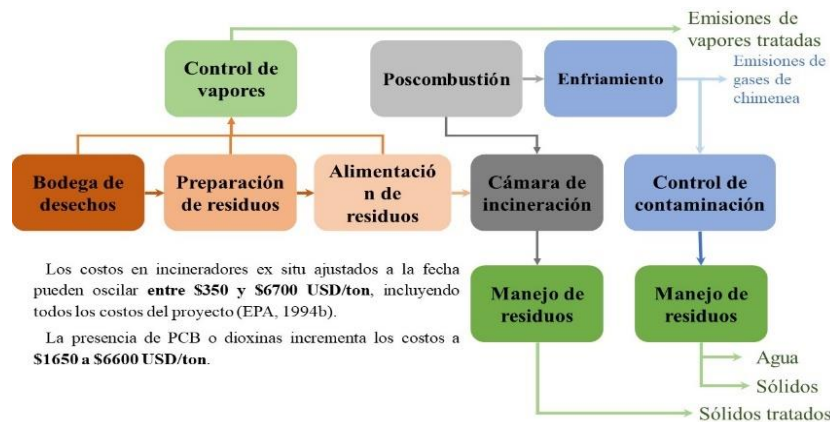


Figura 3. Control de proceso Incineración. Traducido y adaptado de EPA: Ex Situ Thermal Treatment, 1994

2.2.2 Desorción Térmica a Baja Temperatura

Se basa en incrementar la presión de vapor de los contaminantes a través del calentamiento del suelo, alcanzando el punto de ebullición de los componentes menos pesados, para que se desorban del suelo sin degradarlo como en la incineración. Esta técnica se aplica generalmente *ex situ*, con enfoque en contaminantes orgánicos muy volátiles (COV) no halogenados y combustibles ligeros. Se utiliza con eficacia reducida, para tratar compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC) (Thibodeau & Désilets, 2018). Los costos pueden variar de acuerdo con la concentración, tipo de contaminante y extensión del terreno contaminado, según la EPA los precios para grandes volúmenes (>764 m³) de suelos ajustados al 2023 oscila entre \$160-1000 USD/tonelada, excluyendo los costos de excavación y transporte; mientras que, de forma *ex situ* varía entre \$105 – \$230 USD/tonelada (EPA, 1994b).

2.2.3 Pirólisis

La pirólisis produce una descomposición química inducida en materiales orgánicos mediante el calentamiento a temperaturas de 400-600°C, en ausencia o baja proporción de oxígeno, generando fases gaseosas, líquidas y sólidas (Montoya *et al.*, 2013). Este proceso minimiza significativamente la cantidad de energía requerida, ahorrando costos (40–60%) en comparación con la incineración (Vidonish *et al.*, 2016). Estudios indican que la pirólisis, aplicada a suelos contaminados con diésel, puede reducir los hidrocarburos totales de petróleo de 6272 a 359 mg/kg en tan solo 10 minutos a 250 °C (Ren *et al.*, 2020).

Cada una de las tecnologías de remediación térmica contempla ventajas y limitaciones para su aplicación, estas características están relacionadas con variedad de parámetros y situaciones particulares en las que se encuentran los contaminantes en el suelo a remediar. Un breve resumen de las ventajas y limitaciones es presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y limitaciones de cada tecnología de remediación térmicas.

Técnica	Ventajas	Limitaciones
Incineración	Alta eficiencia y mayor velocidad y cantidad de procesamiento en contaminantes. Reducción volumétrica de hasta un 31% de residuos sólidos (Jaunich <i>et al.</i> , 2016).	Inertización total del suelo y generación de gases tóxicos, que deben ser tratados. Requiere tratamiento posterior para eliminar residuos.
Desorción Térmica	Mejora la salud del suelo (Yi <i>et al.</i> , 2016) Alta eficiencia (Vidonish <i>et al.</i> , 2016).	No es eficiente con metales pasados y no volátiles con bajas presiones de vapor Requiere una alta inversión (EPA, 1994b).
Pirólisis	Produce biocarbones que potencializan las propiedades del suelo (Vidonish <i>et al.</i> , 2016) Ahorro energético por bajas temperaturas y ciclo corto (D.-C. Li <i>et al.</i> , 2018).	Su aplicabilidad y costos están en función del tamaño de partícula del suelo. En suelos con un alto contenido de humedad se incrementan los costos del tratamiento (EPA, 1994b).

2.3 Tratamientos Físicoquímicos

2.3.1 Extracción De Vapor De Suelo

La extracción de vapor del suelo (SVE) busca la eliminación eficaz de sustancias químicas dañinas líquidas o acuosas dispersas en el suelo, contaminantes COV o SVOC a través de succión, siempre que estén por encima del nivel freático (Choi *et al.*, 2011; Govindan & Moon, 2015). La SVE generalmente se realiza *in situ*; sin embargo, se puede utilizar como tecnología *ex situ*. Como se observa en la Figura 4, esta tecnología implica la perforación de uno o más de pozos de inyección y de extracción en el suelo contaminado, a profundidades de 3 pies o más, se ha aplicado con éxito hasta 91 metros (300 pies) por debajo del nivel del suelo (EPA, 1994a, 2018, 2020).

