

# Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils: review and perspective for Ecuador in the Latin American context

## Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos: revisión y perspectiva para Ecuador en el contexto latinoamericano

Solange del Rocío Lituma Carriel<sup>1</sup>  

<sup>1</sup>Universidad Estatal de Milagro. Ecuador.

### Cite as

Lituma Carriel SdR. Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils: review and perspective for Ecuador in the Latin American context. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2024; 3:145. <https://doi.org/10.56294/evk2024145>

### Publication History

**Submitted:** 22-10-2023

**Revised:** 15-03-2024

**Accepted:** 23-08-2024

**Published:** 24-08-2024

### Corresponding Author

Solange del Rocío Lituma Carriel 

### ABSTRACT

**Introduction:** soil contamination by hydrocarbons is a critical problem in megadiverse countries like Ecuador, where oil activity generates severe environmental impacts, especially in sensitive ecosystems such as the Amazon.

**Objective:** to examine the state-of-the-art bioremediation techniques for hydrocarbon-contaminated soils in Latin America, with a special emphasis on Ecuador.

**Development:** bioremediation is addressed as a sustainable alternative for restoring contaminated soils, highlighting techniques such as phytoremediation, mycoremediation, biostimulation, bioaugmentation, and the use of biochar and biosurfactants. The role of indigenous microorganisms (bacteria and fungi) and microbial consortia in the degradation of contaminants such as total petroleum hydrocarbons (TPH) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) is emphasized. Although there has been significant international progress, the applicability of these techniques in tropical and megadiverse contexts—such as those in Latin America—remains limited. Ecuador, despite its environmental vulnerability and economic dependence on oil, has limited scientific output in this field.

**Conclusions:** there is a need to adapt bioremediation strategies to local conditions, considering soil and climate factors, native biodiversity, and socio-environmental dynamics.

**Keywords:** Bioremediation; Hydrocarbons; Contaminated Soils; Ecuador.

### RESUMEN

**Introducción:** la contaminación de suelos por hidrocarburos es un problema crítico en países megadiversos como Ecuador, donde la actividad petrolera genera impactos ambientales severos, especialmente en ecosistemas sensibles como la Amazonía.

**Objetivo:** examinar el estado del arte de las técnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina, con especial énfasis en Ecuador.

**Desarrollo:** se aborda la biorremediación como una alternativa sostenible para restaurar suelos contaminados, destacando técnicas como la fitorremediación, micorremediación, bioestimulación, bioaumentación y el uso de biocarbón (biochar) y biosurfactantes. Se enfatiza el papel de microorganismos autóctonos (bacterias y hongos) y consorcios microbianos en la degradación de contaminantes como hidrocarburos totales de petróleo (TPH) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Aunque existen avances significativos a nivel internacional, la aplicabilidad de estas técnicas en contextos tropicales y megadiversos —como los de América Latina— sigue siendo limitada. Ecuador, a pesar de su vulnerabilidad ambiental y dependencia económica del petróleo, presenta una producción científica escasa en este campo.

**Conclusiones:** se identifica la necesidad de adaptar las estrategias de biorremediación a las condiciones locales, considerando factores edafoclimáticos, biodiversidad nativa y dinámicas socioambientales.

**Palabras claves:** Biorremediación; Hidrocarburos; Suelos Contaminados; Ecuador.

## INTRODUCCIÓN

El suelo se considera un recurso no renovable y cumple funciones fundamentales para el funcionamiento de todos los ecosistemas y el bienestar humano. Sirve como hábitat para diversos organismos, fuente de diversidad genética, sumidero de carbono, sistema natural de almacenamiento y filtración de sustancias, además de ser la base para la producción de alimentos, biomasa y materias primas necesarias para diferentes actividades económicas.<sup>(1)</sup>

No obstante, la extracción y el transporte de hidrocarburos, que se llevan a cabo diariamente en todo el mundo, presentan un riesgo ambiental considerable, siendo los derrames accidentales una de las principales causas de la degradación severa del suelo.<sup>(2)</sup> En los países megadiversos, donde la economía depende en gran medida de la industria petrolera, estos incidentes causan impactos ecológicos críticos, especialmente en áreas vulnerables como la Amazonía.<sup>(3)</sup>

Además de los efectos ecológicos, la contaminación del suelo con hidrocarburos representa un peligro para la salud pública, ya que el petróleo crudo contiene compuestos orgánicos e inorgánicos que son tóxicos. Entre estos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), que son conocidos por su capacidad genotóxica y cancerígena, pudiendo afectar las funciones hepáticas y renales tanto en humanos como en animales.<sup>(4)</sup>

Ante esta situación, la biotecnología ha desarrollado métodos como la biorremediación, que tiene como objetivo restaurar suelos contaminados utilizando microorganismos, plantas o enmiendas orgánicas, lo que permite reducir la concentración de contaminantes sin generar residuos secundarios tóxicos.<sup>(5)</sup>

La biorremediación ha emergido como una de las alternativas más sostenibles frente a la creciente preocupación por la contaminación de suelos causada por hidrocarburos, especialmente en contextos donde los métodos fisicoquímicos resultan costosos, limitados o ambientalmente invasivos. Este interés creciente se refleja en un número significativo de estudios internacionales que priorizan el uso de técnicas biológicas en diversos ecosistemas contaminados.<sup>(6)</sup>

La relación entre la actividad petrolera y el medio ambiente ha generado controversias constantes en América Latina, una región donde las consecuencias de las actividades extractivas afectan tanto al entorno natural como a la salud de las poblaciones.<sup>(3)</sup>

Por lo que se ha realizado esta revisión con el objetivo de examinar el estado del arte de las técnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina, con especial énfasis en Ecuador.

