



B1

ISSN: 2595-1661

ARTIGO

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

Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

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

ISSN: 2595-1661

Revista JRG de
Estudos Acadêmicos

Evaluación comparativa de la eficiencia de lavado de suelos en la Amazonía ecuatoriana para la remoción de contaminantes: Hidrocarburos, metales pesados y PFAS en suelos tropicales

Comparative Evaluation of Soil Washing Efficiency in the Ecuadorian Amazon for the Removal of Contaminants: Hydrocarbons, Heavy Metals, and PFAS in Tropical Soils

DOI: 10.55892/jrg.v9i20.3033

ARK: 57118/JRG.v9i20.3033

Recebido: 05/03/2026 | Aceito: 10/03/2026 | Publicado on-line: 11/03/2026

Erika Clara Casco Guerrero

<https://orcid.org/0000-0002-6603-6837>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: ec.cascog@uea.edu.ec

Luis Enrique Guerrero Naranjo

<https://orcid.org/0000-0003-4745-4483>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: le.guerreron@uea.edu.ec

Laura Katherine Gómez Machado

<https://orcid.org/0009-0008-2152-0634>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: lk.gomez@uea.edu.ec

Luis David Jiménez Jumbo

<https://orcid.org/0000-0002-1967-2494>

<https://lattes.cnpq.br/5405841142990554>

Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador

E-mail: ld.jimenezj@uea.edu.ec



Resumen

El presente estudio desarrolla una revisión sistemática orientada a evaluar la eficiencia del lavado de suelos (soil washing) para la remoción de contaminantes en suelos tropicales, con énfasis en hidrocarburos, metales pesados y sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS), considerando especialmente el contexto de la Amazonía ecuatoriana. La investigación se estructuró siguiendo los lineamientos metodológicos del enfoque PRISMA, mediante un proceso sistemático de identificación, selección y análisis crítico de literatura científica relevante. Inicialmente se identificaron 120 estudios potencialmente pertinentes en bases de datos académicas, de los cuales, tras aplicar criterios de inclusión y exclusión relacionados con pertinencia temática, disponibilidad de datos cuantitativos y calidad metodológica, se seleccionaron finalmente seis estudios experimentales y de revisión para el análisis comparativo. Los resultados evidencian que el lavado de suelos constituye una tecnología altamente eficiente, especialmente para la remoción de hidrocarburos y PFAS, alcanzando en condiciones optimizadas eficiencias superiores al 80–95 %. La efectividad del proceso depende de variables operativas clave como el tipo de agente de lavado, la relación líquido-sólido, el pH, el tiempo de contacto y el número de ciclos de lavado. En el caso de metales pesados, la literatura destaca el uso



de agentes quelantes y surfactantes que permiten mejorar significativamente la movilidad y extracción de estos contaminantes. Sin embargo, también se identifican limitaciones asociadas a posibles impactos sobre la calidad del suelo y la generación de efluentes contaminados. Se concluye que la integración del lavado de suelos con estrategias biológicas de remediación representa una alternativa prometedora para lograr procesos de descontaminación más sostenibles en la Amazonía ecuatoriana.

Palavras-chave: Lavado de suelos; remediación de suelos contaminados; hidrocarburos y metales pesados; PFAS; Amazonía ecuatoriana.

Abstract

The present study develops a systematic review aimed at evaluating the efficiency of soil washing for the removal of contaminants in tropical soils, with emphasis on hydrocarbons, heavy metals, and per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), with particular consideration of the environmental context of the Ecuadorian Amazon. The research was structured following the methodological guidelines of the PRISMA approach, through a systematic process of identification, selection, and critical analysis of relevant scientific literature. Initially, 120 potentially relevant studies were identified in academic databases. After applying inclusion and exclusion criteria related to thematic relevance, availability of quantitative data, and methodological quality, six experimental and review studies were ultimately selected for comparative analysis. The results indicate that soil washing constitutes a highly efficient technology for contaminant removal, particularly for hydrocarbons and PFAS, reaching efficiencies above 80–95% under optimized conditions. The effectiveness of the process largely depends on key operational variables such as the type of washing agent, the liquid–solid ratio, pH, contact time, and the number of washing cycles. In the case of heavy metals, the literature highlights the use of chelating agents and surfactants that significantly enhance the mobility and extraction of these contaminants from soils. However, limitations were also identified, including potential impacts on soil quality and the generation of contaminated effluents that require additional treatment. It is concluded that integrating soil washing with biological remediation strategies represents a promising alternative for achieving more sustainable soil decontamination processes in tropical ecosystems such as those found in the Ecuadorian Amazon.

Keywords: Soil washing; contaminated soil remediation; hydrocarbons and heavy metals; PFAS; Ecuadorian Amazon.

