

Recibido: 2026-06-26

Aceptado: 2026-07-04

Publicado: 2026-07-08

Potencial Biotecnológico de Microorganismos y Plantas Nativas para la Biorremediación de Suelos Impactados por Minería Aurífera, Morona Santiago: Revisión Sistemática 2020–2025

Biotechnological Potential of Native Microorganisms and Plants for Bioremediation of Gold-Mining Impacted Soils, Morona Santiago: Systematic Review 2020–2025

Autor(s)

Miguel Ángel Osorio Rivera¹

Maestría en Biotecnología

mosorior4@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8641-2721>

Universidad Estatal de Milagro (UNEMI)

Milagro – Ecuador

Sandra Elizabeth López Sampedro²

Maestría en Biotecnología

slopezs3@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0209-2087>

Universidad Estatal de Milagro (UNEMI)

Milagro – Ecuador

Diego Barzallo³

Maestría en Biotecnología

diego.barzallo@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2721-8483>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Riobamba – Ecuador

Resumen

La minería artesanal y de pequeña escala aurífera genera vertederos y residuos con mercurio (Hg) y otros metales contaminantes, amenazando la calidad del suelo, la vida edáfica, además de las vías de exposición humana en la Amazonía. Un reto de esta magnitud cataliza la exploración de opciones de menor impacto, concebidas para reducir el movimiento de contaminantes y a la vez evadir la creación de subproductos indeseados.

La síntesis de la bibliografía abarcó el periodo de enero de 2020 a diciembre de 2025, centrándose particularmente en especies vegetales autóctonas o aclimateadas, la intervención de microorganismos, así como las enmiendas suplementarias pertinentes a la mejora ambiental de suelos y depósitos de relaves de extracción aurífera. Un propósito primordial reside en valorar la viabilidad de su implementación en Morona Santiago, al mismo tiempo que se dilucidan los umbrales operacionales mínimos que garantizarían una prueba de campo fiable en el ámbito regional.

Se condujo una revisión sistemática abordando una síntesis narrativa, adhiriéndonos estrictamente a los lineamientos de la guía PRISMA 2020. La exhaustiva exploración documental se realizó el siete de junio de dos mil veintiséis, interrogando bases de datos prominentes tales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, SciELO, LILACS, Google Scholar, así como repositorios regionales. Procedentes de un corpus inicial de doscientos cincuenta y cinco registros, se procedió a la eliminación de cuarenta y cinco duplicados, la criba de doscientos diez, culminando con la selección de veintiocho estudios primarios destinados a la síntesis esencial.

Los hallazgos preliminares sugirieron un mayor respaldo hacia la fitoestabilización auxiliada como método predominante para atenuar la migración de metales, sofocar el desprendimiento del suelo y recuperar las propiedades edáficas. Indicios más contundentes se inclinaron por especies vegetales resistentes y el concurso de consorcios planta-microorganismo en recintos cerrados; no obstante, su aplicación directa en el ecosistema amazónico demostró ser de escasa certeza debido a la reducida supervisión cíclica y las limitadas determinaciones de mercurio biodisponible.

El aporte medular radica en cómo se clasifica el acervo informativo y se proyectan directrices para su difusión territorial en Morona Santiago. El empleo de entidades originarias, una evaluación geoquímica pormenorizada, las pruebas en entornos diminutos regulados, la validación en recintos de germinación y el establecimiento de lotes de ensayo se vislumbran como pasos previos esenciales antes de expandir una sola empresa.

Palabras clave: biotecnología; microorganismos; plantas; contaminación del suelo; mercurio; minería; Ecuador

Abstract

Artisanal and small scale gold mining produces soils and tailings containing mercury Hg and associated metals that impact soil quality soil biota and human exposure pathways within the Amazon. Such a predicament necessitates low impact alternatives capable of diminishing contaminant mobility while eschewing the generation of secondary waste.

This review undertakes the synthesis of evidence published between January 2020 and December 2025 concerning native or acclimatized plants microorganisms and supportive amendments for the bioremediation of gold mining impacted soils and tailings. The aim herein is to appraise applicability for Morona Santiago and delineate the requisite minimum conditions for secure localized validation.

