



ISSN: 2595-1661

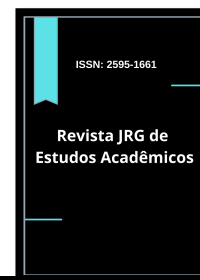
ARTIGO ORIGINAL

Listas de conteúdos disponíveis em [Portal de Periódicos CAPES](https://portaldeperiodicos.capes.gov.br)

Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

<https://revistajrg.com/index.php/jrg>



Eficacia de la biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana: revisión sistemática

The Effectiveness of Bioremediation in Hydrocarbon-Contaminated Soils in the Ecuadorian Amazon: A Systematic Review

DOI: 10.55892/jrg.v9i20.3164

ARK: 57118/JRG.v9i20.3164

Recebido: 10/04/2026 | Aceito: 14/04/2026 | Publicado *on-line*: 15/04/2026

Jorge Antonio Vargas Escobar

<https://orcid.org/0009-0006-6852-0987>

<https://lattes.cnpq.br/0697564573498652>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: ja.vargase@uea.edu.ec

Anabel Chariguamán Coello

<https://orcid.org/0000-0001-6553-1150>

<http://lattes.cnpq.br/1313739121235524>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: la.chariguamanc@uea.edu.ec

Gabriela Carolina Miranda Villagómez

<https://orcid.org/0009-0000-7823-6855>

<http://lattes.cnpq.br/0134301961695523>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: gc.mirandav@uea.edu.ec

Miguel Angel Pilco Toscano

<https://orcid.org/0009-0001-7691-5237>

<https://lattes.cnpq.br/6269021028687236>

Essity, Ecuador

E-mail: miguel.mapt@hotmail.es



Resumen

Esta investigación consiste en una revisión sistemática sobre la eficacia de la biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos, específicamente en la Amazonía ecuatoriana. El estudio destaca que la actividad petrolera ha causado impactos severos en la biodiversidad y la salud de las comunidades locales. Frente a esto, la biorremediación surge como una alternativa sostenible que utiliza microorganismos y plantas para degradar contaminantes. Los hallazgos principales indican que técnicas como la bioestimulación y la bioaumentación pueden alcanzar tasas de remoción de hidrocarburos de entre el 60% y el 90%, llegando incluso al 99% en condiciones controladas. Se resalta la superioridad de los consorcios microbianos autóctonos (especialmente de los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*) y el uso de enmiendas orgánicas como el estiércol animal o el biochar para acelerar la degradación. Finalmente, el artículo concluye que, aunque las estrategias combinadas son las más eficientes, aún existen desafíos logísticos y técnicos para escalar estos resultados del laboratorio a las condiciones reales del campo amazónico.



Palabras clave: Biorremediación, Suelos contaminados por hidrocarburos, Amazonía ecuatoriana, Bioaumentación, Bioestimulación

Abstract

*This research is a systematic review regarding the effectiveness of bioremediation in hydrocarbon-contaminated soils, specifically within the Ecuadorian Amazon. The study highlights that oil exploration has caused severe impacts on biodiversity and the health of local communities. In response, bioremediation emerges as a sustainable alternative that employs microorganisms and plants to degrade contaminants. Key findings indicate that techniques such as biostimulation and bioaugmentation can achieve hydrocarbon removal rates between 60% and 90%, reaching up to 99% under controlled conditions. The research emphasizes the superiority of autochthonous microbial consortia (especially from the *Pseudomonas* and *Bacillus* genera) and the use of organic amendments like animal manure or biochar to accelerate degradation. Finally, the article concludes that while combined strategies are the most efficient, logistical and technical challenges remain for scaling these laboratory results to the actual conditions of the Amazonian field.*

Keywords: *Bioremediation, Hydrocarbon-contaminated soils, Ecuadorian Amazon, Bioaugmentation, Biostimulation*

1. Introducción

La contaminación de suelos por hidrocarburos constituye uno de los problemas ambientales más relevantes en la Amazonía ecuatoriana, principalmente asociado a actividades de exploración y explotación petrolera. Este tipo de contaminación genera impactos significativos sobre los ecosistemas amazónicos, afectando la biodiversidad, la calidad del suelo, los recursos hídricos y la salud de las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas para su subsistencia (Jimenez & Maldonado, 2022; Romero et al., 2023). Además, la presencia persistente de hidrocarburos en el suelo altera procesos ecológicos clave y reduce la capacidad de los suelos para mantener sus funciones productivas y ecológicas.