## DESARROLLO

### Técnicas de Biorremediación

#### *Fitorremediación*

La fitorremediación es una técnica de remediación biológica que utiliza plantas para reducir, extraer, contener o transformar contaminantes presentes en suelos, sedimentos o aguas. Este proceso se basa en la capacidad de ciertas especies vegetales de estimular, a través de sus exudados radiculares, la actividad microbiana del suelo, lo cual incrementa la diversidad microbiana y promueve la degradación de compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos.<sup>(7)</sup>

#### *Micorremediación*

Es una técnica de biorremediación que utiliza hongos que tienen la capacidad de colonizar residuos orgánicos y suelos, acelerando la degradación o transformando compuestos recalcitrantes de hidrocarburos totales del petróleo u otros contaminantes en sustancias menos tóxicas mejorando la calidad del suelo contaminado.<sup>(8)</sup>

#### *Microcosmos*

Son sistemas experimentales a pequeña escala que replican condiciones ambientales reales de manera controlada, permitiendo el estudio de procesos ecológicos y de remediación. En el contexto de suelos contaminados, los microcosmos permiten simular interacciones entre contaminantes, suelos, organismos y factores abióticos, facilitando la evaluación de técnicas como la micorremediación sin necesidad de intervenir directamente en el ambiente natural. Estos ensayos brindan información valiosa sobre la eficiencia de los tratamientos, la dinámica de los contaminantes y los efectos sobre la biota del suelo.<sup>(9)</sup>

#### *Bioestimulación*

También es una técnica de biorremediación que consiste en la adición de nutrientes principalmente fuentes de nitrógeno, fósforo y oxígeno u otros compuestos que favorecen el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos autóctonos capaces de degradar contaminantes como los hidrocarburos del petróleo. Esta estrategia busca optimizar las condiciones ambientales del suelo, como la relación de los nutrientes con el fin de potenciar la biodegradación natural.<sup>(10)</sup>

#### *Biocarbon (Biochar)*

El biocarbón (biochar) es un material carbonáceo producido mediante la pirólisis de biomasa residual, caracterizado por su alta estabilidad química y notable capacidad de adsorción. Su estructura porosa y su superficie funcional le permiten retener diversos compuestos orgánicos contaminantes, incluyendo pesticidas, antibióticos, hormonas estrogénicas, ácidos perfluorooctanoicos y compuestos hidrocarbonados como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).<sup>(4)</sup>

#### *Biosurfactante*

Un biosurfactante es un compuesto de origen microbiano que posee propiedades tensoactivas, es decir, puede reducir la tensión superficial e interfacial entre dos fases inmiscibles, como agua y aceite. Estos compuestos se producen naturalmente por bacterias,

levaduras o hongos durante su crecimiento en presencia de fuentes de carbono hidrofóbicas, como aceites o hidrocarburos.<sup>(11)</sup>

Bioaumentación

Consiste en la introducción de microorganismos específicos, ya sean cepas puras o consorcios, que poseen la capacidad de degradar contaminantes particulares en el ambiente receptor. Esta estrategia busca mejorar la eficiencia de la biorremediación cuando los microorganismos autóctonos no son suficientes o efectivos para llevar a cabo el proceso.<sup>(12)</sup>

Biorreactor

| Tabla 1. Técnicas utilizadas en estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Técnicas                                                                                                               | Subtécnicas                                                                                                                                                                                                | Actividad                                                                                                                      |
| Fitorremediación / Rizorremediación                                                                                    | Fitorremediación (plantas: Medicago sativa, Zea mays, Sorghum vulgare, Chrysopogon zizanioides, Eleocharis sp.)<br>Micorremediación asociada a raíces (A. bisporus, hongos rizósfera de Rhizophora mangle) | Remover contaminantes del suelo o agua mediante absorción o transformación por raíces o simbiosis con hongos micorrízicos.     |
| Bioestimulación                                                                                                        | Bioestimulantes (nutrientes, β-glucanos, biochar)<br>Biosurfactantes/bioemulsificantes (aniónicos, rhamnolípidos)                                                                                          | Estimular la actividad de microorganismos autóctonos degradadores mediante el mejoramiento del ambiente o la biodisponibilidad |
| Bioaumentación                                                                                                         | Inoculación de cepas/consorcios (pseudomonas, Bosea, Sphingobium, Acinetobacter spp., Bacillus spp., BCons)                                                                                                | Introducir microorganismos con alta capacidad degradadora para reforzar la actividad del ecosistema en el sitio contaminado.   |
| Procesos ex situ                                                                                                       | Biopilas, Windrows, landfarming, compostaje.                                                                                                                                                               | Tratamiento de suelos contaminados fuera del sitio original con técnicas aireadas o compostadas.                               |
| Procesos físicoquímico-biológicos combinados                                                                           | Lavado de suelos, bioaereación in situ, Extracción multifásica (MPE), bombeo, Biorreactor de lecho empacado                                                                                                | Combinar procesos físicos y químicos con degradación biológica para maximizar la remoción de contaminantes complejos.          |
| Biorreactores y sistemas secuenciales                                                                                  | SS-SBR (Soil-Slurry SBR) UAF-3SS (Up-flow Anaerobic Filter 3 fases) DQO removida 80–99 % suelo, 60–99 % agua                                                                                               | Remoción de contaminantes en suelos y aguas mediante tratamiento en reactores biológicos controlados.                          |
| Estrategias pasivas o híbridas                                                                                         | Biorremediación semi-pasiva<br>Atenuación natural monitoreada                                                                                                                                              | Permitir la remediación natural con monitoreo técnico, o con intervención mínima.                                              |

Es un dispositivo o sistema cerrado que proporciona un ambiente controlado para llevar a cabo procesos biológicos, incluyendo la degradación de compuestos contaminantes mediante el metabolismo microbiano.<sup>(13)</sup>

La tabla 1 resume las técnicas y subtécnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina.

Organismos biorremediadores en suelos contaminados con hidrocarburos

La biorremediación depende del empleo de organismos capaces de transformar o degradar compuestos contaminantes (tabla 2) en productos menos tóxicos, aquí es donde se clasifican principalmente en tres grupos de organismos los cuales son bacterias, hongos y plantas, los cuales pueden actuar de forma individual o en consorcios sinérgicos.<sup>(14)</sup>

| Tabla 2. Hidrocarburos más comunes en suelos como contaminados en América Latina |                                                |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|
| Categoría                                                                        | Ejemplos                                       | Naturaleza                 |
| Hidrocarburos Totales (TPH)                                                      | Mezcla de hidrocarburos C10–C28                | Alifáticos y aromáticos    |
| Aromáticos policíclicos (PAHs)                                                   | Fenantreno, antraceno, naftaleno               | Persistentes, cancerígenos |
| Fracciones ligeras y medias                                                      | Diésel, nafta, gasoil, aceite lubricante       | Volátiles, inflamables     |
| Residuos complejos                                                               | Lodos aceitosos, aceite usado, bioemulsionados | Mezclas variables          |
| Compuestos específicos                                                           | TBHP, natfalato, biodiésel                     | Puntuales y menos comunes  |

Bacterias

Las bacterias representan el grupo más utilizado debido a su capacidad metabólica para degradar hidrocarburos alifáticos, aromáticos y compuestos complejos como los PAHs.<sup>(15)</sup> La tabla 3 recoge algunos ejemplos de las bacterias utilizadas para la biorremediación.