A systematic review employing narrative synthesis methodology was undertaken adhering to PRISMA 2020 guidelines. The audited search commenced on June 7 2026 across Scopus Web of Science ScienceDirect PubMed SciELO LILACS Google Scholar and regional repositories. A grand total of 255 records were initially identified subsequently 45 duplicates were expunged 210 records underwent screening and a refined selection of 28 primary studies was preserved for the principal synthesis.

The primary investigations furnished more robust backing for assisted phytostabilization when the overarching objectives entailed reducing mobility averting erosion and reinstating soil functions. Stronger evidence emerged for the efficacy of tolerant plant species and plant microorganism consortia under controlled environments; however direct application in Amazonian field settings exhibited limited certainty owing to a paucity of seasonal observation and constrained quantification of bioavailable Hg. The primary contribution involves the systematization of existing evidence and the formulation of definitive transfer criteria specifically for the Morona Santiago region.

Keywords: biotechnology; microorganisms; plants; soil pollution; mercury; mining; Ecuador

Introducción

La extracción de oro a nivel artesanal y de pequeña escala induce alteraciones en la composición del suelo, generando residuos finos y liberando mercurio, además de otros elementos de probable toxicidad. En zonas de climas tropicales, las lluvias y la cercanía de ríos promueven el movimiento de partículas y solutos, dirigiéndose éstos hacia cuerpos de agua y acumulaciones sedimentarias. Por esta razón, la biorremediación constituye una línea relevante para la restauración de suelos amazónicos y para la gestión ambiental del territorio (Rivera-Parra et al., 2021; Capparelli et al., 2020).

El Hg exige una lectura distinta a la de un contaminante degradable. Su movilidad y toxicidad dependen de la especie química, el pH, la materia orgánica, la humedad y las condiciones redox. La concentración total no describe por sí sola el riesgo, porque las fracciones móviles y las especies metiladas pueden cambiar la exposición real. Esta circunstancia se vuelve medular en las cuencas del Amazonas, allí el ciclo de precipitación altera la interacción de tierra, sedimento y caudal líquido (O'Connor et al., 2019; Zhao et al., 2024).

Los métodos físico químicos ya sean de retiro lavado o confinado de materia contaminada a menudo acarrear gastos elevados y demandan transporte de residuos y gestión de subproductos. Se investigan la biorremediación y la fitorremediación como opciones para situaciones de dispersión de contaminantes o contaminación de nivel intermedio. Dicho abordajes no remplazan la vigilancia del origen de la actividad minera más si pudieran aminorar el movimiento de sustancias rescatar vegetación y optimizar procesos elementales del terreno. La eficacia de los mismos se ve condicionada por el tipo de suelo afectado por el metal principal por el ser vivo utilizado y por el periodo de análisis (Bhat et al., 2022; Liu et al., 2018).

La literatura científica actualizada indica que los sistemas combinados otorgan una coherencia ecológica superior a la de intervenciones puntuales. Las plantas brindan un entramado radicular, cobertura y una mitigación de la erosión; los microorganismos asociados como rizobacterias endófitos y hongos son capaces de potenciar la tolerancia vegetal o bien la inmovilización de metales; y el biochar, a su vez, posee la facultad de modular el pH la humedad y la disposición de sitios de adsorción. No obstante, la efectividad del sistema es variable y se ve influenciada por factores como la especie vegetal seleccionada, la estirpe microbiana específica, la dosificación de la enmienda aplicada y las características intrínsecas del sustrato edáfico. En consecuencia, cada enfoque de manejo exige una validación contextualizada y específica de cada sitio previa a su implementación a gran escala (Alves et al., 2022; Ghosh & Maiti, 2021; Wu et al., 2022).

Morona Santiago se encuentra inmersa en la Amazonía del Ecuador, enfrentando una apremiante presión territorial ocasionada por actividades extractivas, la conectividad de sus sistemas hídricos, y una acentuada sensibilidad ecológica. A pesar de la existencia de investigaciones sobre la contaminación minera en Ecuador, y la identificación de plantas que toleran entornos auríferos, aún se carece de evidencia localizada para cuantificar las fracciones biodisponibles de mercurio, la variabilidad estacional, la persistencia de inoculantes, y estrategias seguras para la gestión de biomasa contaminada. Esta laguna de conocimiento restringe la aplicación directa de hallazgos globales en los suelos y relaves amazónicos. Nuestra pregunta de investigación gira en torno a la aptitud de plantas autóctonas, microorganismos y enmiendas de escaso impacto para disminuir la movilidad, la biodisponibilidad y el riesgo inherente en suelos auríferos, con una orientación práctica para Morona Santiago (Chamba-Eras et al., 2022; Mestanza-Ramón et al., 2023).