El suelo es inyectado con aire caliente, vaporizando los contaminantes que son extraídos a través de pozos mediante succión con un ventilador o bomba de vacío (EPA, 2020). Posteriormente, los vapores se tratan con carbón activado, procesos térmicos o biodegradación en un biofiltro (Miller de Melo Henrique *et al.*, 2022). La SVE generalmente se aplica a suelos heterogéneos no saturados, con alta permeabilidad y acuíferos profundos, donde el nivel freático está muy por debajo de la contaminación (EPA, 2018).

La SVE ex situ a gran escala implica la excavación del suelo, colocado sobre una red de tuberías al vacío para volatilizar compuestos orgánicos. Con ventajas notables en comparación con aguas subterráneas poco profundas, permite una recolección uniforme de lixiviados y un monitoreo eficaz (EPA, 1994b). La tasa de remoción de benceno puede aumentar significativamente durante fluctuaciones del nivel del agua subterránea (Shi *et al.*, 2021).

El costo total de SVE ex situ aplicando los efectos de inflación y otros índices (Aspen Richardson Engineering Services, 1996), varían de \$85 - \$880 USD/tonelada, incluido el costo de excavación, pero excluyendo el tratamiento de los gases de escape y el agua subterránea recolectada (EPA, 1994b).

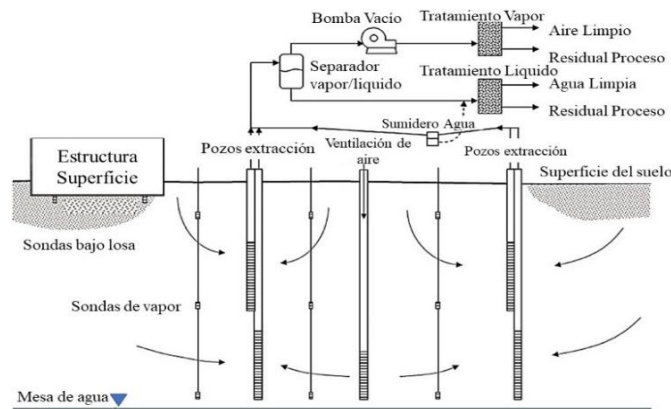


Figura 4. Esquema generalizado del proceso de SVE, adaptado y traducido de *Engineering Issue: Soil Vapor Extraction (SVE) Technology*, U.S. EPA, 2018.

2.3.2 Lavado De Suelos

La técnica de lavado de suelos, abordada de manera ex-situ, presenta un enfoque dual al combinar la separación física con el lavado a través de extractantes químicos. Inicialmente, el proceso de homogeneización contribuye a la concentración de contaminantes al separar partículas según su densidad, un aspecto crucial dado que muchos contaminantes tienen afinidad por la arcilla, el limo y partículas inorgánicas (Sharmel & Atencio, 2019).

El segundo proceso es el lavado que suele requerir el uso de diferentes soluciones. El suelo se trata por 10 minutos a temperaturas cercanas a los 70°C con extractantes químicos que permiten desorber y solubilizar los contaminantes y luego se realiza el lavado final para extraer hidrocarburos remanentes. Posteriormente, el material tratado se devuelve a su lugar de origen y el agua contaminada es tratada con la tecnología adecuada para los contaminantes. La eficiencia de esta técnica depende del grado de absorción de los contaminantes, y se reportan eficiencias promedio de remoción del 89% (Pando *et al.*, 2010).

Un punto relevante es la necesidad de añadir aditivos y reactivos al agua de lavado, dependiendo de la naturaleza de la contaminación a tratar. Investigaciones han explorado mejoras, particularmente utilizando surfactantes (Mousset *et al.*, 2016; Befkadu & Chen, 2018); aunque se destaca la importancia de más estudios para la recuperación eficiente de surfactantes, asegurando la viabilidad económica de esta técnica. Adicionalmente, se encuentra que los costos de la aplicación ajustados a la actualidad fluctúan entre \$207 – \$554 USD/m³ (Fundación Chile, 2015).

2.3.3 Enmiendas

Las enmiendas orgánicas e inorgánicas desempeñan un papel crucial en la mejora de suelos altamente degradados, modificando sus propiedades fisicoquímicas (Fundación Chile, 2015). Los desechos agroindustriales, a menudo subestimados, se revelan como valiosas enmiendas capaces de estimular el crecimiento microbiano y liberar nutrientes de manera sostenible (Ofoegbu *et al.*, 2015). Este enfoque se alinea como alternativas sustentables para disposición final de residuos.

Investigaciones destacan el uso eficaz de nutrientes inorgánicos en suelos contaminados, mejorando el ritmo de degradación de hidrocarburos totales (TPH), como la salud del suelo (Hoang *et al.*, 2021). Sin embargo, la aplicación de nutrientes inorgánicos presenta desafíos en costos y contaminación ambiental debido a la rápida liberación en el entorno, lo que representa una alta contaminación ambiental, limitando la movilidad de nutrientes y oxígeno, lo que puede afectar la fertilidad del suelo (Ekwuabu *et al.*, 2016).