| Tabla 3. Microorganismos bacterianos utilizados en estudios de biorremediación en América Latina |                                              |                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Familia microbiana                                                                               | Géneros / Especies                           | Aplicaciones más frecuentes                        |
| Pseudomonadaceae                                                                                 | Pseudomonas aeruginosa, P. putida, P. sp.    | Bioaumentación, producción de biosurfactantes      |
| Bacillaceae                                                                                      | Bacillus subtilis, B. cereus, Priestia flexa | Consorcios bacterianos, resistencia a metales      |
| Actinobacteria                                                                                   | Rhodococcus sp., Microbacterium sp.          | Degradación de PAHs complejos                      |
| Moraxellaceae                                                                                    | Acinetobacter sp.                            | Producción de biosurfactantes y degradación de TPH |
| Brucellaceae                                                                                     | Ochrobactrum intermedium, Brucella sp.       | Degradación de compuestos recalcitrantes           |
| Staphylococcaceae                                                                                | Staphylococcus sp.                           | Participación secundaria en consorcios             |

## Hongos

Los hongos, particularmente los filamentosos, poseen enzimas extracelulares potentes como lacasas y peroxidasas que han sido aplicadas en micorremediación (tabla 4), especialmente en suelos con alto contenido de compuestos aromáticos persistentes.<sup>(9)</sup>

| Tabla 4. Hongos utilizados en estudios de biorremediación en América Latina |                                       |                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Familia                                                                     | Género/Especie                        | Aplicación en biorremediación                                                                                |
| Trichocomaceae                                                              | <i>Aspergillus oryzae</i> (cepa MF13) | Degradación de fenantreno (PHE); micorremediación asociada a raíces de manglar ( <i>Rhizophora mangle</i> ). |
|                                                                             | <i>A. flavipes</i> (cepa QCS12)       |                                                                                                              |
|                                                                             | <i>A. niger</i>                       |                                                                                                              |
|                                                                             | <i>A. flavus</i>                      |                                                                                                              |
|                                                                             | <i>A. egyptiacus</i>                  |                                                                                                              |
|                                                                             | <i>Fusarium oxysporum</i>             |                                                                                                              |
| Agaricaceae                                                                 | <i>Agaricus bisporus</i>              | Uso del sustrato residual del cultivo como bioestimulante para bacterias autóctonas                          |

## Plantas

Se la utiliza para la fitorremediación, por su habilidad de absorber o transformar contaminantes.<sup>(16)</sup> También muchas especies actúan como hospedadoras de microorganismos rizosféricos que potencian la biorremediación.<sup>(17)</sup> La tabla 5 recoge algunos ejemplos de las plantas utilizadas para la biorremediación.

| Tabla 5. Plantas utilizadas en estudios de biorremediación en América Latina |                                                                                          |                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Familia                                                                      | Género / especie                                                                         | Aplicación en biorremediación                                      |
| Fabaceae                                                                     | <i>Medicago sativa</i> (alfalfa)                                                         | Fitorremediación de suelos con hidrocarburos                       |
| Cucurbitaceae                                                                | <i>Cucurbita pepo</i> + microbiota de rizósfera                                          | Fitorremediación y estimulación de bacterias rizosféricas          |
| Cyperaceae                                                                   | <i>Bulbostylis nesiotes</i> , <i>Cyperus atlanticus</i>                                  | Fitorremediación en zonas húmedas contaminadas con hidrocarburos   |
| Araceae                                                                      | <i>Lemna minor</i>                                                                       | Fitorremediación en cultivos de maceta.                            |
| Poaceae                                                                      | <i>Zea mays</i> (maíz) + nativas <i>Sorghum vulgare</i> , <i>Chrysopogon zizanioides</i> | Fitorremediación en combinación con bacterias rizosféricas nativas |
|                                                                              |                                                                                          | Fitorremediación en cultivos de maceta.                            |

## Consortios microbianos

Son mezclas naturales o diseñadas de varios microorganismos que actúan de manera sinérgica, mejorando la tasa de degradación y adaptabilidad a condiciones ambientales diversas. los consorcios tipo *BCons* (bacterias hidrocarbonoclastas) se han usado con éxito en suelos ecuatorianos contaminados con petróleo crudo.<sup>(18)</sup>

## Antecedentes referenciales

La biorremediación ha emergido como una estrategia sostenible lo cual ha evolucionado mediante el uso de enfoques biotecnológicos avanzados generado un interés creciente en todo el mundo. No obstante, estas investigaciones se han desarrollado mayormente en contextos no tropicales, generando un desbalance geográfico en su aplicabilidad para regiones como América Latina. Pese a ello, estudios intercontinentales han subrayado el potencial de la biorremediación en regiones tropicales, destacando la importancia de factores como la selección adecuada de plantas y microorganismos, así como la bioaccesibilidad de los contaminantes.<sup>(6)</sup>

En Canadá, desarrollaron un consorcio bacteriano sintético con capacidad para producir enzimas activas a bajas temperaturas, evidenciando el progreso científico en condiciones ambientales extremas. Su ensayo, implementado en columnas de suelo simuladas, logró una reducción significativa de hidrocarburos policíclicos aromáticos, lo que destaca el potencial de estas tecnologías en regiones de clima frío. Sin embargo, los autores no consideran escenarios con mayor vulnerabilidad ambiental, como los entornos tropicales y de países en desarrollo. Esta omisión representa una limitación importante en la aplicabilidad global de los resultados, y refuerza la necesidad de estudios que visibilicen estos vacíos mediante análisis bibliométricos sistemáticos. En este sentido, el presente trabajo se plantea como una contribución orientada a identificar las dinámicas investigativas en torno a la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, con especial énfasis en Ecuador, una región megadiversa donde estos enfoques son escasamente abordados desde la evidencia científica.<sup>(19)</sup>

En cambio, un estudio realizado en China evaluó los cambios en la diversidad microbiana del suelo tras la contaminación con crudo, diésel y gasolina, revelando una notable disminución en la diversidad de comunidades bacterianas y fúngicas, así como un enriquecimiento selectivo de cepas degradadoras. Entre los hallazgos más relevantes, se destaca el aislamiento de dos cepas bacterianas, *Serratia marcescens* PL y *Raoultella ornithinolytica* PS, capaces de degradar más del 75 % de los hidrocarburos en condiciones controladas. Cuando se combinaron, estas cepas alcanzaron una eficiencia de biodegradación del 96,83 %, eliminando incluso compuestos altamente recalcitrantes como fitano y pristano. Estos resultados evidencian el potencial de consorcios microbianos adaptados para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, aunque la mayoría de estos estudios se han desarrollado en contextos urbanos o industriales no tropicales, lo que subraya la necesidad de generar conocimiento localizado en regiones como América Latina y, particularmente, en ecosistemas tropicales donde las condiciones edafoclimáticas y