La meta primordial consiste en una síntesis acrítica de los hallazgos científicos de 2020 a 2025 referidos a la flora autóctona o aclimatada, la vida microbiana, y enfoques combinados para la depuración biológica de suelos ricos en oro. Además, se valora el nivel de confianza de los estudios incluidos y se proponen criterios de validación territorial para Morona Santiago.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

Se llevó a cabo una revisión sistemática cual se complementó con una síntesis narrativa. El informe estructuró bajo la plantilla PRISMA 2020 y con directrices de síntesis ambiental, así garantizando trazabilidad, transparencia en el recorrido documental y una distinción nítida entre estudios primarios, revisiones y materiales de referencia (Page et al., 2021a, 2021b; Collaboration for Environmental Evidence, 2022). Con el objetivo de disminuir la parcialidad que brota de dicha omisión, se implementaron principios rigurosos de idoneidad, especificaciones susceptibles de replicación, una disociación metódica de los datos según su función metodológica, y un corpus exhaustivo de dictámenes. Seguidamente, una heterogeneidad metodológica se manifestó a causa de la disparidad en diseños, escalas, dosis, controles y periodos de observación empleado. Y por último, una heterogeneidad estadística existía; los desenlaces se presentaron en unidades y medidas de efecto las cuales no eran equivalentes. Estas divergencias imposibilitaron la determinación de un estimador consolidado que se tubo valida sin incrementar, ello el riesgo de una interpretación errónea.

Protocolo, registro y control de sesgo

El protocolo no fue inscrito previa a la revisión, consecuentemente, esta circunstancia fue catalogada como una restricción metodológica. Con el propósito de mermar la parcialidad inherente a esa omisión, se mantuvieron principios explícitos de idoneidad, formulaciones replicables, segregación del conjunto de datos conforme al rol metodológico, y un compendio de resoluciones. El escrutinio conclusivo tuvo lugar el 7 de junio de 2026, facilitando el examen de la cohesión entre interrogante, referencias, estipulaciones, elección, obtención de datos y resumen. La inscripción retrospectiva solo debe ser vista como un acto de publicidad y no como un aval anticipado.

Pregunta PECO y alcance

La cuestión se forjó con un diseño PECO. Las poblaciones de estudio, la matriz concernida, abarcaban desde suelos hasta la rizosfera, pasando por relaves y sedimentos intrínsecamente vinculados a la minería aurífera artesanal o de escasa escala. La exposición predominante se centró en el mercurio, en su manifestación aislada o en conjunción con arsénico, plomo, cadmio, cobre, zinc, o bien níquel. Los puntos de comparación capitales eran los siguientes: el terreno afectado versus el sitio inalterado; el tratamiento de índole biológica contrastado con un control que carecía de vegetales o microorganismos; la aplicación de enmiendas en contraposición a la situación de partida; y por último, las zonas de explotación minera en contraposición a los terrenos considerados como referencia. Los desenlaces incluyeron concentración total, fracción biodisponible, reducción porcentual, factor de bioconcentración, factor de translocación, biomasa, supervivencia, cobertura, indicadores microbianos y riesgo ambiental. La Tabla 1 detalla los criterios operativos de elegibilidad.

Tabla 1. Criterios de elegibilidad de la revisión

Componente	Inclusión	Exclusión
Periodo	Estudios publicados entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2025; fuentes clásicas solo para sustento conceptual.	Fuentes anteriores a 2020 como evidencia principal de intervención.
Matriz	Suelo, rizosfera, relave o sedimento con vínculo directo y explícito con suelo minero aurífero.	Estudios solo en agua, aire o biota sin relación con suelo, relave o sedimento.
Actividad	Minería aurífera artesanal, de pequeña escala o relaves derivados de extracción de oro.	Minería distinta de la aurífera sin transferencia clara al problema de Hg o metales asociados.
Contaminantes	Hg como contaminante prioritario, solo o combinado con As, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni u otros metales medidos con método analítico identificado.	Ausencia de contaminantes de interés, valores no medibles o método analítico no descrito.