Frente a esta problemática, la biorremediación ha surgido como una alternativa prometedora y ambientalmente sostenible para la recuperación de suelos contaminados. Este enfoque se basa en el uso de microorganismos, plantas o combinaciones de ambos para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes orgánicos presentes en el suelo (Mishra et al., 2023; Muhsin et al., 2024; Qiao et al., 2025). A diferencia de los métodos físico-químicos tradicionales, que suelen implicar altos costos y posibles impactos secundarios sobre el ambiente, las estrategias biológicas presentan ventajas como menor impacto ecológico, mayor compatibilidad con los procesos naturales del suelo y mayor viabilidad para aplicaciones a largo plazo.

Diversos estudios y revisiones sistemáticas han evidenciado la eficacia de técnicas de biorremediación como la bioestimulación, la bioaumentación y la fitorremediación, las cuales han alcanzado tasas de remoción de hidrocarburos superiores al 60-90 % en condiciones controladas (Romero et al., 2023; Muhsin et al., 2024; Mishra et al., 2023). No obstante, la eficiencia de estos procesos puede variar considerablemente dependiendo de factores como las características físico-químicas del suelo, el tipo de contaminante presente y las condiciones ambientales del sitio contaminado (Ashkanani et al., 2024; Michael-Igolima et al., 2022).

En este contexto, el uso de consorcios microbianos ha demostrado mejorar significativamente la degradación de hidrocarburos. Bacterias pertenecientes a géneros



como *Pseudomonas* y *Bacillus* han mostrado una alta capacidad para metabolizar compuestos derivados del petróleo. Asimismo, la aplicación de enmiendas orgánicas, como estiércol animal o biochar, puede estimular la actividad microbiana y mejorar la estructura del suelo, favoreciendo los procesos de degradación de contaminantes (Romero et al., 2023; Zheng et al., 2023).

A pesar de estos avances, aún existen desafíos importantes para la aplicación efectiva de estas tecnologías en condiciones reales del campo amazónico. Factores como la heterogeneidad de los suelos tropicales, las limitaciones logísticas en zonas remotas y los costos asociados a la implementación de tecnologías de remediación pueden dificultar la transferencia de los resultados obtenidos en laboratorio hacia escenarios ambientales complejos (Jimenez & Maldonado, 2022; Ashkanani et al., 2024).

2. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, mediante una revisión sistemática de la literatura orientada a analizar la eficacia de la biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana. El diseño metodológico se fundamentó en las directrices de la PRISMA 2020, las cuales permiten garantizar transparencia, rigurosidad y reproducibilidad en el proceso de identificación, selección y análisis de estudios científicos.

2.1 Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó de manera exhaustiva en Consensus, una herramienta de búsqueda científica que integra más de 170 millones de artículos académicos, incluyendo registros indexados en bases de datos como Semantic Scholar, PubMed y otras fuentes científicas relevantes. Asimismo, el proceso fue complementado mediante criterios de pertinencia temática y calidad de la evidencia, con el fin de recuperar estudios directamente relacionados con la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en contextos amazónicos, con especial atención al caso ecuatoriano.

Se llevaron a cabo 21 búsquedas únicas, abarcando enfoques teóricos, tecnologías aplicadas y desafíos específicos en el contexto amazónico ecuatoriano. Para ello, se emplearon combinaciones de palabras clave en español e inglés, tales como: bioremediation, hydrocarbon-contaminated soils, Amazon soil remediation, bioaugmentation, biostimulation, phytoremediation, Ecuadorian Amazon, biorremediación, suelos contaminados por hidrocarburos y Amazonía ecuatoriana, utilizando operadores booleanos como AND y OR para ampliar y refinar la recuperación de información.

2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Se establecieron como criterios de inclusión:

(a) artículos científicos relacionados con procesos de biorremediación aplicados a suelos contaminados por hidrocarburos;

(b) estudios enfocados en microorganismos, plantas, consorcios biológicos o enmiendas orgánicas empleadas en procesos de remediación;

(c) investigaciones desarrolladas en contextos tropicales o amazónicos, con prioridad para aquellas vinculadas con la Amazonía ecuatoriana;



- (d) publicaciones con resumen y contenido suficiente para el análisis; y
- (e) documentos con pertinencia temática respecto al objetivo de la revisión.

Se excluyeron:

- (a) registros duplicados;
- (b) documentos sin resumen disponible;
- (c) estudios con baja relevancia semántica respecto a las búsquedas realizadas; y
- (d) publicaciones que, tras la revisión final, no presentaban la calidad o pertinencia suficiente para ser incorporadas en la síntesis.