Resultados de muestras analizadas de suelos enmendados durante 35 días, mostraron eficiencias del 64.62% de reducción de TPH (Ekwuabu *et al.*, 2016). En cuanto a costos del proceso de enmienda con biosólido se estima que actualmente se aproximan a \$927 USD/hect (Fundación Chile, 2015). Se contemplan ventajas y limitaciones para su aplicación; por lo tanto, se resumen estas características en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas y limitaciones de cada tecnología de remediación fisicoquímicas.

Técnica	Ventajas	Limitaciones
Lavado de suelos	Bajo costo	Limitado cuando la excavación es de grandes volúmenes de tierra
	Bajo nivel de tecnificación (Sharmel & Atencio, 2019)	No aconsejable cuando el suelo tiene alta concentración de materia orgánica, ya que se dificulta el proceso de restauración
	Corto a mediano plazo de aplicación, 2-6 meses.	Grandes cantidad de agua para tratamientos posteriores (Sharmel & Atencio, 2019).
SVE	Generalmente se realiza in situ.	Se aplica en suelos heterogéneos no saturados, y acuíferos profundos.
	Recupera contaminantes volátiles (EPA, 2018).	Los contaminantes no se destruyen por lo que se deben acoplar a otras tecnologías.
Enmiendas	Acelera la degradación HC mejorando las actividades microbianas (Sarkar <i>et al.</i> , 2005).	Costo bajo y fácil de implementar a grandes escalas.

2.4 Tratamientos biológicos

2.4.1 Biolabranza

La biolabranza, tanto "in situ" como "ex situ," implica la excavación y labrado continuo del suelo para degradar contaminantes (Vidali, 2001). Este método combina volatilización y biodegradación, estimulando microorganismos aerobios mediante la adición de nutrientes y la mezcla del sustrato para mejorar la aireación. La pérdida de hidrocarburos se intensifica con la aireación, siendo más eficaz en suelos con concentraciones elevadas de hidrocarburos livianos (Filler *et al.*, 2009). Aunque la biolabranza es más lenta que algunas técnicas costosas, esta demuestra una alta efectividad, alcanzando más del 95% de biodegradación y concentraciones residuales de contaminantes inferiores a 0.1 ppm (Gómez, 2021). En el proceso, se inicia con la delimitación y preparación del área, considerando diversos factores ambientales como temperatura, precipitación, viento, humedad relativa, entre otros (Gómez, 2021). Luego, el suelo se extiende en una capa de 30 a 45 cm sobre el terreno destinado, seguido se

hace la estimulación microbiana inherente al proceso de arado. Finalmente, se añaden nutrientes, agua y minerales, incrementando así el proceso de descomposición (Gómez, 2021). La biolabranza demanda un monitoreo constante para evaluar el comportamiento de los microorganismos y las condiciones a las que se exponen continuamente. El costo estimado actual para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre \$96-225 USD/m³ (Lukić *et al.*, 2017).

2.4.2 Biopilas

Las biopilas son una técnica ex-situ, que consisten en montones de suelo depositados en forma de montaña sobre una superficie preparada, con una pendiente entre 2% y 3% para evitar almacenamiento de lixiviados (Iturbe *et al.*, 2002). Su altura típica es de 2 a 4 metros, ajustada según los equipos (Ferrera *et al.*, 2016). Además del apilamiento, se busca estimular la biodegradabilidad mediante la actividad de las poblaciones microbianas (Germaine *et al.*, 2015), ofreciendo una estrategia efectiva para disminuir los efectos de contaminación con moléculas complejas por su alto potencial en degradación de hidrocarburos. Existen dos mecanismos según la EPA, la biopila estática utiliza aireación forzada y estructuras impermeables recubiertas, una inferior con tuberías de aireación, riego y adición de nutrientes, y una cubierta superior para evitar la emisión de compuestos volátiles y maximizar la degradación de hidrocarburos, recomendablemente en suelos arenosos o medios. La degradación de estos compuestos, principalmente livianos, se produce en mayor medida en los procesos de aireación y en menor proporción por la respiración microbiana. El otro mecanismo son las biopilas con movimiento o aireación mecánica, su funcionamiento es similar al expuesto anteriormente con la diferencia de que la cubierta superior al igual que el sistema de riego es retirado periódicamente, con el fin de remover el material con maquinaria agrícola, lo que favorece la aireación del suelo y la degradación de los contaminantes, este mecanismo es aconsejable para suelos arcillosos (EPA, 2017).

La efectividad de la técnica depende de las características del suelo, las bacterias, el contaminante y las condiciones climáticas. Concentraciones de los constituyentes del petróleo no se pueden reducir por debajo de 0.1 ppm sin utilizar otras tecnologías. Además, remediar suelos con TPH de más del 95% pueden ser muy difíciles lograr debido a productos del petróleo contienen hidrocarburos recalcitrantes (EPA, 2017). La descontaminación se lleva a cabo en un periodo de 3 a 6 meses, este tiempo depende de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y el tipo de suelo. Una estimación de los costos competitivos actuales de la metodología varía en un rango de US \$70-211/Tonelada (Fundación Chile, 2015).