Componente	Inclusión	Exclusión
Intervención	Plantas nativas o adaptadas, microorganismos de ambientes mineros, consorcios planta-microbio, biochar u otras enmiendas que apoyen la acción biológica.	Intervenciones sin relación con remediación biológica o sin descripción suficiente de dosis, organismo o condición de aplicación.
Desenlaces	Al menos un resultado cuantificable de suelo, planta, microorganismo o riesgo: concentración, fracción disponible, BCF, TF, biomasa, supervivencia, cobertura, actividad microbiana o lixiviado.	Resultados solo descriptivos, sin datos verificables o sin relación con movilidad, biodisponibilidad, crecimiento o riesgo.
Diseño e idioma	Artículos de investigación y revisiones con método explícito, en español, inglés o portugués, con texto completo disponible.	Editoriales, cartas, resúmenes de congreso, notas breves, duplicados y documentos sin texto completo.

Nota. Las fuentes clásicas anteriores a 2020 se conservaron únicamente para explicar mecanismos o conceptos y no se consideraron parte de la ventana principal de síntesis.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La indagación bibliográfica, tras su auditoria, acontecio el siete de junio de dos mil veintiseis. Comprendio materiales editados desde el uno de enero de veinte veinte hasta el treinta y uno de diciembre de veinticinco. Para esto, uso principalmente bases de datos extensas tal como Scopus, Web of Science, y ScienceDirect. Fuentes secundarias tales como PubMed, SciELO, LILACS, y Google Scholar, a la par de repositorios y publicaciones academicas de Latinoamerica, complementaron el rastreo. La uniformidad de los criterios de búsqueda se aplicó en cada base de datos. Estas estrategias de búsqueda integraron vocablos vinculados al sector minero del oro, la composición de los suelos, los desechos de la minería (relaves), la presencia de mercurio y otros metales, los procesos de biorremediación, la fitorremediación, y el rol de microorganismos, hongos, micorrizas y biochar. Detalladamente, la estrategia de auditoría por cada fuente aparece en la Tabla 2. Por otro lado, la exploración adicional tuvo como meta rescatar información específica de la región y textos de carácter contextual, resguardando así la pureza de la síntesis principal.

Tabla 2. Estrategias de búsqueda auditadas por fuente

Fuente	Ecuación reproducible	Filtros/observación
Scopus	TITLE-ABS-KEY((ASGM OR "artisanal small-scale gold mining" OR "gold mining") AND (soil* OR tailing* OR relave*) AND (mercury OR Hg OR "heavy metal*" OR "potentially toxic element*") AND (bioremediation OR phytoremediation OR phytostabilization OR phytoextraction OR rhizobacteria OR PGPR OR endophyte* OR mycorrhiza* OR biochar))	1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2025; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.

Fuente	Ecuación reproducible	Filtros/observación
Web of Science	TS=((ASGM OR "gold mining") AND (soil* OR tailing*) AND (mercury OR "potentially toxic element*") AND (bioremediation OR phytoremediation OR PGPR OR fungi OR biochar))	1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2025; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.
PubMed	("Gold Mining" OR ASGM) AND (soil OR tailings) AND (mercury OR metals) AND (bioremediation OR phytoremediation OR bacteria OR fungi)	1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2025; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.
ScienceDirect	("gold mining" OR ASGM) AND (soil OR tailings) AND (mercury OR "heavy metals") AND (bioremediation OR phytoremediation OR biochar)	1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2025; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.
LILACS/SciELO	("minería aurífera" OR "minería de oro") AND (suelos OR relaves) AND (mercurio OR metales) AND (biorremediación OR fitorremediación)	Español y portugués; 1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2025; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.
Google Scholar	Combinaciones del título con Morona Santiago, Amazonía ecuatoriana, Hg, plantas nativas, microorganismos y biochar.	Fuente complementaria; primeras páginas de resultados por combinación; búsqueda auditada el 7 de junio de 2026.

Proceso de selección

La selección del material de estudio transitó por cuatro estadios clave: primero se depuraron duplicados, luego un escrutinio riguroso por título y resumen, subsiguiente lectura de los textos completos y finalmente, una categorización del acervo documental según su función metodológica. Un par de investigadores llevó a cabo una comparación rigurosa sobre los métodos de selección y extracción en el transcurso de una auditoría minuciosa, los conflictos que emergieron se resolvieron mediante consenso unánime, y todo quedó plasmado en un cuadro detallado de resoluciones.