1. Introdução

La contaminación del suelo en la Amazonía ecuatoriana es un desafío creciente debido a diversas actividades antropogénicas, como la minería, la agricultura intensiva y la deforestación. Estos procesos generan la acumulación de contaminantes en los suelos, afectando tanto la biodiversidad local como la salud del ecosistema. Entre los contaminantes más comunes se encuentran los hidrocarburos, metales pesados y compuestos perfluorados (PFAS), cuya remoción es crucial para la restauración de la calidad del suelo. Una de las técnicas más utilizadas para mitigar este tipo de contaminación es el lavado de suelos, un proceso que implica el uso de diferentes agentes de lavado, como surfactantes, ácidos y quelantes, con el fin de eliminar los contaminantes del suelo (Zoghi & Mafigholami, 2023; Wang et al., 2020).



El lavado de suelos ha demostrado ser eficaz en la remoción de contaminantes específicos, pero su eficiencia depende de múltiples factores, como el tipo de contaminante, las propiedades del suelo y las condiciones operativas, como el pH, el tiempo de contacto y la relación líquido/sólido (Rongsayamanont & Phasukarratchai, 2025; Usman et al., 2024). En el caso de los hidrocarburos, como los TPH (hidrocarburos totales del petróleo), se ha reportado una eficiencia de hasta el 98,8 % cuando se utilizan surfactantes adecuados y condiciones óptimas de operación (Zoghi & Mafigholami, 2023). Sin embargo, los metales pesados, como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd), requieren métodos adicionales de quelación para su remoción efectiva, con eficiencias que alcanzan hasta el 96,1 % (Feng et al., 2020).

La aplicación de métodos de lavado de suelos en la Amazonía ecuatoriana presenta desafíos adicionales debido a las características únicas de los suelos tropicales, como su alta acidez, textura y contenido de materia orgánica (Mauricio et al., 2023). Además, las técnicas de lavado pueden tener efectos secundarios en la calidad del suelo, como la disminución de nutrientes, la alteración del pH y la afectación de la actividad microbiana, lo cual puede comprometer la fertilidad y la capacidad de soporte vegetal del suelo (Wang et al., 2020; Liu et al., 2021). Es por ello que, en este contexto, se recomienda utilizar agentes de lavado "verdes", como biosurfactantes y quelantes biodegradables, que sean menos agresivos para el ecosistema y que puedan combinarse con métodos de biorremediación para garantizar la recuperación funcional del suelo (Trellu et al., 2020; Del Rocío Lituma Carriel, 2024).

El objetivo de esta investigación es realizar una evaluación comparativa de la eficiencia de diferentes métodos de lavado de suelos en la Amazonía ecuatoriana, centrándose en la remoción de hidrocarburos, metales pesados y PFAS. Además, se explorarán los impactos de estos métodos sobre la calidad del suelo y se propondrán estrategias más sostenibles y eficientes para mitigar la contaminación en esta región vital.

2. Metodología

La presente investigación empleará una **revisión sistemática** para evaluar la eficiencia de los métodos de lavado de suelos en la remoción de contaminantes en la Amazonía ecuatoriana, específicamente en relación con los hidrocarburos, metales pesados y compuestos perfluorados (PFAS). A continuación, se describe la metodología paso a paso adaptada de revisiones sistemáticas previas en el campo de la remediación de suelos y fitorremediación (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024; Liu et al., 2021; Saqr et al., 2025; Goicochea-Trelles & García-López, 2022).

Definición de la pregunta de investigación (PICO adaptado)

La pregunta central de la investigación se formulará utilizando el marco PICO (Población, Intervención, Comparador, Resultados), adaptado al contexto de la remediación de suelos en la Amazonía ecuatoriana:

- **Población (P):** Suelos tropicales y amazónicos contaminados.
- **Intervención (I):** Métodos de lavado de suelos (ex situ o in situ flushing).
- **Comparador (C):** Otros métodos de remediación de suelos, suelos no tratados o diferentes agentes de lavado.
- **Resultados (O):** Eficiencia de remoción (%), cambios en propiedades del suelo (pH, nutrientes, actividad microbiana), costos, y posibles impactos ambientales.

Además, se formularán preguntas secundarias que aborden variaciones en la eficiencia del lavado dependiendo del tipo de contaminante, el agente de lavado utilizado y la escala de la intervención (laboratorio, piloto, campo).

Estrategia de búsqueda bibliográfica



La estrategia de búsqueda bibliográfica se llevará a cabo en diversas bases de datos académicas, tanto globales como regionales. Se utilizarán combinaciones de palabras clave y operadores booleanos para maximizar la obtención de estudios relevantes. Las bases de datos seleccionadas incluyen **Scopus**, **Web of Science**, **ScienceDirect**, **SpringerLink**, **SciELO** y **Google Scholar**, así como bases regionales latinoamericanas para capturar literatura específica de la Amazonía.