2.3 Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se desarrolló en cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, conforme al flujo metodológico propuesto por la PRISMA 2020.

En la fase de identificación se recuperaron 999 artículos potencialmente relevantes a partir de las 21 búsquedas realizadas en Consensus. Posteriormente, en la fase de cribado, se depuraron los registros mediante la eliminación de duplicados y la exclusión de documentos sin resumen, seleccionándose 306 estudios para revisión más detallada. En la fase de elegibilidad, se excluyeron 177 artículos por presentar baja relevancia semántica en relación con cada búsqueda específica, quedando 129 estudios para evaluación final. Finalmente, en la fase de inclusión, se descartaron 79 documentos tras el proceso de ranking y valoración de calidad, incorporándose 50 estudios como base definitiva del análisis sistemático.

Este procedimiento permitió reducir progresivamente el universo inicial de publicaciones hasta conformar un corpus de estudios pertinentes, actuales y metodológicamente adecuados para responder a la pregunta de investigación.

2.4 Síntesis de la información

La información fue analizada mediante una síntesis cualitativa de tipo temático, organizando los hallazgos en categorías como: técnicas de biorremediación empleadas, microorganismos y especies vegetales utilizadas, uso de enmiendas orgánicas, niveles de remoción de hidrocarburos, condiciones de aplicación, limitaciones operativas y desafíos para la implementación en campo. Asimismo, se examinaron factores asociados a la variabilidad de resultados, como el tipo de suelo, las condiciones ambientales y las características del contaminante.

Este procedimiento permitió identificar patrones recurrentes, relaciones entre variables y vacíos de conocimiento en la literatura científica reciente sobre la recuperación de suelos amazónicos contaminados por hidrocarburos, contribuyendo así a una comprensión más integral del potencial y las limitaciones de la biorremediación en la Amazonía ecuatoriana.