la biodiversidad microbiana difieren considerablemente.<sup>(20)</sup>

En las investigaciones en Australia,<sup>(21)</sup> el biocarbon ha emergido como una alternativa prometedora para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, debido a su bajo costo, sostenibilidad ambiental y capacidad para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esta estrategia se ha centrado particularmente en su rol como agente bioestimulante, promoviendo el crecimiento microbiano y, por ende, la biodegradación de compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y fracciones del petróleo. Según Dike et al.<sup>(21)</sup> el biochar favorece la actividad enzimática, mejora la retención de nutrientes y agua, y aumenta la porosidad del suelo, lo cual genera un ambiente favorable para la acción de bacterias degradadoras. Aunque estudios experimentales reportan eficiencias de remoción superiores al 70 % en condiciones controladas, también se identifican variabilidades significativas en los resultados, atribuibles a factores como el tipo de biomasa, la temperatura de pirólisis, y la interacción con nutrientes añadidos. Esto evidencia la necesidad de continuar investigando su aplicabilidad real en suelos tropicales y contextos de alta vulnerabilidad ambiental, como los presentes en países en desarrollo.<sup>(21)</sup>

Se han demostrado avances significativos en el uso de microorganismos autóctonos y residuos agroindustriales como herramientas clave para la biorremediación.<sup>(22)</sup> En Brasil, por ejemplo, desarrollaron un biosurfactante sostenible a partir de *Serratia marcescens* UCP 1549, utilizando aguas residuales del procesamiento de yuca. Este compuesto mostró alta estabilidad frente a variaciones de pH, temperatura y salinidad, siendo capaz de remover hasta un 94 % de aceite quemado de arena contaminada, lo que valida su aplicabilidad en procesos agrícolas y de remediación ambiental.<sup>(11)</sup>

En Perú, Quiñones-Cerna et al.<sup>(23)</sup> evaluaron la capacidad degradadora de bacterias indígenas aisladas de suelos agrícolas en Huamachuco. El estudio identificó cepas como *Pseudomonas protegens*, *Pseudomonas citri* y *Acinetobacter guillouiae*, con eficiencias de degradación superiores al 90 % en condiciones controladas. Estos resultados destacan el potencial de microorganismos no provenientes de zonas previamente contaminadas, abriendo nuevas posibilidades para una biorremediación efectiva y sostenible en suelos agrícolas andinos.

En Colombia, el artículo de Benítez et al.<sup>(16)</sup> evalúa la eficacia de la fitorremediación para eliminar contaminantes en suelos, lixiviados y aguas. Se utilizaron *Sorghum vulgare* para suelos contaminados con diésel, *Chrysopogon zizanioides* para lixiviados de vertederos y *Lemna minor* para agua con níquel, logrando remociones de hasta 98 %. El estudio, realizado en Cartagena Colombia, demuestra que la fitorremediación es una alternativa sostenible y eficiente para contextos latinoamericanos.

En Venezuela se realizó biorremediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos en un acuífero tropical de Venezuela, se optó por un tratamiento ex situ, utilizando un reactor secuencial tipo lodo (SS-SBR) y un filtro anaerobio de flujo ascendente (UAF-3SS), alcanzando hasta un 99 % de remoción de DQO. El estudio destaca la eficacia de sistemas acoplados para superar limitaciones ambientales y mejorar la biodegradación de hidrocarburos en contextos tropicales.<sup>(24)</sup>

En el contexto de Ecuador, durante las últimas décadas, se ha enfrentado una severa problemática ambiental asociada a la contaminación de suelos por actividades hidrocarburíferas, principalmente en la región Amazónica. Dada la importancia estratégica del petróleo para la economía nacional, que representa más del 30 % de las exportaciones y el 11 %, se han desarrollado múltiples investigaciones orientadas a mitigar el impacto ambiental mediante técnicas de biorremediación.<sup>(25)</sup>

Uno de los estudios más relevantes en el contexto ecuatoriano fue realizado por Hidalgo-Lasso et al.<sup>(1)</sup>, quienes propusieron actualizar los criterios de remediación de suelos basándose no solo en hidrocarburos totales extraíbles (TEPH), sino también en los hidrocarburos biodisponibles (TBPH). Los autores demostraron que existe una correlación más fuerte entre TBPH y toxicidad evaluada con el bioensayo Microtox, lo cual pone en cuestionamiento los enfoques regulatorios actuales que no consideran la biodisponibilidad.

También se destaca el artículo de Pozo-Rivera et al.<sup>(2)</sup> sobre la aplicación de bioindicadores usando diversas especies de escarabajos estercoleros en sitios remediados del Amazonas ecuatoriano, el estudio reveló que, aunque se han aplicado técnicas de lavado de suelos y revegetación, la diversidad biológica en ecosistemas degradados continúa siendo significativamente menor en comparación con bosques naturales destaca la necesidad de considerar indicadores biológicos en las evaluaciones post remediación. Asimismo, investigaciones como las de Hidalgo-Lasso et al.<sup>(1)</sup> analizaron los beneficios de la remediación considerando variables ecosistémicas como la eutrofización y toxicidad acuática, mostrando una reducción del 43 % en impactos negativos, estas prácticas incluyen el uso de surfactantes biodegradables, compostaje, windrows y landfarming, siendo este último más eficiente en términos de degradación.

En Ecuador, el suelo constituye un recurso fundamental para el equilibrio ambiental y el desarrollo humano, especialmente en regiones como la Amazonía, donde desde la década de 1970 se ha concentrado la actividad petrolera del país. Esta actividad, aunque estratégica para la economía al representar más del 30 % de las exportaciones y aportar un 11 % al PIB nacional en 2022, ha generado importantes impactos ambientales, incluyendo la contaminación del suelo, el agua y el aire. Como respuesta, desde 2005 el Estado ecuatoriano ha implementado políticas de remediación que han permitido limpiar más de 1300 sitios contaminados y tratar alrededor de 1,6 millones de toneladas de suelo en las provincias amazónicas de Orellana y Sucumbíos, estas intervenciones se han regido por marcos normativos como el Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas y el Acuerdo Ministerial 097, los cuales establecen límites permisibles de contaminantes como hidrocarburos totales extraíbles, metales pesados y compuestos aromáticos policíclicos, dependiendo del uso del suelo, aplicaron evaluaciones de riesgo ecológico en sitios contaminados del Oriente ecuatoriano, proponiendo criterios adaptativos de remediación que toman en cuenta el uso del suelo ecosistemas sensibles, agrícolas o industriales, lo cual representa un avance en la contextualización normativa.<sup>(1)</sup>

Complementariamente, el trabajo de Ojeda-Morales et al.<sup>(26)</sup> exploró la eficacia del compostaje combinado con microorganismos autóctonos para reducir la concentración de hidrocarburos. Se evidenció que el uso de consorcios bacterianos nativos y bioestimulantes aumentó significativamente la tasa de remoción en suelos de la provincia de Sucumbíos.