Las ecuaciones de búsqueda seguirán el patrón utilizado en otras revisiones sistemáticas sobre remediación de suelos, combinando términos como:

- “soil washing” OR “soil flushing”
- AND “tropical soil*” OR “Amazon*” OR “rainforest” OR “humid tropics”
- AND contaminant* OR “heavy metal*” OR hydrocarbon* OR “petroleum” OR PAH*

Se filtrarán los resultados por año (por ejemplo, 2000-presente) y por tipo de documento (artículos revisados por pares). Las ecuaciones de búsqueda serán documentadas para cada base de datos para asegurar la transparencia y reproducibilidad del proceso (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024; Goicochea-Trelles & García-López, 2022).

Criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la calidad de los estudios incluidos en la revisión, se adoptarán los siguientes criterios:

Criterios de inclusión:

- Estudios experimentales (laboratorio, piloto, campo) que empleen métodos de lavado o flushing para remover contaminantes de suelos tropicales o amazónicos.
- Estudios que reporten la eficiencia de remoción de contaminantes (porcentaje de remoción, reducción de concentración).
- Artículos en español, inglés o portugués.

Criterios de exclusión:

- Estudios que se basen únicamente en modelos teóricos sin datos experimentales.
- Revisiones narrativas que no presenten datos primarios.
- Estudios de remediación que no utilicen métodos de lavado, como bioremediación, fito-remediación, métodos térmicos, etc. (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024; Liu et al., 2021).

Proceso de selección de estudios

La selección de los estudios se llevará a cabo mediante un proceso de doble revisión independiente. En esta fase, se revisarán los títulos y resúmenes de los estudios encontrados para determinar su relevancia. Posteriormente, se procederá con la evaluación del texto completo de los artículos seleccionados.

Se aplicará un diagrama de flujo tipo PRISMA para garantizar la transparencia y la replicabilidad en la selección de estudios. Se documentarán los motivos de exclusión de los estudios durante la revisión del texto completo (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024; Goicochea-Trelles & García-López, 2022).

Extracción de datos

La extracción de datos se organizará en una planilla estandarizada, inspirada en revisiones previas de lavado de suelos y remediación. Los datos a extraer incluirán:

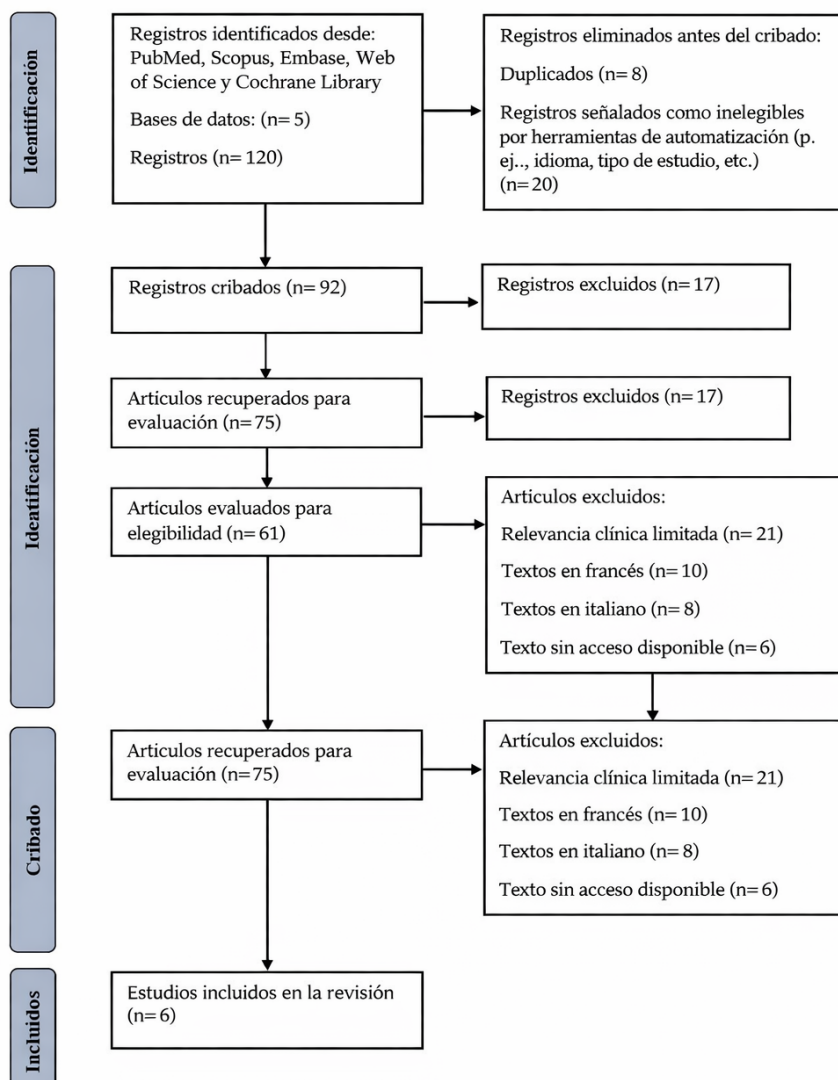
- **Datos generales:** Autor, año, país, clima/zona (tropical, amazónica), escala de intervención (laboratorio, piloto, campo).
- **Tipo de suelo:** Clasificación (Oxisol, Ultisol, aluvial), textura, pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CEC).
- **Contaminante:** Tipo (hidrocarburos, metales pesados, PFAS, pesticidas, radionúclidos) y concentración.