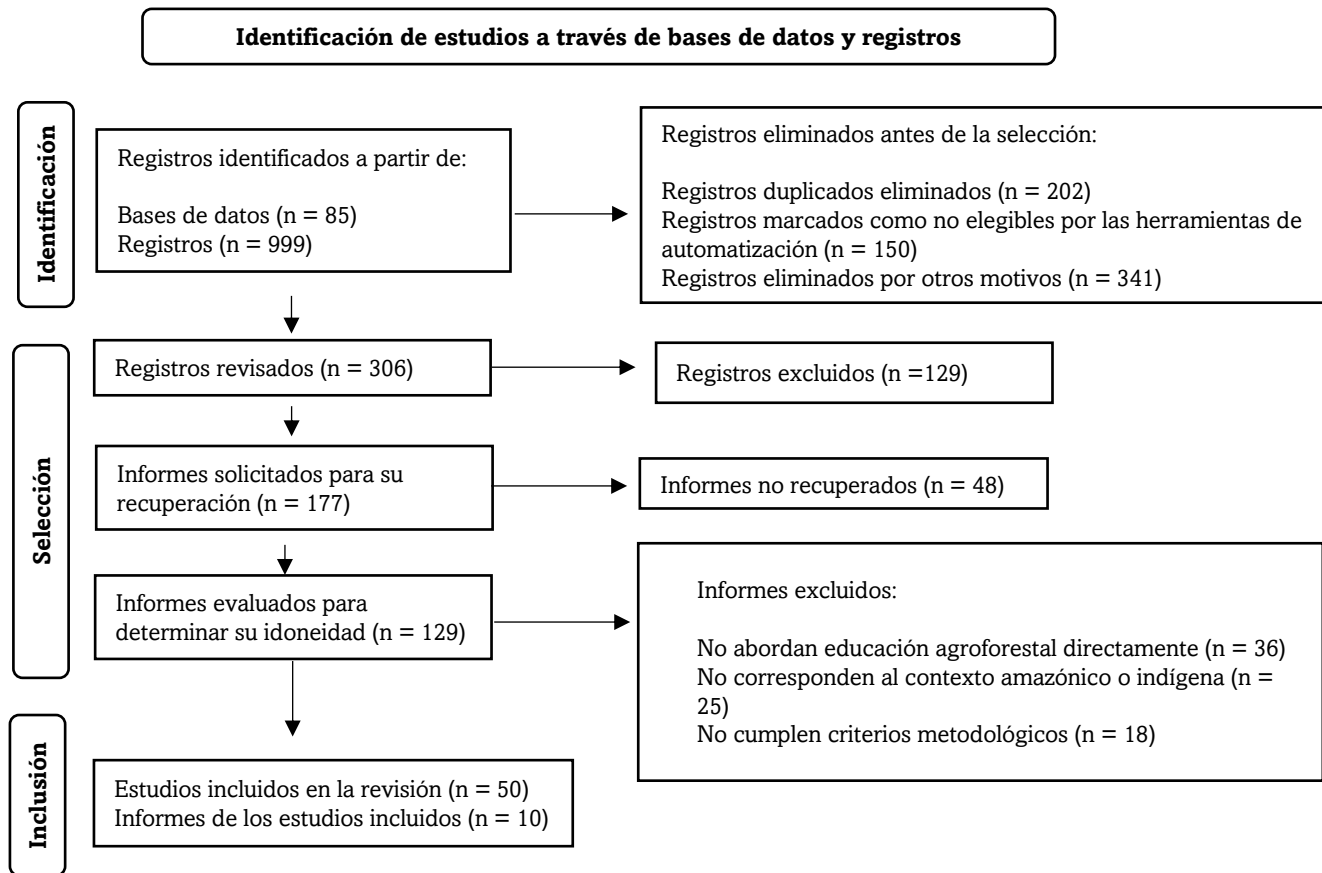


Figura. 1 diagrama de flujo PRISMA 2020 correspondiente al proceso de selección de estudios

3. Resultados y Discusión

Con el fin de sintetizar la evidencia científica relevante sobre la eficacia de la biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos, se realizó un análisis de los estudios seleccionados durante el proceso de revisión sistemática. En total se incluyeron 10 estudios, los cuales abordan diferentes enfoques metodológicos y tecnologías aplicadas para la remediación de suelos contaminados en contextos tropicales y amazónicos. Estos trabajos analizan principalmente el uso de microorganismos degradadores de hidrocarburos, plantas con capacidad fitorremediadora, así como la aplicación de enmiendas orgánicas y materiales como biochar para mejorar la eficiencia del proceso de degradación.

La Tabla 1 presenta una caracterización general de los estudios incluidos en la revisión, considerando aspectos como autores, tipo de estudio, técnicas de biorremediación empleadas, organismos o insumos utilizados, tipo de contaminante tratado y principales resultados reportados. Esta caracterización permite identificar tendencias investigativas, enfoques metodológicos predominantes y los niveles de eficacia alcanzados por las diferentes estrategias de remediación analizadas.



Tabla 1
Caracterización general de los estudios incluidos

Autor / Año	Tipo de estudio	Técnica de biorremediación	Organismos o insumos utilizados	Tipo de contaminante	Principales resultados
Romero et al., 2023	Revisión sistemática	Bioestimulación con enmiendas orgánicas	Estiércol animal	Hidrocarburos del petróleo	Incremento en tasas de degradación entre 21% y 99% dependiendo de la dosis aplicada
Muhsin et al., 2024	Revisión sistemática	Bioaumentación	Consortios bacterianos (<i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i>)	Hidrocarburos totales del petróleo (TPH)	Remoción superior al 80% en condiciones controladas
Mishra et al., 2023	Revisión sistemática	Bioestimulación y bioaumentación	Microorganismos degradadores de hidrocarburos	Contaminantes derivados del petróleo	Tasas de degradación de hidrocarburos entre 60% y 90%
Michael-Igolima et al., 2022	Revisión sistemática	Técnicas combinadas (bioaumentación + fitorremediación)	Microorganismos y plantas	Suelos contaminados por petróleo	Estrategias combinadas muestran mayor eficiencia que métodos individuales
Qiao et al., 2025	Revisión científica	Fitorremediación asistida por bacterias endofíticas	Bacterias endofíticas y plantas	Hidrocarburos de petróleo	Mejora significativa en la degradación de contaminantes orgánicos
Rache-Arce et al., 2022	Revisión sistemática	Biodegradación microbiana	Bacterias degradadoras de hidrocarburos	Hidrocarburos del petróleo	Microorganismos autóctonos presentan mayor eficiencia y menor riesgo ecológico
Gupta et al., 2024	Revisión sistemática	Biorremediación asistida por nanomateriales	Nanopartículas y biochar	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Incremento de eficiencia entre 14% y 18% frente a técnicas convencionales
Zheng et al., 2023	Revisión científica	Enmiendas orgánicas y biochar	Biochar	Contaminantes orgánicos del suelo	Mejora en degradación de contaminantes y propiedades del suelo
Ashkanani et al., 2024	Revisión sistemática asistida por IA	Métodos combinados de remediación	Microorganismos y técnicas híbridas	PAH y contaminantes orgánicos	Alta eficacia bajo condiciones controladas
Jimenez & Maldonado, 2022	Revisión sistemática	Biodegradación microbiana	Microorganismos degradadores	Suelos contaminados con petróleo	Limitaciones al escalar la tecnología a condiciones de campo