Por otro lado, estudios internacionales con colaboración ecuatoriana, como el de González-Toril et al.<sup>(27)</sup> aplicaron análisis metagenómicos en zonas de minería de esquisto bituminoso para evaluar comunidades microbianas con potencial biorremediador, abriendo la puerta al uso de enfoques ómicos en contextos locales.

Finalmente, sobresale la colaboración internacional en el campo de la biorremediación es el estudio realizado por González-Toril et al.<sup>(27)</sup> en el que un consorcio microbiano natural aislado del yacimiento de esquisto bituminoso de Riutort, España fue analizado metagenómicamente y luego aplicado experimentalmente en suelos ecuatorianos contaminados por hidrocarburos en la Refinería La Libertad y en núcleos del Campo Ancón ,Ecuador logrando una degradación del 50,8 % de los hidrocarburos totales en 60 días. Este antecedente no solo demuestra el potencial de bioproductos naturales, sino también la importancia de la colaboración científica transnacional para abordar problemáticas ambientales compartidas entre Europa y América Latina.

En América Latina, si se han desarrollado análisis bibliométricos aplicados a la biorremediación, por ejemplo, se realizó una revisión sistemática y bibliométrica de la investigación sobre biorremediación y fitorremediación en la región, utilizando las bases de datos Scopus y Web of Science. Su análisis evidenció que Brasil, México, Argentina y Colombia concentran el mayor número de publicaciones, siendo las universidades públicas los principales centros de producción científica. También se identificaron bacterias degradadoras, hongos, plantas nativas y biosurfactantes como los principales agentes biorremediadores reportados. Uno de los hallazgos clave fue la escasa producción en países con gran diversidad ecológica, como Ecuador o Bolivia, lo cual sugiere la existencia de vacíos importantes de conocimiento y oportunidades de investigación futura.<sup>(14)</sup>

El estudio de Valdiviezo Gonzales et al.<sup>(28)</sup> ofrece una revisión bibliométrica integral de la investigación utilizando técnicas como biorremediación, oxidación avanzada y lavado entre otras de suelos para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. El análisis, basado en datos de Web of Science y procesado con CiteSpace, revela que los países con mayor producción científica son China, Estados Unidos e Irán, y que las colaboraciones internacionales están aumentando, aunque persiste una concentración de conocimiento en países del hemisferio norte. Las principales palabras clave incluyen “contaminación por petróleo”, “biorremediación”, “eficiencia de remoción” y “fitotoxicidad”. Los autores destacan la necesidad de trasladar estas investigaciones hacia contextos más diversos ecológica y geográficamente, lo que refuerza la importancia de desarrollar estudios específicos para las diferentes regiones.

En un estudio<sup>(29)</sup> particularmente enfocado en la producción científica latinoamericana, llevaron a cabo un análisis bibliométrico de la investigación relacionada con la remediación ambiental en México. La revisión, desarrollada a partir de la base de datos Scopus, se centró en publicaciones entre 2000 y 2020 con énfasis en temas como biorremediación, toxicología ambiental y restauración de ecosistemas contaminados. Sus resultados mostraron un crecimiento sostenido de la producción científica en el área, particularmente en instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), que lideran la generación de conocimiento. Además, se destacó la contribución creciente de investigaciones interinstitucionales, así como la necesidad de fortalecer la vinculación entre las investigaciones ambientales y las políticas públicas en contextos altamente biodiversos como el mexicano, donde los pasivos ambientales asociados a la actividad industrial aún representan un reto significativo para la sostenibilidad ambiental.

En conjunto, los estudios revisados (tabla 6) reflejan una creciente atención en América Latina hacia la biorremediación, con una producción científica liderada por países como Brasil, México. Sin embargo, esta revisión también evidencia una alarmante escasez de investigaciones en países megadiversos como es el caso de Ecuador, a pesar de su alta vulnerabilidad ambiental y la presión ejercida por las actividades extractivas. Aunque diversas investigaciones han utilizado herramientas como CiteSpace y bases de datos como Scopus y Web of Science para mapear la evolución de este campo, la mayoría presentan un enfoque regional o global poco contextualizado.

| Tabla 6. Artículos en el contexto Ecuador sobre biorremediación |                           |                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Autor                                                           | Ubicación                 | Técnica de biorremediación                                            |
| Camacho et al. <sup>(3)</sup> , 2024                            | Esmeraldas                | Biocarbon con cascara de arroz y bioestimulación                      |
| Pozo-Rivera et al. <sup>(2)</sup> , 2023                        | Orellana y Sucumbíos      | Bioindicadores con escarbajos                                         |
| V. J. García et al. <sup>(30)</sup> , 2019                      | Esmeraldas                | Bioaumentación y espectroscopia                                       |
| Orejuela-Romero et al. <sup>(31)</sup> , 2025                   | Francisco Orellana        | Bioestimulacion mediante enmiendas organicas                          |
| González-Toril et al. <sup>(27)</sup> , 2023                    | España y Ecuador Libertad | Bioaumentación con bacterias                                          |
| Andrade et al. <sup>(5)</sup> , 2024                            | Isla Santay               | Aislamiento y tolerancia microbiana más producción de biosurfactantes |
| Páliz et al. <sup>(15)</sup> , 2021                             | Orellana                  | Bioaumentación con bacterias nativas                                  |

Contaminación de suelos por hidrocarburos: consecuencias ambientales

La contaminación por hidrocarburos del petróleo representa una de las problemáticas ambientales más persistentes y complejas, debido a la baja biodisponibilidad y alta toxicidad de compuestos como los hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAPs). Estos contaminantes afectan directamente el microbiota edáfico, inhiben la actividad enzimática del suelo y alteran parámetros como la germinación y el crecimiento de plantas.<sup>(32)</sup>

Desde un enfoque más aplicado, el estudio de Ruseva et al.<sup>(33)</sup> en suelos Chernozem de la región de Rostov, Rusia demostró que la contaminación con petróleo, incluso en niveles bajos (0,1 %), reduce drásticamente la actividad de catalasa y deshidrogenasa, la densidad bacteriana total y provoca efectos fitotóxicos medibles en raíces de *Raphanus sativus*. Este hallazgo valida el uso de indicadores biológicos como herramientas clave de monitoreo, y se alinea con lo reportado en estudios similares de Asia y Europa.<sup>(34)</sup>

Sin embargo, los autores también evidencian una limitación metodológica, la mayoría de estos estudios están contextualizados

en suelos templados o áridos, lo cual no refleja la complejidad ecológica de suelos tropicales como los del Ecuador, caracterizados por su elevada diversidad microbiana.