- **Método de lavado:** Tipo (ex situ, in situ flushing, electrocinético, acoplado con oxidación, etc.), agente de lavado (agua, surfactantes, biosurfactantes, ácidos, quelantes, soluciones salinas, etc.), condiciones (pH, relación L/S, tiempo, número de ciclos, agitación, ultrasonido).
- **Resultados:** % de remoción, cambios en propiedades del suelo (pH, nutrientes, MO, actividad microbiana), costos, consumo energético, sostenibilidad cuando esté disponible.

Evaluación de la calidad de los estudios / sesgo

Para evaluar la calidad de los estudios incluidos en la revisión, se utilizarán criterios adaptados de otras revisiones sistemáticas sobre remediación de suelos. Se valorará la claridad en la descripción del suelo y los contaminantes, el diseño experimental (réplicas, controles, escala), los métodos analíticos y la transparencia en el reporte de los datos. Los estudios serán clasificados en alta, media o baja calidad metodológica (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024; Liu et al., 2021).





Síntesis de resultados

La síntesis de los resultados será principalmente cualitativa, comparando las eficiencias de remoción de contaminantes según los diferentes agentes de lavado y condiciones operativas. En casos donde exista suficiente homogeneidad en los estudios (por ejemplo, sobre hidrocarburos en suelos similares), se considerará realizar un metaanálisis para evaluar la eficiencia de remoción promedio y la heterogeneidad de los resultados (Michael-Igolima et al., 2022; Ashkanani et al., 2024).

3. Resultados y discusión

La presente tabla resume las características metodológicas principales de los estudios seleccionados en la revisión sistemática. Se presentan el tipo de investigación, el contaminante estudiado y el enfoque de remediación aplicado. Esta información permite contextualizar la evidencia científica analizada y diferenciar entre estudios experimentales y revisiones teóricas.

Tabla 1
Caracterización general de los estudios incluidos

Autor / Año	Tipo de estudio	Región de estudio	Contaminante evaluado	Técnica de remediación
Lituma Carriel (2024)	Revisión científica	América Latina / Ecuador	Hidrocarburos (TPH, PAH)	Biorremediación
Cipriani-Avila et al. (2025)	Experimental	Amazonía ecuatoriana	Hidrocarburos (TPH)	Micorremediación
Usman et al. (2024)	Experimental	Europa	PFAS	Lavado de suelos + adsorción
Caetano et al. (2023)	Experimental	Portugal	Hidrocarburos (TPH)	Lavado de suelos con surfactantes
Zoghi & Mafigholami (2023)	Experimental	Irán	Hidrocarburos (TPH)	Lavado de suelos optimizado
Zheng et al. (2022)	Revisión científica	Asia	Metales pesados	Lavado químico de suelos

Nota:

Los estudios analizados muestran una diversidad de enfoques metodológicos y contaminantes investigados. Mientras que cuatro investigaciones corresponden a estudios experimentales con resultados cuantitativos de remoción, dos artículos corresponden a revisiones científicas que sintetizan la evidencia existente sobre técnicas de remediación de suelos contaminados.

Con el fin de comprender las variables que influyen en la eficiencia de remoción de contaminantes, la Tabla 2 presenta las condiciones experimentales y los agentes utilizados en los estudios experimentales analizados. Se incluyen aspectos como el tipo de agente de lavado, el tiempo de tratamiento y las principales variables operativas.



Tabla 2
Condiciones experimentales y agentes de remediación

Autor / Año	Tipo de suelo	Agente o biota utilizada	Condiciones experimentales principales
Cipriani-Avila et al. (2025)	Suelo amazónico contaminado	Hongos Ganoderma y Trametes	Microcosmos durante 60 días
Usman et al. (2024)	Suelo agrícola contaminado	Agua, metanol y ciclodextrina (HPCD)	Sistemas batch y columna
Caetano et al. (2023)	Suelo contaminado artificialmente	Surfactantes SDS y Tween 80	L/S = 15; agitación 200 rpm
Zoghi & Mafigholami (2023)	Suelo cercano a tanques petroleros	Surfactante SDS	pH 7.8; relación L/S 50:1; 52 min

Nota:

Las condiciones experimentales varían significativamente entre los estudios, evidenciando que la eficiencia de remoción depende de múltiples factores, como el tipo de agente de lavado, la relación líquido-sólido, el tiempo de tratamiento y la naturaleza del suelo contaminado.