La colección fundacional incluyó 120 expedientes, que abarcaba estudios primarios directos, primarios con eco periférico, análisis de segunda mano, estudios ambientales, notas al margen, normativas, bosquejos teóricos y un epígrafe de cierre. Tan solo 28 de aquellas aportaciones, calificadas como primarias directas o con credibilidad demostrada, permitieron la depuración fundamental; los comentarios aportaron al debate doctrinal, a pesar de no ser tenidos por prueba empírica.

Un cúmulo de 120 documentos integró el sustrato inicial, diversificados en exploraciones primarias directas, primarias de valor colateral, indagaciones terciarias, estudios contextuales, anotaciones adicionales, cánones, esquemas y un resumen integrador final. De este corpus de 120 piezas, apenas 28, clasificados como primarios directos o de funcionalidad corroborada, posibilitaron la elaboración primordial; las revisiones se centraron en la disonancia conceptual, sin formar parte del acervo de información empírica.

La indagación bibliográfica desveló la asombrosa cantidad de doscientos cincuenta y cinco descubrimientos; de esta vasta recopilación, nada menos que doscientos cuarenta y tres emanaban de repositorios académicos especializados, mientras que modestamente una docena surgió de un abanico más heterogéneo de procedencias, doscientos cuarenta y tres, procedían de bases de datos especializadas y tan solo una docena emergieron de fuentes diversas. Tras un proceso riguroso de eliminación de cuarenta y cinco entradas duplicadas, se sometieron a escrutinio doscientos diez documentos, de los cuales noventa fueron subsecuentemente desestimados. Los ciento veinte materiales restantes conformaron la estructura del mapa de evidencia existente. Subsecuentemente, la auditoría de roles distribuyó los estudios en catorce investigaciones primarias directas, catorce investigaciones primarias transferibles, treinta y cinco revisiones o resúmenes secundarios, veintiséis estudios de carácter contextual, veinticuatro antecedentes que trascendieron el marco temporal establecido, cuatro comentarios, dos guías de metodología y un capítulo de síntesis exhaustivo. Por lo tanto, la síntesis central se apoyó de forma concluyente en veintiocho estudios de carácter primario, reservándose los remanentes para fines de triangulación, contextualización o análisis metodológico detallado. Dicha progresión de la selección de documentos se representa visualmente en la Figura 1.

Clasificación del corpus y calidad metodológica

La discriminación entre los ciento veinte documentos evito la confusión entre investigaciones de origen y revisiones, directrices o fuentes de referencia. La compilación central se compuso de veintiocho investigaciones de origen, catorce de ellas directas y catorce transferibles. La evidencia derivada se empleó, exclusiva mente, para corroborar conclusiones y dilucidar procesos. Dicha distinción fortalece la confiabilidad del compendio y previniendo la sobreestimación del caudal de investigaciones empíricas.

En los 28 estudios primarios, 11 obtuvieron valoración preliminar alta y 17 moderada. Ningún estudio fue excluido únicamente por calidad; la valoración se utilizó para ponderar la fuerza de las conclusiones. Entre las 35 revisiones secundarias, 32 mostraron calidad preliminar moderada y 3 baja. La Tabla 3 muestra la distribución cuantitativa de calidad metodológica. Estos juicios deben cotejarse con el texto completo y con un segundo evaluador.