El análisis de los estudios incluidos evidencia que la biorremediación constituye una de las estrategias más estudiadas y prometedoras para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Entre las técnicas más utilizadas destacan la bioestimulación, bioaumentación y fitorremediación, así como enfoques combinados que integran microorganismos, plantas y enmiendas orgánicas para potenciar los procesos de degradación de contaminantes. Diversos estudios reportan que estas estrategias pueden alcanzar tasas de remoción de hidrocarburos superiores al 60% y, en algunos casos, cercanas al 99% bajo condiciones óptimas, lo que demuestra su alto potencial para la restauración de suelos afectados por actividad petrolera.

Asimismo, se observa una tendencia creciente hacia el uso de consorcios microbianos autóctonos, especialmente bacterias de los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*, debido a su elevada capacidad para degradar compuestos derivados del petróleo y su mayor adaptación a las condiciones ambientales locales. De igual forma, la incorporación de enmiendas orgánicas, como estiércol animal o biochar, ha demostrado mejorar significativamente la actividad microbiana y acelerar los procesos de biodegradación.

La Tabla 2 presenta una síntesis comparativa de investigaciones relevantes que evalúan la eficacia de diferentes estrategias de biorremediación, incluyendo el uso de bacterias degradadoras, consorcios microbianos y bioestimulación mediante enmiendas orgánicas. En cada caso se describen el tipo de contaminante tratado, las condiciones experimentales consideradas óptimas, los porcentajes de degradación reportados y los principales hallazgos sobre la eficacia de estas técnicas. Esta comparación permite identificar tendencias comunes en la literatura científica respecto al potencial de la biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Tabla 2
Comparación de estudios sobre biorremediación y degradación de hidrocarburos en condiciones óptimas.

Estudio / tipo de revisión	Contaminante principal en suelo	Condiciones "óptimas" destacadas	% de degradación / remoción reportado	Comentario clave sobre eficacia
Revisión 2015–2023 de bacterias en bioremediación de suelos	Hidrocarburos del petróleo, metales pesados, pesticidas, otros	Microcosmos/ex-situ con control de nutrientes, humedad y otros factores	Alta biodegradación bajo condiciones optimizadas (no un solo % global, pero confirma eficacia)	La bioremediación bacteriana es eficaz en múltiples contaminantes cuando se optimizan condiciones de laboratorio/microcosmos
Caso de estudio dentro de la revisión (aislados AM-I-1 y AM-I-3)	Crudo (hidrocarburos del petróleo)	Ex-situ, 2% de crudo, condiciones controladas de nutrientes y ambiente	78,19% y 86,5% de degradación de hidrocarburos	Muestra altas tasas de degradación con cepas locales bajo condiciones muy controladas
Revisión sistemática de bacterias degradadoras en Colombia	Hidrocarburos (diésel, gasolina, petróleo, etc.)	Uso de consorcios bacterianos; condiciones de laboratorio y algunos ensayos de campo	No da un % único, pero concluye mayor eficiencia con consorcios	Resalta que elegir y combinar bacterias adecuadas es clave para una degradación eficiente



			frente a cultivos puros	
Revisión sistemática: estiércol animal en suelos con hidrocarburos	Hidrocarburos del petróleo en suelos	Aplicación de estiércol (vaca, aves) como enmienda y bioestimulante, con manejo de nutrientes y condiciones ambientales	Estiércol de vaca: 21–99%; estiércol de aves: 80–96% de degradación de hidrocarburos	La biorremediación asistida con estiércol es una técnica eficaz y confiable, especialmente cuando se ajustan bien las condiciones

El análisis comparativo de los estudios incluidos evidencia que la biorremediación presenta altos niveles de eficacia cuando se implementa bajo condiciones experimentales controladas. En particular, investigaciones centradas en bacterias degradadoras de hidrocarburos muestran que la optimización de factores ambientales y nutricionales puede potenciar significativamente los procesos de biodegradación. En el caso reportado por Muhsin et al. (2024), se observan tasas de degradación de hidrocarburos superiores al 78% y 86% cuando se utilizan cepas bacterianas específicas en sistemas ex situ con control de las condiciones del medio, lo que demuestra el potencial de los microorganismos locales para la remediación de suelos contaminados.