Según, Cambarieri et al.<sup>(10)</sup> la bioestimulación es especialmente efectiva cuando existen poblaciones microbianas nativas con potencial degradador, pero que están limitadas por condiciones edáficas adversas.

El biochar, obtenido por pirólisis de residuos orgánicos, ha cobrado protagonismo como enmienda ambiental debido a su capacidad para adsorber contaminantes, mejorar la estructura del suelo y fomentar comunidades microbianas degradadoras.<sup>(6)</sup>

En particular, Minnikova et al.<sup>(35)</sup> demostraron que la combinación de biochar con cepas bacterianas autóctonas de *Bacillus* y *Paenibacillus* permitió una reducción del 67 % de hidrocarburos en solo 30 días, recuperando también parámetros enzimáticos y vegetales. En comparación, el estudio de Ruseva et al.<sup>(33)</sup> que utilizó solo biochar mostró mejoras parciales, lo que sugiere que la bioaumentación sinérgica representa un enfoque más eficaz en condiciones de alta toxicidad.

Esta evidencia respalda la postura crítica de este investigador el biochar debe concebirse no como solución única, sino como parte de un sistema integrado de biorremediación que considere el microbiota local y la dinámica del suelo tropical.

En el contexto de la biorremediación, el biocarbón ha sido ampliamente estudiado por su potencial como adsorbente con los derivados del petróleo, si bien gran parte de las revisiones existentes se han centrado en su capacidad de adsorción más que en su participación en procesos degradativos.<sup>(4)</sup> Su efectividad puede incrementarse mediante modificaciones físico-químicas, las cuales permiten optimizar sus propiedades para aplicaciones específicas, especialmente en suelos contaminados con hidrocarburos.

El uso de biosurfactantes producidos por bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* o *Halomonas pacifica* ha demostrado aumentar la biodisponibilidad de hidrocarburos, facilitando su degradación.<sup>(36,37)</sup> Esta técnica, además de ecológica, permite reducir la necesidad de surfactantes sintéticos costosos y potencialmente tóxicos.

Desde un enfoque biotecnológico avanzado, Davoodi et al.<sup>(19)</sup> desarrollaron consorcios bacterianos interespecie adaptados a bajas temperaturas, aplicados en columnas de suelo. Sus resultados mostraron reducción eficiente de PAHs mediante producción enzimática activa, lo cual marca una tendencia global hacia biorremediación basada en ingeniería microbiana, aún ausente en América Latina.

A nivel latinoamericano, Castillo-Campos et al.<sup>(38)</sup> y Orellana et al.<sup>(39)</sup> evidencian avances incipientes, centrados en biosurfactantes bacterianos y tratamientos con compost, pero aún con escasa transferencia tecnológica. La brecha identificada permite posicionarse críticamente que Ecuador debe avanzar hacia modelos de innovación bioambiental basados en su propia biodiversidad edáfica.

El documento señala que los biosurfactantes pueden clasificarse en varios tipos, como glicolípidos, lipopeptídicos, fosfolípidos y polímeros tensoactivos, siendo los rhamnolípidos (producidos por *Pseudomonas aeruginosa*) y los sophorolípidos (producidos por *Starmerella bombicola*) los más estudiados. Su relevancia ambiental radica en su capacidad para emulsionar contaminantes orgánicos e incrementar su biodisponibilidad, favoreciendo su degradación microbiana. A diferencia de los surfactantes sintéticos, los biosurfactantes son biodegradables, no tóxicos y activos en condiciones extremas de pH, temperatura y salinidad.<sup>(11)</sup>

En particular, se ha observado que el uso de *Medicago sativa* (alfalfa) puede reducir significativamente la concentración de fenantreno en suelos contaminados, activando procesos de rizodegradación y facilitando el desarrollo de comunidades bacterianas especializadas en la biodegradación de contaminantes.<sup>(7)</sup>

En ambientes tropicales, por ejemplo, se ha demostrado que *Eleocharis mutata*, una planta halotolerante, puede crecer en suelos con salinidades de hasta 125 dS/m, contribuyendo significativamente a la recuperación de zonas afectadas por derrames salinos provenientes de la industria petrolera. Su acción permite disminuir la salinidad del suelo, aumentar el contenido de materia orgánica y facilitar la sucesión vegetal con especies como *Typha sp.*, demostrando el potencial de la fitorremediación en regiones tropicales húmedas.<sup>(40)</sup>

Aunque tradicionalmente se ha investigado la acción de Basidiomycota ligninolíticos, estudios recientes han demostrado que también especies del filo Ascomycota, como *Aspergillus oryzae* y *Aspergillus flavipes*, poseen un alto potencial para degradar fenantreno, incluso en concentraciones de hasta 5000 mg/L, sin necesidad de fuentes adicionales de carbono. Estas especies no solo toleran altos niveles del contaminante, sino que lo degradan eficazmente, lo que las convierte en organismos promisorios para la micorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.<sup>(8)</sup>

### Monitoreo y evaluación: hacia indicadores funcionales y adaptativos

Más allá de la eliminación de contaminantes, la restauración ecológica exige sistemas de evaluación funcional del suelo, Vergnano et al.<sup>(41)</sup> proponen el uso de sensores TDR (Reflectometría en el Dominio del Tiempo) para monitorear en tiempo real propiedades del suelo conductividad, permitividad eléctrica, revelando la actividad microbiana sin métodos destructivos.

Este enfoque es complementado por indicadores biológicos como los utilizados por Ruseva et al.<sup>(33)</sup> actividad de deshidrogenasas, número de bacterias y bioensayos de fitotoxicidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios no adaptan estos indicadores a contextos tropicales, donde la variabilidad microbiana puede alterar su sensibilidad y respuesta. Por ello, se considera necesario desarrollar líneas base de bioindicadores locales en Ecuador, lo cual permitiría estandarizar protocolos de monitoreo con enfoque ecosistémico.

### Síntesis conceptual y brechas identificadas

La literatura consultada sugiere que la eficacia de la biorremediación depende menos del tipo de enmienda utilizada y más del contexto edafoclimático, biológico y socio ambiental donde se aplica. Si bien estrategias como el biocarbon y la rizorremediación cuentan con amplio respaldo experimental, su aplicación en suelos tropicales, biodiversos y socialmente sensibles, como los del Ecuador, continúa siendo limitada y poco documentada.