2.4.3 Bioventeo

Es una de las técnicas in situ rentable para derrames de hidrocarburos ligeros, combina volatilización y biorremediación. Inyecta oxígeno en el suelo no saturado, mejorando la degradación microbiana (EPA, 2017). Requiere conocer la permeabilidad del suelo, el radio de influencia de los pozos y dimensiones de los equipos (Suarez, 2013). En el sistema de bioventilación se minimiza la volatilización a través de tasas de flujo de aire más bajas que la SVE y se promueve la biodegradación de los contaminantes, mientras que en la SVE se eliminan los contaminantes en su gran mayoría mediante volatilización. La efectividad de la tecnología depende de varios factores del suelo como la permeabilidad al aire, pH, humedad, temperatura, nutrientes, entre otros (Arroyo & Rogel, 2016). Además, se debe tener en cuenta que las moléculas más pequeñas se degradan más fácil, debido a su alta volatilidad, es necesario manejar bajos contenidos de arcilla teniendo en cuenta que estos ofrecen resistencia al flujo de aire y que los tiempos de tratamiento generalmente varían de 6 meses a 2 años en condiciones óptimas.

Al ser in situ se estima que los costos en la actualidad están en un rango de 105-328 \$USD/Tonelada, puesto que no se requiere de excavación, transporte del suelo, ni área adicional para el tratamiento, es fácil de combinar con otras tecnologías extractivas y para concentraciones del contaminante por encima de 0.1 ppm y reducciones de TPH

menores a 95% la tecnología es bastante eficaz. (EPA, 2017). Se presenta en la Tabla 3 las principales ventajas y limitaciones de los métodos.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de cada tecnología de remediación biológicas.

Técnica	Ventajas	Limitaciones
Biolabranza	Simple aplicación y costos relativamente bajos. Duración de proceso es corto, en un promedio de 6 a 24 meses (Gómez, 2021). Alta efectividad de degradación en hidrocarburos livianos.	Requiere de grandes áreas para la disposición de suelos y el proceso de aireado (arado). No aplicable en contaminantes diluidos, ni contaminantes no biodegradables. Uso de geomembranas de polietileno para la contención de los lixiviados (Gómez, 2021).
Biopilas	Emisiones controladas (EPA, 2017). Diseño y construcción sencilla; requiere poca área para disposición de suelos a tratar	PAH de 5 o más anillos y metales pesados limitan su rendimiento (Iturbe <i>et al.</i> , 2002). Componentes volátiles se evaporan en lugar de degradarse
Bioventeo	No requiere de excavación ni transporte, para tratamiento (EPA, 2017). Efectiva para compuestos a baja presión de vapor (Suarez, 2013).	Altas concentraciones de los contaminantes pueden ser tóxicas para los microorganismos. No aplicable para suelos de baja permeabilidad (EPA, 2017).

3. Procedimientos

3.1 Metodología de análisis multicriterio

La creciente atención e interés tecnológico en la mitigación de impactos ambientales de actividades humanas ha impulsado investigaciones sobre metodologías de remediación de suelos contaminados. La selección de la mejor alternativa requiere estudios detallados que consideren diversos criterios económicos, sociales, ambientales y técnicos. No obstante, la mejor decisión suele estar influida por la visión subjetiva de los ejecutores de la técnica, quienes valoran algunos criterios más que otros. Las alternativas presentan transversalidad en los criterios, como el tiempo de ejecución, costos y eficiencia de remediación. Diversos enfoques de evaluación, como ELECTRE, TOPSIS y PROMETHEE han sido utilizados (Heravi *et al.*, 2017; Nikouei *et al.*, 2017); pero para sistemas complejos, el método de jerarquía analítica (AHP) destaca por su objetividad. El AHP desglosa los elementos relevantes en capas de criterio, permitiendo juicios cuantitativos y cualitativos para la toma de decisiones y llegar a conclusiones y comparaciones de resultados (Chen *et al.*, 2022).

3.2 Proceso de jerarquía Analítica (AHP)

Desarrollado por Thomas L. Saaty (Saaty, 1986), se basa en comparaciones por pares para establecer una escala de prioridad. Este método implica realizar jerarquías y emisión de juicios sobre pares de elementos en relación con criterios específicos, generando escalas de preferencias (Shapiro & Koissi, 2017) cuantitativas que van de cero (0) a uno (1); donde un valor bajo destaca las desventajas de una alternativa frente a las otras en dicho criterio. Por el contrario, un valor más cercano a la unidad resalta la favorabilidad del criterio en cuanto a la priorización en comparación con las otras. El AHP es especialmente útil para abordar problemas que involucran aspectos intangibles, ya que incorpora una variedad de factores en el proceso de evaluación. Se destaca por su versatilidad y eficiencia al organizar la información de manera gráfica (Forman & Gass, 2001).