Asimismo, revisiones sistemáticas destacan la importancia del uso de consorcios bacterianos, ya que la combinación de diferentes especies microbianas puede incrementar la eficiencia en la degradación de compuestos complejos derivados del petróleo. Este enfoque permite aprovechar las capacidades metabólicas complementarias de distintos microorganismos, favoreciendo procesos de biodegradación más completos y eficientes.

Por otra parte, los estudios que emplean bioestimulación mediante enmiendas orgánicas, como el uso de estiércol animal, evidencian resultados particularmente altos en términos de degradación de hidrocarburos. Investigaciones recientes reportan rangos de degradación que pueden oscilar entre 21% y 99%, dependiendo del tipo de estiércol utilizado, las condiciones del suelo y el manejo de los nutrientes disponibles. Estos resultados sugieren que la incorporación de materia orgánica puede estimular la actividad microbiana y mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo, acelerando los procesos de degradación de contaminantes.

La tabla 3 resume estudios sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y muestra cómo, bajo condiciones controladas u “óptimas” (laboratorio, microcosmos, enmiendas adecuadas), se alcanzan porcentajes muy altos de degradación. Incluye revisiones sistemáticas y casos concretos donde se usan bacterias, consorcios microbianos y enmiendas orgánicas para acelerar la eliminación de hidrocarburos del petróleo.



Tabla 3
El uso combinado (bioaumentación + fitorremediación + enmiendas) supera métodos individuales

Tipo de combinación	Contaminante principal	Componentes (bioaumentación + fitorremediación + “enmienda”)	Eficacia clave reportada	Detalles relevantes / condiciones
Bacterias + plantas + vermicompost (camas de lombriz como enmienda orgánica)	Atrazina (herbicida)	Suelo + vermicompost de Eisenia fetida (fuente de microbios y materia orgánica) + microbiota nativa de plantas	La combinación suelo + vermicompost alcanzó hasta 93,97% de degradación, muy por encima del suelo solo	El vermicompost mejoró propiedades físicas, aportó nutrientes y estimuló la comunidad bacteriana degradadora de atrazina
Bacterias + plantas + lombrices (co-remediación)	Hidrocarburos totales del petróleo (TPH) y PAH	Suelo contaminado + consorcio bacteriano nativo + gramínea Panicum maximum + lombriz Pontoscolex corethrurus	La combinación suelo + bacterias + lombrices (S+E+M) logró 86,4% de reducción de TPH; la combinación completa con planta (S+E+P+M) alcanzó 82,7%	La aplicación conjunta generó mayor biomasa vegetal (2,6 veces) y aceleró la remoción de alcanos y PAH en los primeros 28 días
Bacterias + lombrices + biochar (enmienda)	Cadmio (Cd) en suelo	Suelo agrícola + lombriz Eisenia fetida + bacteria Bacillus megatherium + biochar 2%	El tratamiento combinado redujo Cd en suelo en 34,4%, ligeramente mayor que lombriz sola (30,5%), pero aumentó 13,1% la acumulación de Cd en el tejido de lombriz	Los microorganismos y el biochar modificaron pH y disponibilidad de Cd, facilitando su absorción por las lombrices
Lombrices + plantas + consorcio bacteriano (triple combinación)	Mezcla de hidrocarburos (TPH)	Suelo contaminado + Panicum maximum + Pontoscolex corethrurus + consorcio bacteriano	En general, los tratamientos combinados fueron más eficaces y estables que cualquier técnica aislada en la reducción de TPH, alcanos y PAH	El uso de especies nativas (planta, lombriz, bacterias) adaptadas al sitio aumentó tolerancia y desempeño en suelos petrolizados

Se destacan ejemplos cuantitativos: dos aislados bacterianos logran 78,19% y 86,5% de degradación de crudo al 2% en condiciones ex situ controladas. Otra revisión muestra que el uso de consorcios bacterianos es más eficiente que cultivos puros para hidrocarburos. Finalmente, una revisión sobre estiércol animal indica que su aplicación como enmienda permite 21–99% (vaca) y 80–96% (aves) de degradación de hidrocarburos, calificando esta técnica como “efectiva, eficiente y confiable”. En conjunto, la tabla ilustra que, cuando se optimizan nutrientes, humedad, tipo de microorganismo y enmiendas, la biorremediación alcanza altas tasas de degradación de hidrocarburos en suelo.