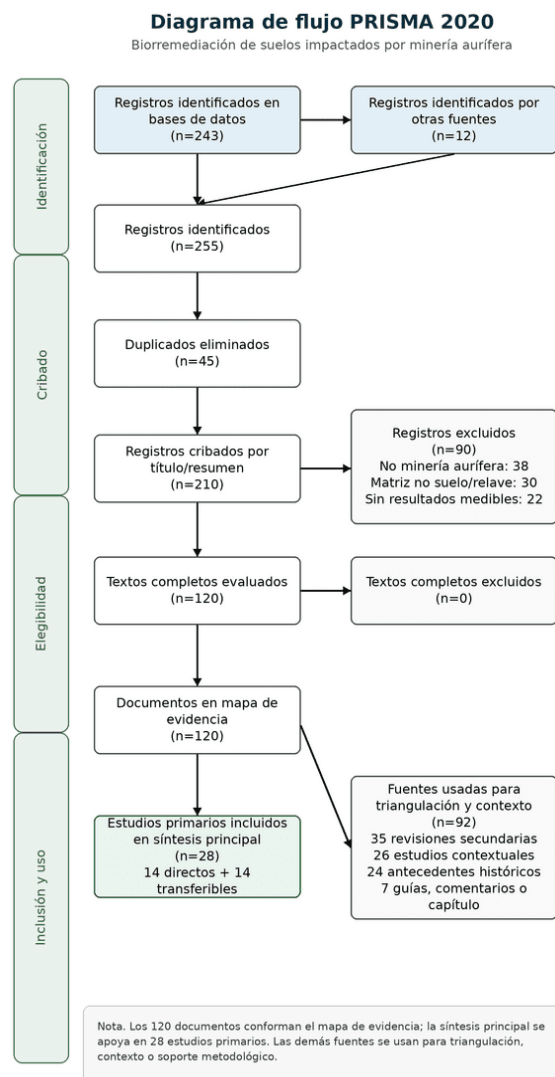
Tabla 3. Distribución preliminar de calidad metodológica por grupo de evidencia

Grupo	Alta	Moderada	Baja
Estudios primarios, n=28	11	17	0
Revisiones secundarias, n=35	0	32	3

Tabla 4. Clasificación del corpus por rol metodológico

Rol metodológico	n	Uso en el artículo	Decisión
Estudios primarios directos	14	Síntesis principal	Incluir y ponderar por calidad
Estudios primarios transferibles	14	Síntesis principal	Incluir con cautela por aplicabilidad
Evidencia secundaria	35	Triangulación y discusión	No contar como estudio primario
Estudios primarios contextuales	26	Introducción, riesgo y mecanismos	Excluir de síntesis de intervención
Antecedentes fuera de 2020–2025	24	Fundamento histórico	Excluir de la ventana principal
Guías, comentarios y capítulo	7	Métodos y contexto	No someter a ponderación primaria

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de selección documental



Nota. Elaboración propia a partir del flujo PRISMA 2020 y de la matriz de decisiones, referente a la revisión efectuada.

Extracción de datos

Se obtuvieron datos acerca de la localización, método de extracción de recursos minerales, medio de origen, sustancias nocivas, acidez, compuestos orgánicos, composición del suelo, plantas predominantes, grupos microbianos, modificaciones aplicadas, dimensiones del experimento, lapso de tiempo, puntos de referencia, resultados y métricas de impacto. La recopilación de la información se contrastó rigurosamente con el contenido íntegro de los trabajos en cuestión, sin recurrir a la omisión o suposición de información incompleta. Con respecto a los ensayos más relevantes, se evaluó la armonía entre el propósito declarado, la metodología experimental, la intervención llevada a cabo, los hallazgos y las conclusiones, con el fin de precaver inferencias carentes de fundamento sólido.

Variables y medidas de efecto

Las variables de análisis que se tuvieron en cuenta abarcaban desde determinaciones cuantitativas de sustancias en rangos de miligramos o microgramos por kilogramo hasta el estudio de las fracciones desprendibles. Adicionalmente, se evaluó la disminución porcentual observada, las tasas de mortalidad y desarrollo, la extensión de la superficie cubierta por organismos, el nivel de actividad de enzimas específicas, el índice de acumulación biológica (BCF), y el coeficiente de transferencia (TF). Cuando un trabajo de investigación implicó la modificación de unidades de medida, la unidad empleada en el reporte inicial se mantuvo intacta, documentándose también el proceso de transformación. Para el BCF y el TF, su interpretación se basó estrictamente en la matriz del material y el tipo de metal que se registraron, evitando cotejar valores que tuvieran distintos términos en su denominador.