Las jerarquías del método AHP, son aquellas que conducen un sistema hacia un objetivo deseado. Luego, se establecen las prioridades mediante las matrices de comparación, en donde a cada elemento de la matriz se le ingresa el valor de la preferencia del elemento, por sobre el criterio. Así, las prioridades se transforman en un problema de vectores y valores propios. Con esto, el procedimiento para la toma de la mejor decisión, por el método AHP es: (i). Definir el problema e identificar el objetivo general de la decisión. (ii). Estructurar el problema de decisión en un modelo jerárquico, (iii). Seleccionar las alternativas y/o criterios, (iv). Ingresar los juicios, sintetizar los resultados y validar la decisión.

3.3 Implementación De La Técnica

La aplicación del método AHP se realizó paso a paso en base a la investigación realizada de cada tecnología de remediación considerada en la sección 2. Para el caso de estudio de la investigación, se tuvieron en cuenta cuatro criterios de decisión que pueden ser considerados de gran importancia en una situación específica, estos son: Costos (Capex y Opex), Tiempo (de aplicación de la tecnología), Rendimiento y requerimientos de Localización (instalación, infraestructura, tecnificación) in-situ y/o ex-situ; los cuales se presentan en la Tabla 4.

El AHP, exige como punto de partida una escala de relación de importancia relativa entre los criterios y alternativas, con el objetivo de tomar los criterios más importantes de cada tecnología de remediación y evaluarlos mediante la una definición establecida de: (i). igual, (ii). moderada, (iii). grande, (iv). muy grande o (v). extrema importancia de juicio objetivos entre criterios y tecnologías, para obtener una matriz de comparación. Posteriormente, a través de un proceso de normalización con minimización de errores, seguido por un promedio aritmético de las relaciones entre criterios, permite obtener los valores de ponderación para los distintos criterios.

La aplicación de la metodología AHP, permitió realizar un análisis comparativo para determinar las cuatro alternativas de selección de tecnología de remediación según los criterios seleccionados. El costo es relevante, de ahí que para la incineración el factor de priorización relativo a este criterio es muy bajo para el caso de estudio, tal y como se esquematiza la jerarquía en la Figura 5.

Tabla 4. Especificación de las técnicas de remediación de suelos y los principales criterios de decisión.

#	Tecnología	Costos, C (USD/ton)	Tiempo, t (meses)	Rendimiento, Y (% removido/tonelada)	Localización / instalación, T
1	Incineración	350 - 6,700	<1	99	Compleja
2	Pirólisis	300-350	1-12	99	Compleja
3	Desorción térmica (Ex situ)	110 - 230	>2	99	Intermedio
4	Desorción térmica (In situ)	160 - 1100	<2	94-99	Compleja
5	Lavado de suelos	150 – 400 /m ³	4 a 6	73-93	Fácil
6	Enmiendas	930 /hect.	>1	50-70	Fácil
7	Extracción de vapores (Ex situ)	90 - 880	6 a 12	95	Fácil
8	Extracción de vapores (In situ)	255	6 a 24	90	Intermedio
9	Biolabranza	100 - 225 /m ³	< 12	80	Fácil
10	Biopilas	105 - 330	3 - 6	<0.1 ppm >95 >0.1 ppm <95	Intermedio

Leidy Villarreal-Tapia, Kevin Duvan Scarpetta Molano

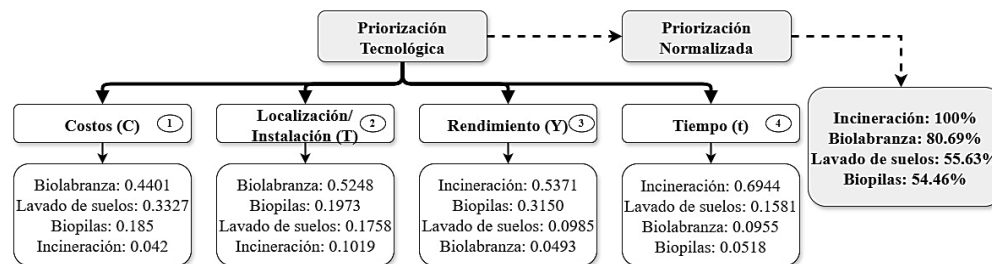


Figura 5. Árbol Jerárquico del proceso de priorización de la tecnología.

4. Discusión de los resultados del método Multicriterio

La revisión bibliográfica detallada de las tecnologías de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos revela que la elección de la tecnología adecuada depende del objetivo específico y la cuidadosa selección de los criterios. Para este propósito, en la investigación se llevó a cabo un análisis sistémico para la selección de tecnologías, a través del método AHP, considerando factores clave como costos, tiempo, rendimiento y tecnificación. Los costos (Capex y Opex) se identificaron como los más significativos, mientras que los requisitos de localización y tecnificación se consideraron menos importantes. Al evaluar las opciones tecnológicas utilizando AHP, se determinó que, entre cuatro alternativas presentadas, la incineración y la biolabranza son las metodologías más destacadas. La incineración lidera con más del 34% de importancia, gracias a su seguridad, eficiencia y rapidez en la toma de decisión, aunque presenta desafíos en costos y disposición del suelo post-remediación. Por otro lado, los métodos biológicos, como la biolabranza, destacan por su cumplimiento de requisitos a bajo costo, a pesar de requerir tiempos más prolongados para lograr una eficiencia óptima.