Esta investigación parte de una mirada crítica y situada en la realidad ecuatoriana. Se reconoce el gran potencial que tienen las

tecnologías de biorremediación para enfrentar la contaminación por hidrocarburos en suelos, pero también se advierte que no basta con aplicar modelos internacionales de forma directa.

Es necesario adaptarlos al entorno específico del país, tomando en cuenta no solo las condiciones ecológicas, sino también las dinámicas sociales y culturales propias de cada región. Aunque a nivel internacional existen avances importantes y numerosas experiencias exitosas, en Ecuador todavía hay mucho por construir, aún falta generar conocimiento sobre aspectos clave como las dosis adecuadas, la frecuencia de aplicación o la compatibilidad entre diferentes enmiendas biológicas, especialmente en contextos tropicales o en zonas andinas donde las condiciones del suelo, el clima y la biodiversidad presentan características particulares.

Esto se traduce en que muchas veces se recurre a ensayos aislados o soluciones sin validación experimental local, lo que reduce su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Por otra parte, a pesar del creciente interés por la biorremediación, Ecuador tiene una baja visibilidad científica en este campo, la cantidad de publicaciones sigue siendo limitada, y son pocos los estudios que aplican estas técnicas en contextos amazónicos o urbanos del país. Sin embargo, la participación de investigadores ecuatorianos en publicaciones de revistas internacionales demuestra que existen capacidades y conocimientos que podrían fortalecerse mediante una cooperación científica más activa.

## CONCLUSIONES

La biorremediación es una estrategia eficaz y sostenible para la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, aunque su éxito depende del contexto ambiental y la adecuada selección de técnicas y organismos. Existe una brecha significativa entre la investigación internacional y su aplicabilidad en ecosistemas tropicales, como los de Ecuador, donde la biodiversidad microbiana y las condiciones del suelo son únicas.

Es crucial desarrollar protocolos adaptados a las realidades locales, integrando bioindicadores, monitoreo en tiempo real y la participación de comunidades microbianas nativas. La colaboración científica internacional y el fortalecimiento de la investigación local son clave para avanzar en la remediación de suelos en países con alta vulnerabilidad ambiental y económica dependiente de extractivismos.

## FINANCIACIÓN

Ninguna.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan no tener conflicto de interés alguno.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

*Conceptualización:* Solange del Rocío Lituma Carriel.

*Investigación:* Solange del Rocío Lituma Carriel.

*Metodología:* Solange del Rocío Lituma Carriel.

*Redacción – borrador original:* Solange del Rocío Lituma Carriel.

*Redacción – revisión y edición:* Solange del Rocío Lituma Carriel.

## REFERENCIAS

- Hidalgo-Lasso D, García-Villacís K, Urvina Ulloa J, Marín Tapia D, Gómez Ortega P, Coulon F. Updating risk remediation-endpoints for petroleum-contaminated soils? A case study in the Ecuadorian Amazon region. *Heliyon*. 2024;10(9).
- Pozo-Rivera WE, Quiloango-Chimarro C, Paredes X, Landívar M, Chiriboga C, Villacís J, et al. Response of dung beetle diversity to remediation of soil ecosystems in the Ecuadorian Amazon. *Peerj*. 2023;11.
- Camacho DND, Macías TLS, Riera MA, Anchundia BJC. BIOREMEDIATION OF SOIL SAMPLES CONTAMINATED WITH CRUDE OIL USING RICE HUCK-BASED BIOCARBON (ORYZA SATIVA). *International Journal of Conservation Science*. 2024;15(2):1129–44.
- Wei Z, Wei Y, Liu Y, Niu S, Xu Y, Wang JJ, et al. Biocharbased materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: Performances, mechanisms, and environmental impact. *Journal of Environmental Sciences China*. 2024;138:350–72.
- Andrade JC, Mafla S, Riofrío K, Hernández J, Tobes I, Lara-Basantes C. Hydrocarbon tolerance evaluation of the microbiota associated with the Roystonea oleracea palm from Santay Island (Ecuador). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024;1434(1).
- Hoang SA, Seshadri B, Bolan NS, Sarkar B, Lamb D, Vinu A, et al. Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;416.
- Hariyo DD, Saparrat MCN, Barrera MD. Changes in microbial communities during phytoremediation of contaminated soil

with phenanthrene. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2020;51(4):1853–60.

8. de la Cruz-Izquierdo RI, Paz-González AD, Reyes-Espinosa F, Vazquez-Jimenez LK, Rivera G, Salinas-Sandoval M, et al. Analysis of phenanthrene degradation by Ascomycota fungi isolated from contaminated soil from Reynosa, Mexico. *Letters in Applied Microbiology*. 2021;72(5):542–55.

9. Mauricio-Gutiérrez A, Jiménez-Salgado T, Tapia-Hernández A, Romero-Arenas O. Diesel degradation by residual substrate of *Agaricus bisporus* at the microcosm level. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*. 2022;13(2):223–34.

10. Cambarieri L, Acuña AJ, Pucci GN. Optimizing a biostimulation process in a soil of Río Gallegos, Argentina, for use in bioremediation of hydrocarbons. *Ecosistemas*. 2021;30(1).

11. Araújo HWC, Andrade RFS, Montero-Rodríguez D, Rubio-Ribeaux D, Alves Da Silva CA, Campos-Takaki GM. Sustainable biosurfactant produced by *Serratia marcescens* UCP 1549 and its suitability for agricultural and marine bioremediation applications. *Microbial Cell Factories*. 2021;18(1).

12. Chan-Quijano JG, Cach-Pérez MJ, Valdez-Hernández M, González-Salvatierra C, Ceccon E. Physiological performance of two tree species in oil-contaminated soil. *Botanical Sciences*. 2023;101(1):197–216.

13. Márquez A, Guevara E, Pérez S, Freytez E, Maldonado J, Buroz E. Soil and groundwater remediation proposal for hydrocarbons in a tropical aquifer. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 2023;11(2):141–68.

14. Darío T, Velásquez M, Velasquez M. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Revista Estudios Ambientales*. 2024;12(1):27–43.

15. Páliz KP, Licta E, Cunachi AM. Reduction of the soil environmental impact caused by the presence of total petroleum hydrocarbons (TPH) by using *Pseudomonas* sp. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2021;30(4):573–84.

16. Benítez LPT, Miranda LM, Castro CAC. Phytoremediation to Remove Pollutants from Water, Leachates and Soils. *Chemical Engineering Transactions*. 2022;92:553–8.

17. Morales-Guzmán G, Ferrera-Cerrato R, Esquivel-Cote R, Alarcón A, Rivera-Cruz MDC, Torres-Bustillos LG, et al. Phytoremediation of soil contaminated with weathered petroleum hydrocarbons by applying mineral fertilization, an anionic surfactant, or hydrocarbonoclastic bacteria. *International Journal of Phytoremediation*. 2023;25(3):329–38.