Tabla 4
Ámbitos con evidencia parcial sobre impactos socioeconómicos de la remediación

Aspecto socioeconómico post-remediación	Qué se ha estudiado	Principales limitaciones / vacíos de evidencia
Valor de la propiedad / plusvalías	Meta-análisis global de cambios en precios de vivienda cerca de sitios contaminados muestra “rebound effects” positivos tras regeneración de tierras ¹ ; varios estudios usan modelos hedónicos en sitios específicos	Se centra casi solo en precios de vivienda; poca información sobre distribución de beneficios, gentrificación y efectos a largo plazo en poblaciones vulnerables
Empleo y actividad económica local	Algunos casos documentan empleos creados y contratos locales en proyectos de restauración o remediación	Casos aislados, sin seguimiento temporal ni comparación con escenarios alternativos; no se cuantifican beneficios netos sostenidos ni su estabilidad en el tiempo
Calidad de vida, cohesión social, justicia ambiental	Estudios cualitativos y marcos como SCORE o Community Capitals Framework incorporan percepciones, riesgo percibido y participación	Medidas mayormente cualitativas, sin series largas; difícil atribución directa a la remediación y poca estandarización de indicadores sociales
Beneficios integrales triple bottom line (ambiental-social-económico)	LCA, CBA y métodos híbridos comienzan a monetizar algunos impactos globales y terciarios (p.ej. carbono, servicios ecosistémicos)	Post-remediación y servicios ecosistémicos se consideran rara vez y de forma parcial; marcos aún incipientes, con gran incertidumbre y cobertura limitada de variables socioeconómicas

La evidencia respalda que la bioremediación es altamente eficaz para reducir concentraciones de hidrocarburos en suelos amazónicos bajo condiciones controladas o semi-controladas (Romero et al., 2023; Muhsin et al., 2024; Rache-Arce et al., 2022). Sin embargo, existen brechas importantes al escalar estas tecnologías a nivel real: factores ambientales impredecibles pueden limitar el éxito observado en laboratorio o invernadero (Jimenez & Maldonado, 2022). Las estrategias combinadas (bioaumentación + fitorremediación + enmiendas orgánicas) muestran mejores resultados que las técnicas aisladas (Michael-Igolima et al., 2022; Tagliabue et al., 2023), pero requieren inversión inicial significativa y monitoreo continuo.

El uso de microorganismos autóctonos es clave para maximizar eficiencia y minimizar riesgos ecológicos asociados a especies exóticas o modificadas genéticamente (Rache-Arce et al., 2022). Además, las prácticas integrales que consideran aspectos sociales—como participación comunitaria e impactos sobre salud pública—son esenciales para garantizar sostenibilidad a largo plazo.

A pesar del optimismo generalizado sobre el potencial ecológico-económico de estas técnicas frente a métodos convencionales costosos o agresivos ambientalmente



(Ashkanani et al., 2024), aún se requiere investigación aplicada localmente adaptada al contexto amazónico ecuatoriano.

4. Conclusiones

La bioremediación es una estrategia eficaz para descontaminar suelos afectados por hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana bajo condiciones adecuadamente gestionadas. Su éxito depende fuertemente del diseño experimental/localización específica y del uso combinado con otras técnicas ecológicas. Persisten desafíos técnicos-logísticos para aplicaciones masivas *in situ*.