Aunque la incineración se percibe como la opción más costosa, no obstante, considerando tanto los costos de inversión (Capex) como los operativos (Opex), muestra que su madurez tecnológica, procesos estandarizados y altos rendimientos compensan en cierta medida los costos elevados. Además, la disponibilidad de una amplia gama de equipos comerciales adaptables a diversas condiciones refuerza su viabilidad. En contraste, la biolabranza se destaca como una opción significativa debido a su bajo costo, buen rendimiento de remediación y requisitos mínimos de tecnificación. Representa un 20% menor de tendencia a ser seleccionada en comparación con la incineración, lo que subraya su relevancia como alternativa. Las tecnologías de biopilas y lavado del suelo también son consideradas aceptables, aunque en menor medida, como opciones priorizadas en el caso de estudio.

Finalmente, es esencial destacar que la jerarquización obtenida no implica que una tecnología sea superior a otra. La relevancia de cada opción está fuertemente vinculada a las condiciones específicas del suelo, la naturaleza del contaminante y la agresividad de la tecnología utilizada. Además, la posibilidad de implementar acoples sinérgicos entre diversas tecnologías de remediación, como se ha evidenciado en la combinación de enfoques biológicos y fisicoquímicos (Rodríguez, 2013), sugiere la necesidad de profundizar en los factores que favorecen un rendimiento óptimo en todos los criterios involucrados en las tecnologías de remediación.

5. Conclusiones

Existe una gran variedad de técnicas de remediación de suelos que se han empleado en la descontaminación de ecosistemas impregnados por derrames de hidrocarburos. Sin embargo, la eficiencia y rendimiento de remoción del contaminante depende en gran medida de las condiciones y propiedades del suelo contaminado, del contaminante y de la técnica usada para su remediación. Por lo anterior, la selección de una técnica requiere de un análisis multicriterio que incluso puede ir más allá de lo técnico y económico.

Si el propósito es usar técnicas de remediación de suelos que sean más amigables con el medio ambiente como las biológicas, se debería incrementar la investigación hacia el uso de tecnologías que disminuyan el tiempo de remediación, ya que esta es una de las principales desventajas frente a otras técnicas de remediación.

Basado en los resultados de la caracterización realizada a cada tecnología de remediación, con sus ventajas y limitaciones, la selección de una cualquiera de estas, debe ser en función de tantos criterios de decisión como sean posibles pero considerando que la relación entre criterios y alternativas debe conducir a una matriz comparativa cuadrada y que lo que se obtiene a partir de la implementación de un método de análisis multicriterio como el AHP implementado, es una jerarquización que debe ser valorada con fines de potencialización de las tecnologías a través de acoples sinérgicos efectivos.

El análisis para la toma de decisión de los cuatro principales métodos, se realizó de forma general tomando los criterios de comparación de mayor importancia por empresas y organizaciones que se encargan de evaluar y remediar estos daños; por lo tanto, es un método adecuado, que puede mejorar en confiabilidad, sí se utiliza mayor número y grado de criterios y alternativas para escoger entre la mejor.

6. Referencias bibliográficas

- Arroyo, M. E., & Rogel, J. M. Q. (2016). *Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos*. 9.
- Befkadu, A. A., & Chen, Q. (2018). Surfactant-Enhanced Soil Washing for Removal of Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soils: A Review. *Pedosphere*, 419. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60027-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60027-X)
- Benavides, J., Quintero, MSc, G., Guevara Vizcaíno, A. L., Jaimes Cáceres, D. C., Gutiérrez Riaño, S. M., & Miranda García, J. (2006). Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, 4(5), 82. <https://doi.org/10.22490/24629448.351>
- Bly, M. (2011). *Deepwater Horizon Accident Investigation Report*. DIANE Publishing.
- Chen, X., Li, M., Liang, Z., Chen, C., Chao, Y., Qiu, R., & Wang, S. (2022). An AHP-based evaluation system applied for phytoremediation method selection in heavy metal contaminated farmland. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100138>
- Choi, S.-J., Kwon, T.-H., Im, H., Moon, D.-I., Baek, D. J., Seol, M.-L., Duarte, J. P., & Choi, Y.-K. (2011). A Polydimethylsiloxane (PDMS) Sponge for the Selective Absorption of Oil from Water. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3(12), 4552-4556. <https://doi.org/10.1021/am201352w>
- Colorado, M. (2020). *10 años después del peor derrame de petróleo, el riesgo de otro accidente es aún mayor* [Medio Ambiente]. France 24. <https://www.france24.com/es/medio-ambiente/20200424-medio-ambiente-derrame-petroleo-bp>
- Dhaka, A., & Chattopadhyay, P. (2021). A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills. *Journal of Environmental Management*, 288, 112428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112428>
- EIA. (2022). *Energy Data and Statistics—US Energy Information Administration (EIA)*. U.S. Energy Facts Explained. <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/data-and-statistics.php>
- Ecopetrol. (2018). Comportamiento histórico de incidentes derrames. Vicepresidencia SosTECnibilidad Ecopetrol.
- Ekwuabu, C. B., Chikere, C. B., & Akaranta, O. . (2016). Effect of Different Nutrient Amendments on Eco-Restoration of a Crude Oil Polluted Soil. *All Days*, SPE-183608-MS. <https://doi.org/10.2118/183608-MS>
- El Tiempo. (2018). *En Colombia se han derramado 3,7 millones de barriles de crudo* [Periodico Nacional]. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664>
- EPA. (1994a). *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites A Guide For Corrective Action Plan Reviewers*. www.epa.gov/ust