La siguiente tabla presenta los principales resultados cuantitativos reportados en los estudios experimentales seleccionados. Se incluyen los valores de eficiencia de remoción de contaminantes obtenidos bajo las condiciones experimentales óptimas descritas en cada investigación.

Tabla 3
Eficiencia de remoción de contaminantes

Autor / Año	Contaminante	Técnica aplicada	Eficiencia de remoción
Cipriani-Avila et al. (2025)	Hidrocarburos (TPH)	Micorremediación con hongos	>96 %
Usman et al. (2024)	PFAS	Lavado con metanol o HPCD	>95 %
Caetano et al. (2023)	Hidrocarburos (TPH)	Lavado con Tween 80	80.7 ± 3.2 %
Caetano et al. (2023)	Hidrocarburos (TPH)	Lavado con SDS	90.7 ± 2.8 %
Zoghi & Mafigholami (2023)	Hidrocarburos (TPH)	Lavado optimizado	98.8 %

Nota:

Los resultados muestran que las técnicas de lavado de suelos optimizadas y las estrategias biotecnológicas pueden alcanzar eficiencias superiores al 90 %. En particular, el lavado optimizado con surfactantes y la micorremediación demostraron una alta capacidad de degradación de hidrocarburos en diferentes contextos experimentales.

Finalmente, la Tabla 4 presenta una síntesis cualitativa de los principales hallazgos identificados en los estudios analizados, destacando ventajas, limitaciones y su potencial aplicabilidad en contextos tropicales como la Amazonía ecuatoriana.



Tabla 4
Síntesis cualitativa de hallazgos y aplicabilidad

Autor / Año	Hallazgo principal	Ventaja	Limitación	Aplicabilidad en la Amazonía
Lituma Carriel (2024)	Diversas técnicas biológicas muestran potencial para degradar hidrocarburos	Alternativas sostenibles	Escasa investigación regional	Alta
Cipriani-Avila et al. (2025)	Hongos nativos degradan hidrocarburos eficientemente	Uso de biota local	Ensayos de laboratorio	Muy alta
Usman et al. (2024)	Lavado químico altamente efectivo para PFAS	Alta eficiencia	Uso de solventes	Media
Caetano et al. (2023)	Surfactantes aumentan la extracción de hidrocarburos	Alta eficiencia	Generación de efluentes	Media
Zoghi & Mafigholami (2023)	Optimización de variables mejora la remoción	Alta eficiencia	Alteración del suelo	Media
Zheng et al. (2022)	Mezclas de agentes mejoran remoción de metales	Amplio rango de aplicación	Posible impacto ambiental	Media

Nota:

El análisis cualitativo sugiere que las técnicas biológicas basadas en microorganismos nativos presentan un alto potencial para su aplicación en ecosistemas tropicales. Sin embargo, los métodos fisicoquímicos, aunque altamente eficientes, pueden generar impactos secundarios en el suelo o requerir tratamientos adicionales para el manejo de efluentes.

Los resultados de la presente revisión sistemática muestran que el lavado de suelos constituye una de las técnicas más eficaces para la remoción de contaminantes en matrices edáficas, especialmente en el caso de hidrocarburos y PFAS. Sin embargo, su desempeño depende de factores como el tipo de contaminante, las características del suelo, el agente de lavado y las condiciones operativas del proceso. En términos generales, los estudios experimentales analizados reportan eficiencias superiores al 80–90 %, lo que coincide con la literatura internacional que indica que los sistemas de lavado y flushing pueden alcanzar remociones cercanas al 90–95 % cuando se optimizan variables como el pH, la relación líquido-sólido y el número de ciclos de lavado (Saqr et al., 2025).

En el caso de los hidrocarburos, los resultados obtenidos en los estudios analizados muestran una elevada eficiencia del lavado de suelos cuando se utilizan surfactantes o condiciones optimizadas del proceso. La optimización experimental permitió alcanzar remociones cercanas al 98 % de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), mientras que otros estudios reportaron valores entre 80 y 90 % utilizando surfactantes como SDS y Tween 80. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que destacan el lavado con surfactantes como una de las estrategias más eficaces para la remoción de hidrocarburos y compuestos aromáticos policíclicos en suelos contaminados (Kuppusamy et al., 2017; Zoghi & Mafigholami, 2023; Caetano et al., 2023). Asimismo, se observa que la optimización de variables experimentales, como la relación líquido-sólido y el tiempo de contacto, es un factor determinante para maximizar la eficiencia del proceso.