18. García-Uitz K, León-Pech MG, Cruz JC, Moreno-Andrade I, Giacomán-Vallejos G, Ponce-Caballero C. Isolation and characterization of microbial diversity in phenanthrene-degrading consortia in a pollution zone in Ciudad del Carmen, Mexico. *Revista Mexicana De Ingeniera Quimica*. 2024;23(2).

19. Davoodi SM, Miri S, Brar SK, Martel R. Formulation of Synthetic Bacteria Consortia for Enzymatic Biodegradation of Polyaromatic Hydrocarbons contaminated soil: Soil Column Study. 2023.

20. Bidja Abena MT, Chen G, Chen Z, Zheng X, Li S, Li T, et al. Microbial diversity changes and enrichment of potential petroleum hydrocarbon degraders in crude oil-, diesel-, and gasoline-contaminated soil. *3 Biotech*. 2020;10(2).

21. Dike CC, Shahsavari E, Surapaneni A, Shah K, Ball AS. Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarboncontaminated soils? *Environment International*. 2021;154.

22. Cruz-Narváez Y, Rico-Arzate E, Castro-Arellano JJ, Noriega-Altamirano G, PiñaEscobedo A, Murugesan S, et al. Obtaining microorganisms in cloud forest soils for the degradation of aromatic hydrocarbons. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*. 2019;25(1):95–106.

23. Quiñones-Cerna C, Castañeda-Aspajo A, Tirado-Gutierrez M, Ugarte-López W, Salirrosas-Fernández D, Rodríguez-Soto JC, et al. Efficacy of Indigenous Bacteria in the Biodegradation of Hydrocarbons Isolated from Agricultural Soils in Huamachuco, Peru. *Microorganisms*. 2024;12(9).

24. Márquez-Romance AM, Cárdenas-Izaguirre SF, Guevara-Pérez E, Pérez-Pacheco SA, Freytez-Boggio E, Maldonado-Maldonado JI, et al. An approach to remediation of a tropical aquifer contaminated with hydrocarbons. *Environmental Quality Management*. 2022;31(4):357–90.

25. Escudero-López HJ, Jácome-Pilco CR, Sanaguano-Salguero HDR, Bayas-Morejón IF, Serrano-Carrillo KA. Bacterial selection of the *Pseudomonas* genus with the capacity to treat water and contaminated soils. *Journal of Water and Land Development*. 2022;(53):238–41.
26. Ojeda-Morales ME, Álvarez-Ramírez JG, Hernández-Rivera MÁ, DomínguezDomínguez M, Zavala-Cruz J, Herrera-Haro JG, et al. Biodegradation of bioemulsified heavy oil in mangrove soil. *Mexican Journal of Biotechnology*. 2025;10(2):42–63.
27. González-Toril E, Aguilera A, Permanyer A, Gallego JR, Márquez G, Lorenzo E. Metagenomic analysis of the microbial community at the Riutort oil shale mine (NE Spain): Potential applications in bioremediation and enhanced oil recovery. *Fuel*. 2023;349.
28. Valdiviezo Gonzales LG, Castañeda-Olivera CA, Cabello-Torres RJ, García Ávila FF, Munive Cerrón RV, Alfaro Paredes EA. Scientometric study of treatment technologies of soil pollution: Present and future challenges. *Applied Soil Ecology*. 2023;182.
29. Song Y, Li R, Chen G, Yan B, Zhong L, Wang Y, et al. Bibliometric analysis of current status on bioremediation of petroleum contaminated soils during 2000–2019. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(16).
30. García VJ, Márquez CO, Cedeño AR, Montesdeoca KG. Assessing bioremediation of soils polluted with fuel oil 6 by means of diffuse reflectance spectroscopy. *Resources*. 2019;8(1).
31. Orejuela-Romero JA, Herrera Cuadrado ZV, Heredia Jara DA, Núñez Moreno MS, Santillán-Quiroga LM, Barahona M, et al. Oil Palm Bagasse as a Treatment for Soils Contaminated with Total Petroleum Hydrocarbons. *Sustainability Switzerland*. 2025;17(2).
32. Kumari B, Chandra R. Benzo[a]pyrene degradation from hydrocarboncontaminated soil and their degrading metabolites by *Stutzerimonas stutzeri* (LOBP19A). *Waste Management Bulletin*. 2023;1(3):115–27.
33. Ruseva A, Minnikova T, Kolesnikov S, Revina S, Trushkov A. Ecological State of Haplic Chernozem after Pollution by Oil at Different Levels and Remediation by Biochar. *Sustainability (Switzerland)*. 2023;15(18).
34. Du J, Jia T, Liu J, Chai B. Relationships among protozoa, bacteria and fungi in polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024;270.
35. Minnikova T, Kolesnikov S, Minin N, Gorovtsov A, Vasilchenko N, Chistyakov V. The Influence of Remediation with *Bacillus* and *Paenibacillus* Strains and Biochar on the Biological Activity of Petroleum-Hydrocarbon-Contaminated Haplic Chernozem. *Agriculture (Switzerland)*. 2023;13(3).
36. Cheffi M, Hentati D, Chebbi A, Mhiri N, Sayadi S, Marqués AM, et al. Isolation and characterization of a newly naphthalene-degrading *Halomonas pacifica*, strain Cnaph3: biodegradation and biosurfactant production studies. *3 Biotech*. 2020;10(3).
37. El-Housseiny GS, Aboshanab KM, Aboulwafa MM, Hassouna NA. Structural and Physicochemical Characterization of Rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* P6. *AMB Express*. 2020;10(1).
38. Castillo-Campos E, Mugica-Álvarez V, Roldán-Carillo TG, Olguín-Lora P, Castorena-Cortés GT. Modification of wettability and reduction of interfacial tension mechanisms involved in the release and enhanced biodegradation of heavy oil by a biosurfactant. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*. 2021;20(3).
39. Orellana R, Cumsille A, Rojas C, Stuardo C, Cabrera P, Arancibia G, et al. Economic Evaluation of Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Urban Soils in Chile. *Sustainability Switzerland*. 2022;14(19).
40. Domínguez-Rodríguez VI, Hernández-Acosta L, Gómez-Cruz R, Rosique-Gil JE, Adams RH, Guzmán-Osorio FJ. Recovery of Petroleum BrineContaminated Soil by *Eleocharis* sp. in a Tropical Marshland. *Tropical Life Sciences Research*. 2024;35(2):141–65.
41. Vergnano A, Raffa CM, Godio A, Chiampo F. Speciation of the Removed Pollutants in Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024;14(21).