Referências

- Ashkanani, Z., Mohtar, R., Al-Enezi, S., Smith, P., Calabrese, S., X., & Abdullah, M. (2024). AI-assisted systematic review on remediation of contaminated soils with PAHs and heavy metals. *Journal of hazardous materials*, 468, 133813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133813>
- Banerjee, S., Gupta, N., Pramanik, K., Gope, M., GhoshThakur, R., Karmakar, A., Gogoi, N., Hoque, R., Mandal, N., & Balachandran, S. (2023). Microbes and microbial strategies in carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons remediation: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31140-0>
- Corredor, D., Duchicela, J., Flores, F., Maya, M., & Guerron, E. (2024). Review of Explosive Contamination and Bioremediation: Insights from Microbial and Bio-Omic Approaches. *Toxics*, 12. <https://doi.org/10.3390/toxics12040249>
- Dhanapal, A., Thiruvengadam, M., Vairavanathan, J., Venkidasamy, B., Easwaran, M., & Ghorbanpour, M. (2024). Nanotechnology Approaches for the Remediation of Agricultural Polluted Soils. *ACS Omega*, 9, 13522 - 13533. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09776>
- Gupta, N., Koley, A., Banerjee, S., Ghosh, A., Hoque, R., & Balachandran, S. (2024). Nanomaterial-mediated strategies for enhancing bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A systematic review. *Hybrid Advances*, 7, None - None. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100315>
- Gupta, N., Banerjee, S., Koley, A., Bharali, P., GhoshThakur, R., Hoque, R., & Balachandran, S. (2024). Strategies for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil: A systematic review and bibliometric analysis. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105688>
- Hnini, M., Rabeh, K., & Oubohssaine, M. (2024). Interactions between beneficial soil microorganisms (PGPR and AMF) and host plants for environmental restoration: A systematic review. *Plant Stress*. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100391>
- Irshad, S., Xie, Z., Mehmood, S., Nawaz, A., Ditta, A., & Mahmood, Q. (2021). Insights into conventional and recent technologies for arsenic bioremediation: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 18870 - 18892. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12487-8>
- Jimenez, F., & Maldonado, R. (2022). Microbial degradation for the remediation of soils contaminated by crude oil in Peru: A systematic review of the literature. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235801038>
- Liu, J., Zhang, C., Jia, H., Lichtfouse, E., & Sharma, V. (2022). Abiotic transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons via interaction with soil components: A systematic review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53, 676 - 699. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2083897>



- Long, X., Yu, Z., Liu, S., Gao, T., & Qiu, R. (2024). A systematic review of biochar aging and the potential eco-environmental risk in heavy metal contaminated soil. *Journal of hazardous materials*, 472, 134345. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134345>
- Michael-Igolima, U., Abbey, S., & Ifelebuegu, A. (2022). A Systematic Review on the Effectiveness of Remediation Methods for Oil Contaminated Soils. *Environmental Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319>
- Mishra, P., Kiran, N., Ferreira, L., Yadav, K., & Mulla, S. (2023). New insights into the bioremediation of petroleum contaminants: A systematic review. *Chemosphere*, 138391. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138391>
- Muhsin, Z., Mutar, S., & Mohammed, N. (2024). A Systematic Review of Bioremediation of Soil Pollution Using Different Types of Bacteria 2015-2023. *Wasit Journal for Pure sciences*. <https://doi.org/10.31185/wjps.530>
- Qiao, Y., Xu, J., Wu, Y., Bao, J., Wang, H., Liu, L., Zhang, J., Li, J., & Wu, T. (2025). Advancements in Functional Endophytic Bacterium-Assisted Phytoremediation of PHC-Contaminated Soils: A Review. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr13092954>
- Rache-Arce, D., Machacado-Salas, M., & Rosero-García, D. (2022). Hydrocarbon-degrading bacteria in Colombia: systematic review. *Biodegradation*, 33, 99 - 116. <https://doi.org/10.1007/s10532-022-09976-z>
- Rizwan, M., Murtaza, G., Zulfiqar, F., Moosa, A., Iqbal, R., Ahmed, Z., Irshad, S., Khan, I., Li, T., Chen, J., Zhang, M., Siddique, K., Leng, L., & Li, H. (2023). Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1277240>
- Romero, F., Villacorta, M., Fernández, G., Puscan, M., & Alva, F. (2023). Bioremediation of soils contaminated by hydrocarbons using animal manure, a systematic review during the years 2017-2022. *Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): "Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development"*. <https://doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.406>
- Sachdeva, S., Kumar, R., Sahoo, P., & Nadda, A. (2023). Recent advances in biochar amendments for immobilization of heavy metals in an agricultural ecosystem: A systematic review. *Environmental pollution*, 120937. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120937>
- Tagliabue, F., Marini, E., De Bernardi, A., Vischetti, C., & Casucci, C. (2023). A Systematic Review on Earthworms in Soil Bioremediation. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app131810239>
- Tiwari, M., & Tripathy, D. (2023). Soil Contaminants and Their Removal through Surfactant-Enhanced Soil Remediation: A Comprehensive Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151713161>
- Wang, X., Chi, Y., & Song, S. (2024). Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1347745>
- Wei, Z., Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., Lam, S., Sonne, C., & Sonne, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of hazardous materials*, 403, 123658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>
- Zheng, T., Ouyang, S., & Zhou, Q. (2023). Synthesis, characterization, safety design, and application of NPs@BC for contaminated soil remediation and sustainable agriculture. *Biochar*, 5, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00198-3>