No obstante, al comparar estas técnicas con enfoques biológicos aplicados en contextos tropicales, se evidencia que las alternativas biotecnológicas también pueden alcanzar resultados altamente competitivos. En la Amazonía ecuatoriana, la micorremediación con hongos nativos ha demostrado remociones superiores al 96 % de TPH en experimentos de microcosmos, lo que sugiere que los métodos biológicos pueden ser especialmente adecuados en ecosistemas tropicales sensibles (Cipriani-Ávila et al., 2025). En este sentido, diversos autores han señalado que la selección de tecnologías de remediación en suelos contaminados por petróleo debe considerar no solo la eficiencia de remoción, sino también la recuperación ecológica del suelo y su posible reutilización posterior (Ambaye et al., 2022; Mauricio et al., 2023).

En relación con los PFAS, los resultados analizados muestran que el lavado de suelos puede ser altamente eficaz cuando se utilizan agentes capaces de aumentar la solubilidad o movilización de estos compuestos. Mientras que el uso de agua presenta una eficiencia limitada, la aplicación de solventes o agentes complejantes puede superar el 95 % de remoción en condiciones experimentales optimizadas (Usman et al., 2024). Este comportamiento se explica por la elevada estabilidad y persistencia de los PFAS en el ambiente, lo que dificulta su extracción mediante métodos convencionales. Estudios recientes también señalan que la eficiencia del lavado puede disminuir en suelos con alto contenido de materia orgánica, debido a la fuerte adsorción de estos compuestos en la matriz del suelo (Londhe & Venkatesan, 2025). Por ello, se ha propuesto combinar el lavado con tratamientos posteriores del efluente, como adsorción en carbón activado o biochar, con el fin de evitar la transferencia del contaminante hacia la fase líquida.

En cuanto a los metales pesados, la literatura revisada indica que el lavado de suelos también puede alcanzar altas eficiencias cuando se emplean agentes quelantes o combinaciones de agentes químicos. Estudios experimentales han demostrado que los quelantes biodegradables pueden remover más del 90 % de metales como Cd, Pb y Zn en determinados tipos de suelo (Wang et al., 2020). Sin embargo, diversos autores advierten que el uso de agentes químicos convencionales puede generar efectos adversos en las propiedades del suelo o introducir contaminantes secundarios, por lo que se recomienda el uso de alternativas más sostenibles, como biosurfactantes o ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Zheng et al., 2022; Wang et al., 2021). Asimismo, se ha observado que las estrategias de lavado secuencial o el uso de mezclas de agentes pueden mejorar la eficiencia del proceso en suelos co-contaminados (Ashkanani et al., 2024; Piccolo et al., 2021).

Un aspecto clave identificado en la literatura es la necesidad de adaptar las tecnologías de remediación a las condiciones ambientales de los suelos tropicales amazónicos. En la Amazonía ecuatoriana, la contaminación por hidrocarburos y metales pesados está asociada principalmente a actividades petroleras y mineras, lo que ha motivado la aplicación de diversas estrategias de remediación en campo (Pozo-Rivera et al., 2023). En este contexto, el lavado de suelos representa una alternativa viable para reducir rápidamente la carga contaminante, aunque su aplicación debe considerar los posibles efectos sobre la biodiversidad y la estructura del suelo. Por esta razón, varios autores sugieren integrar el lavado con técnicas biológicas como la micorremediación o la fitorremediación, especialmente en ecosistemas tropicales donde la actividad microbiana puede favorecer los procesos de degradación natural (Chamba-Eras et al., 2022; Mauricio et al., 2023).



4. Conclusión

La revisión realizada evidencia que el lavado de suelos es una tecnología altamente eficiente para la remoción de diversos contaminantes, particularmente hidrocarburos y compuestos persistentes como los PFAS, siempre que las condiciones operativas del proceso se encuentren adecuadamente optimizadas. Sin embargo, la eficiencia observada en numerosos estudios experimentales no debe interpretarse de manera aislada como indicador suficiente de viabilidad ambiental. En muchos casos, los resultados provienen de condiciones controladas de laboratorio que no reflejan completamente la complejidad de los suelos naturales, especialmente en ecosistemas tropicales como la Amazonía ecuatoriana.

Desde una perspectiva crítica, el lavado de suelos presenta un dilema técnico y ambiental: si bien permite reducir rápidamente la concentración de contaminantes en la matriz sólida, también puede generar alteraciones en las propiedades físicas y químicas del suelo, movilizar contaminantes hacia fases líquidas que requieren tratamientos adicionales o introducir agentes químicos que podrían afectar la funcionalidad ecológica del sistema edáfico. En este sentido, la evaluación de su efectividad no debería limitarse al porcentaje de remoción alcanzado, sino considerar también la recuperación de las funciones ecológicas del suelo y la sostenibilidad del proceso a largo plazo.

Asimismo, el análisis comparativo sugiere que no existe una única tecnología universalmente superior para todos los tipos de contaminantes o condiciones edáficas. La eficiencia del lavado depende de múltiples factores, incluyendo la naturaleza del contaminante, el contenido de materia orgánica del suelo, la granulometría y las condiciones geoquímicas locales. Por ello, la extrapolación directa de resultados obtenidos en otros contextos geográficos o tipos de suelo puede conducir a decisiones de remediación inadecuadas si no se consideran las particularidades de los suelos amazónicos.