- EPA. (1994b). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Second Edition*. U.S. Army Environmental. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA439505.pdf>
- EPA. (2017). *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-03/documents/tum_ch4.pdf
- EPA. (2018). Engineering Issue: Soil Vapor Extraction (SVE) Technology. *Office of Research and Development*, 76. <https://doi.org/EPA/600/R-18/053>
- EPA. (2020). *Superfund Remedy Report (EPA-542-R-20-001 16th; Remedy Report, p. 85)*. Office of Land and Emergency Management. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/100002509.pdf>
- ExxonMobil. (2022). *Energy demand: Three drivers [Report]*. ExxonMobil. <https://corporate.exxonmobil.com:443/what-we-do/energy-supply/outlook-for-energy/energy-demand>
- Ferrera, R. C., Delgadillo, J. M., & Hernández, H. A. (2016). *Compostaje en biopilas para la limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo*. 9(8), pp: 24-30.
- Filler, D. M., Snape, I., & Barnes, D. L. (2009). *Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Cold Regions*. 20. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535956>
- Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The Analytic Hierarchy Process—An Exposition. *Operations Research*, 49(4), 469-486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
- Fundación Chile. (2015). *Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados*.
- Germaine, K. J., Byrne, J., Liu, X., Keohane, J., Culhane, J., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Ryan, D., & Dowling, D. N. (2015). Ecopiling: A combined phytoremediation and passive biopiling system for remediating hydrocarbon impacted soils at field scale. *Frontiers in Plant Science*, 5, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00756>
- Gómez, J. S. S. (2021). *Biorremediación por landfarming de suelos contaminados por hidrocarburos*. [UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/42658/jssierrago.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Govindan, M., & Moon, I.-S. (2015). Uncovering results in electro-scrubbing process toward green methodology during environmental air pollutants removal. *Process Safety and Environmental Protection*, 93, 227-232. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.008>
- Hashim, D. P., Narayanan, N. T., & Romo-Herrera, J. M. (2012). Covalently bonded three-dimensional carbon nanotube solids via boron induced nanojunctions. *Scientific Reports*, 363. <https://doi.org/10.1038/srep00363>
- Heravi, G., Fathi, M., & Faeghi, S. (2017). Multi-criteria group decision-making method for optimal selection of sustainable industrial building options focused on petrochemical projects. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2999-3013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.168>
- Hoang, S. A., Sarkar, B., Seshadri, B., Lamb, D., & Vinu, A. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125702. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>
- Iturbe, R., Flores, C., Chávez, C., & Roldán, A. (2002). Saneamiento de suelos contaminados con amiento de suelos contaminados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3(1), 25-35. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2002.03n1.004>
- Jaunich, M. K., Levis, J. W., Gaston, E. V., & Hauser, L. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.012>
- Jiang, G., Hu, R., Xi, X., Wang, X., & Wang, R. (2013). Facile preparation of superhydrophobic and superoleophilic sponge for fast removal of oils from water surface. *Journal of Materials Research*, 28(4), 651-656. <https://doi.org/10.1557/jmr.2012.410>
- Juwarkar, A. A., Singh, S. K., & Mudhoo, A. (2010). A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9(3), 215-288. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9215-6>