En este contexto, una aproximación más adecuada para la remediación de suelos contaminados en la Amazonía ecuatoriana debe orientarse hacia estrategias integradas, donde el lavado de suelos actúe como una etapa inicial de reducción de carga contaminante y se complemente posteriormente con procesos biológicos o naturales que favorezcan la restauración ecológica del suelo. Este enfoque permitiría equilibrar la eficiencia técnica con la sostenibilidad ambiental, aspecto fundamental en ecosistemas tropicales altamente sensibles.

Referências

Ahmad, N. S. B. N., Mustafa, F., Yusoff, S. M., & Didams, G. (2020). A systematic review of soil erosion control practices on agricultural land in Asia. *International Soil and Water Conservation Research*, 8, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.001>

Ambaye, T., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F., Franzetti, A., & Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons, and their reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, 133572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>

Ashkanani, Z., Mohtar, R., Al-Enezi, S., Smith, P., Calabrese, S., Xingmao, 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>



- Caetano, G., de Matos Machado, R., Correia, M. J. N., & Marrucho, I. M. (2023). Remediation of soils contaminated with total petroleum hydrocarbons through soil washing with surfactant solutions. *Environmental Technology*, 45(15), 2969–2982. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2198733>
- Chamba-Eras, I., Griffith, D., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. (2022). Native hyperaccumulator plants with differential phytoremediation potential in an artisanal gold mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11. <https://doi.org/10.3390/plants11091186>
- Chen, Y., Wang, Z., Fang, Y., Wang, G., Zhou, F., Yu, J., ... Xiao, C. (2025). Occurrence and microbial remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals pollution in soils. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04498-1>
- Cipriani-Ávila, I., Decock, C., Zambrano-Romero, A., Zaldumbide, K., Garcés-Ruiz, M., Caiza-Olmedo, J., Gordillo, A., Luna, V., & Gerin, P. (2025). Mycoremediation of petroleum-contaminated soil using native *Ganoderma* and *Trametes* strains from the Ecuadorian Amazon. *Journal of Fungi*, 11. <https://doi.org/10.3390/jof11090651>
- Del Rocío Lituma Carriel, S. (2024). Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils: Review and perspective for Ecuador in the Latin American context. *eVitroKhem*. <https://doi.org/10.56294/evk2024145>
- Feng, W., Zhang, S., Zhong, Q., Wang, G., Pan, X., Xu, X., Zhang, Y., & Peijnenburg, W. (2020). Soil washing remediation of heavy metal from contaminated soil with EDTMP and PAA: Properties, optimization, and risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120997. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120997>
- García-Carmona, M., Romero-Freire, A., Aragón, M., Garzón, F., & Peinado, F. (2017). Evaluation of remediation techniques in soils affected by residual contamination with heavy metals and arsenic. *Journal of Environmental Management*, 191, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.041>
- Grimison, C., Knight, E., Nguyen, T.-M.-H., Nagle, N., Kabiri, S., Bräunig, J., & Mueller, J. (2022). The efficacy of soil washing for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the field. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130441>
- Huang, W., Xu, B., Yang, M., Zhang, R., Zhang, W., Wang, N., ... Pu, S. (2025). Modeling the comparative evaluation of diverse washing agents for remediation of composite heavy metal-contaminated soil. *Modeling Earth Systems and Environment*, 12. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02653-z>
- Johnson, B., & Hennessy, E. (2019). Systematic reviews and meta-analyses in the health sciences: Best practice methods for research syntheses. *Social Science & Medicine*, 233, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2019.05.035>



- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R., & Megharaj, M. (2017). Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere*, 168, 944–968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *PLoS Medicine*, 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Liu, J., Zhao, L., Liu, Q., Li, J., Qiao, Z., Sun, P., & Yang, Y. (2021). A critical review on soil washing during soil remediation for heavy metals and organic pollutants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 601–624. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03144-1>
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Londhe, K., & Venkatesan, A. (2025). Air bubbling assisted soil washing to treat PFAS in high organic content soils. *Environments*. <https://doi.org/10.3390/environments12010020>
- Mauricio, L. A., Zegarra, R. C., Arosemena, S. S., & Huaman, C. M. R. (2023). Tropical contamination by hydrocarbons: Biotechnological perspective for the remediation of soils in forests, application case Peruvian Amazon, Bagua–Imaza. In *Proceedings of the 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.1157>
- Mohammad, R. E. A., Veerasingam, S., Suresh, G., Rajendran, S., Sadasivuni, K., Ghani, S., & Al-Khayat, F. (2025). Tackling environmental radionuclides contamination: A systematic review of chemical, biological, and physical remediation strategies. *Chemical Engineering Journal Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2025.100802>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLoS Medicine*, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Page, M. J., Moher, D., & McKenzie, J. E. (2021). Introduction to PRISMA 2020 and implications for research synthesis methodologists. *Research Synthesis Methods*, 13, 156–163. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1535>



- Pozo-Rivera, W., Quiloango-Chimarro, C., Paredes, X., Landivar, M., Chiriboga, C., Hidalgo, D., ... Villacís, J. (2023). Response of dung beetle diversity to remediation of soil ecosystems in the Ecuadorian Amazon. *PeerJ*, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj.14975>
- Priya, A., Muruganandam, M., Ali, S., & Kornaros, M. (2023). Clean-up of heavy metals from contaminated soil by phytoremediation: A multidisciplinary and eco-friendly approach. *Toxics*, 11. <https://doi.org/10.3390/toxics11050422>
- Rasafi, T. E., Haouas, A., Tallou, A., Chakouri, M., Aallam, Y., Moukhtari, E., & Haddioui, A. (2023). Recent progress on emerging technologies for trace elements-contaminated soil remediation. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140121>
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., ... Young, S. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>
- Rongsayamanont, W., & Phasukarratchai, N. (2025). Ultrasound-assisted extraction of biosurfactants from water hyacinth for enhanced soil washing of diesel-contaminated soils: Performance evaluation and phytotoxicity assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 21522–21542. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36930-2>
- Santos, M., Rebola, S., & Evtuguin, D. (2025). Soil remediation: Current approaches and emerging bio-based trends. *Soil Systems*. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020035>
- Santos, M. L. V., Morales, J. A. R., Mendoza-Burguete, Y., del Carmen González-López, M., Pool, H., Amaro-Reyes, A., ... Chaparro-Sánchez, R. (2025). Use of anaerobic digestate inoculated with fungi as a soil amendment for soil remediation: A systematic review. *Biology*, 14. <https://doi.org/10.3390/biology14111579>
- Saqr, A., Pant, R. R., Alao, J., Chaurasia, P., Abdelkebir, B., & Abd-Elmaboud, M. (2025). Soil remediation through washing and flushing: Bibliometric trends, technical review, and future prospects. *Environmental Earth Sciences*, 84. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12386-y>
- Sarker, A., Masud, M. A. A., Deepo, D., Das, K., Nandi, R., Ansary, M. W. R., ... Islam, T. (2023). Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138861>
- Sánchez-Castro, I., Molina, L., Prieto-Fernández, M.-Á., & Segura, A. (2023). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil: Remediation techniques applied in real soil-contamination events. *Heliyon*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>
- Song, H., & Nam, K. (2023). Development of a potassium-based soil washing solution using response surface methodology for efficient removal of cesium contamination in soil. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138854>



- Tran, H.-T., Lin, C., Hoang, H., Bui, X., Le, V., & Vu, C. (2021). Soil washing for the remediation of dioxin-contaminated soil: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126767. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126767>
- Trellu, C., Péchaud, Y., Oturan, N., Mousset, E., Van Hullebusch, E., Huguenot, D., & Oturan, M. (2020). Remediation of soils contaminated by hydrophobic organic compounds: How to recover extracting agents from soil washing solutions? *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124137>
- Usman, M., Chaudhary, A., & Hanna, K. (2024). Efficient PFAS removal from contaminated soils through combined washing and adsorption in soil effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135118>
- Wang, G., Pan, X., Zhang, S., Zhong, Q., Zhou, W., Zhang, X., ... Peijnenburg, W. J. G. M. (2020). Remediation of heavy metal contaminated soil by biodegradable chelator-induced washing: Efficiencies and mechanisms. *Environmental Research*, 186, 109554. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109554>
- Wang, L., Rinklebe, J., Tack, F., & Hou, D. (2021). A review of green remediation strategies for heavy metal contaminated soil. *Soil Use and Management*, 37, 936–963. <https://doi.org/10.1111/sum.12717>
- Wang, Z., Wang, H., Wang, H.-J., Li, Q., & Li, Y. (2020). Effect of soil washing on heavy metal removal and soil quality: A two-sided coin. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 110981. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110981>
- Yeshiwas, A. G., Bayeh, G. M., Tsega, T., Tsega, S., Gebeyehu, A., Asmare, Z. A., ... Yenew, C. (2025). Scoping review on mitigating the silent threat of toxic industrial waste: Ecotrituals strategies for remediation and ecosystem restoration. *Environmental Health Insights*, 19. <https://doi.org/10.1177/11786302251329795>
- Zheng, X., Li, Q., Peng, H., Zhang, J.-X., Chen, W.-J., Zhou, B., & Chen, M. (2022). Remediation of heavy metal-contaminated soils with soil washing: A review. *Sustainability*, 14, 13058. <https://doi.org/10.3390/su142013058>
- Zoghi, P., & Mafigholami, R. (2023). Optimisation of soil washing method for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soil around oil storage tanks using response surface methodology. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42777-9>