- Li, D.-C., Xu, W.-F., Mu, Y., Yu, H.-Q., Jiang, H., & Crittenden, J. C. (2018). Remediation of Petroleum-Contaminated Soil and Simultaneous Recovery of Oil by Fast Pyrolysis. *Environmental Science & Technology*, 52(9), 5330-5338. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03899>
- Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., & Zhang, B. (2016). Offshore oil spill response practices and emerging challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 6-27. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.020>
- Lukić, B., Panico, A., Huguenot, D., Fabbricino, M., van Hullebusch, E. D., & Esposito, G. (2017). A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 94-116. <https://doi.org/10.1080/21622515.2017.1310310>
- Michael-Igolima, U., Abbey, S. J., & Ifelebuegu, A. O. (2022). A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*, 9, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319>
- Michel, J., & Fingas, M. (2016). Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures. En G. M. Crawley, *World Scientific Series in Current Energy Issues* (Vol. 1, pp. 159-201). WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789814699983_0007
- Miller de Melo Henrique, J., Isidro, J., Sáez, C., López-Vizcaíno, R., Yustres, A., Navarro, V., Dos Santos, E. V., & Rodrigo, M. A. (2022). Enhancing soil vapor extraction with EKSF for the removal of HCHs. *Chemosphere*, 296, 134052. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134052>
- Montoya, J. I., Farid, C., Monroy, E., Reyes, J., Gutiérrez, C. A. G., Chaparro, J., Valdés, C., Garzón, L., Velasco, J., Tirado, D., Blanco, A., Moreno, N., & Marrugo, G. (2014). *Pirólisis rápida de biomasa*. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín.
- Mousset, E., Huguenot, D., van Hullebusch, E. D., Oturan, N., Guibaud, G., Esposito, G., & Oturan, M. A. (2016). Impact of electrochemical treatment of soil washing solution on PAH degradation efficiency and soil respirometry. *Environmental Pollution*, 211, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.021>
- Nhung, N. T. H., Nguyen, X.-T. T., Long, V. D., Wei, Y., & Fujita, T. (2022). A Review of Soil Contaminated with Dioxins and Biodegradation Technologies: Current Status and Future Prospects. *Toxics*, 10(6), 278. <https://doi.org/10.3390/toxics10060278>
- Nikouei, M. A., Oroujzadeh, M., & Mehdipour-Ataei, S. (2017). The PROMETHEE multiple criteria decision making analysis for selecting the best membrane prepared from sulfonated poly(ether ketone)s and poly(ether sulfone)s for proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 119, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.052>
- Ofoegbu, R. U., Yusuf O L Momoh, & Ify L Nwaogazie. (2015). Bioremediation of Crude Oil Contaminated Soil Using Organic and Inorganic Fertilizers. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 06(01), Article 01. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000198>
- Pando, M. M., Rosa, D., & Casabal, S. (2010). *Planta de lavado de suelos*: 21.
- Ren, J., Song, X., & Ding, D. (2020). Sustainable remediation of diesel-contaminated soil by low temperature thermal treatment: Improved energy efficiency and soil reusability. *Chemosphere*, 241, 124952. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124952>
- Rodríguez, I. (2013). *Reciclado en suelos de refinería: Nuevas aproximaciones para biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas*.
- Saadoun, I. M. K. (2015). Impact of Oil Spills on Marine Life. En *Emerging Pollutants in the Environment—Current and Further Implications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/60455>
- Saaty, T. L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 32(7), 841-855.
- Sarkar, D., Ferguson, M., Datta, R., & Birnbaum, S. (2005). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: Comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. *Environmental Pollution*, 136(1), 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.09.025>

- Shapiro, A. F., & Koissi, M.-C. (2017). Fuzzy logic modifications of the Analytic Hierarchy Process. *Insurance: Mathematics and Economics*, 75, 189-202. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2017.05.003>
- Sharmel, T., & Atencio, G. (2019). *Remoción de plomo mediante la técnica de lavado por tres agentes extractantes de un suelo contaminado a escala de laboratorio*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Shi, J., Yang, Y., Lu, H., Xi, B., Li, J., Xiao, C., Wang, Y., & Tang, J. (2021). Effect of water-level fluctuation on the removal of benzene from soil by SVE. *Chemosphere*, 274, 129796. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129796>
- Suarez, R. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. Universidad Libre.
- Thibodeau, J., & Désilets, M. (2018). *Fact sheet: Low temperature thermal desorption—Ex situ*. National Research Council. <https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/tfs.aspx?ID=50&lang=eng&wbdisable=true>
- UPME. (2018). *Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales* (No. C-041 DE 2018; V.4, p. 393). Unidad de Planeación Minero-Energética.
- Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), Article 7. <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>
- Vidonish, J. E., Zygourakis, K., Masiello, C. A., Sabadell, G., & Alvarez, P. J. J. (2016). Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation. *Engineering*, 2(4), 426-437. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.005>
- Wang, C.-F., Tzeng, F.-S., Chen, H.-G., & Chang, C.-J. (2012). Ultraviolet-Durable Superhydrophobic Zinc Oxide-Coated Mesh Films for Surface and Underwater–Oil Capture and Transportation. *Langmuir*, 28(26), 10015-10019. <https://doi.org/10.1021/la301839a>
- Yi, Y. M., Park, S., Munster, C., Kim, G., & Sung, K. (2016). Changes in Ecological Properties of Petroleum Oil-Contaminated Soil After Low-Temperature Thermal Desorption Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(4), 108. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2804-4>
- Zhang, Z., Sèbe, G., Rentsch, D., Zimmermann, T., & Tingaut, P. (2014). Ultralightweight and Flexible Silylated Nanocellulose Sponges for the Selective Removal of Oil from Water. *Chemistry of Materials*, 26(8), 2659-2668. <https://doi.org/10.1021/cm5004164>

7. Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana, por la financiación del proyecto a través de la convocatoria 01-2021 y especialmente a los profesores Carlos Valdés y Gloria Marrugo por sus enseñanzas invaluable y apoyo durante todo el proceso académico.

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia
Creative Commons Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)



Leidy Villarreal-Tapia, Kevin Duvan Scarpetta Molano