Evaluación metodológica y riesgo de sesgo

Se empleó una evaluación metodológica a los veintiocho estudios primarios en la síntesis principal, abarcando ocho dominios los cuales se adaptaron de la Collaboration for Environmental Evidence. Estos dominios incluyeron claridad de la pregunta y matriz, la presencia de un control o comparador, el muestreo y replicación adecuada, la caracterización de la intervención o exposición, la medición precisa de desenlaces, el control de calidad y la consideración de la incertidumbre, así como el análisis estadístico y su aplicabilidad. A cada dominio fue atribuida una calificación de cero, uno o dos puntos, produciendo así una clasificación general que oscilaba entre alta, moderada o baja. Para el escrutinio detallado de las revisiones sistemáticas, utilizamos una adaptación concisa del instrumento CEESAT; las narrativas, por su parte, las evaluamos utilizando el criterio SANRA (Collaboration for Environmental Evidence, 2022; Baethge et al. ,

2019). Estos juicios se concibieron con el propósito de calibrar el nivel de certeza intrínseco a la síntesis, sin que por ello se excluyeran de forma automática los estudios examinados.

Métodos de síntesis

La organización de la síntesis se estructuró en cinco categorizaciones: caracterización geoquímica y su consiguiente riesgo, flora autóctona o aclimatada, agentes microbianos, carbón vegetal y diversas otras mejoras, además de los factores de amplificación. El cálculo de un efecto unificado fue omitido debido a la heterogeneidad en los estudios referidos a contaminantes, soportes, taxones, cantidades, elementos de referencia y periodos temporales que imposibilitaron una comparación directa. Las conclusiones abarcaron el curso de las implicaciones, las explicaciones mecanicistas que se propusieron, las condiciones necesarias para el desempeño, los confines de la usabilidad, e igualmente la medida de la certeza.

Sesgo de publicación y confianza de la evidencia

Dada la ausencia de tamaños de efecto cotejables o meta-análisis completos, no se emplearon ni los funnel plots ni las pruebas estadísticas destinadas a evidenciar sesgo de publicación. Sin embargo, la fiabilidad examinaba mediante la congruencia de las directrices investigativas, el valor intrínseco de su rigor metodológico y la concordancia percibida en las conclusiones. El peso de la evidencia se reforzaba al yuxtaponer estudios primarios directos, una clasificación alta o moderada, y patrones de resultados que concordaban. Por su parte, las investigaciones secundarias ayudó a dilucidar dinámicas, aunque de forma aislada, no ampliaron la confianza en los resultados finales.

Seguridad, ética y disponibilidad de datos

No participaron sujetos humanos, ni tampoco seres vivos de otra índole, en esta evaluación exhaustiva. No obstante, la naturaleza misma de la investigación impone una reflexión sobre la inhalación de partículas finas, el contacto con la piel, el meticuloso seguimiento de la procedencia y la salvaguarda de la biomasa contaminada para futuras incursiones de campo. Completamente, tanto los documentos de datos extraídos como la crónica de determinaciones y los compendios de validación, aparecen como anexos dentro del acopio complementario, posterior a su riguroso saneamiento.

Resultados

Características de los estudios representativos

La Tabla 5 muestra doce estudios prominentes de las 28 investigaciones primarias, ellas formaron el pilar de esta síntesis. Esta selección comprende hallazgos empíricos desde Ecuador, México, China, Pakistán, los Estados Unidos, y la India. Involucra también métodos variados, tales como investigaciones de campo, experimentos bajo control, exámenes de biochar, la indagar de cultivos con resistencia y la interrelación de sistemas planta microbios.

Tabla 5. Características y valoración metodológica de doce estudios representativos

Estudio	País	Diseño/matriz	Intervención	Resultado principal	Calidad
Chamba-Eras et al., 2022	Ecuador	Campo; plantas y suelo de mina aurífera	Exposición a Cd, Pb, Zn y Hg	Miconia sp. mostró perfil de estabilización y Erato polymnioides mayor transferencia para Cd/Zn; ambas presentaron interés para Hg.	Alta
Rosas-Ramírez et al., 2024	México	Ensayo controlado; relaves	Crotalaria pumila + biochar	El biochar favoreció establecimiento e inmovilización, con utilidad para fitostabilización asistida.	Alta
Santoyo-Martínez et al., 2024	México	Campo y controlado; suelo minero	Crotalaria pumila frente a mezcla de metales	La retención predominante en raíces apoyó un uso estabilizador.	Alta
Mussali-Galante et al., 2023	México	Campo; relaves	Gliricidia sepium	La acumulación subterránea apoyó estabilización; requiere control de transferencia trófica.	Moderada
Mussali-Galante et al., 2024	México	Campo; biomarcadores	Prosopis laevigata	La tolerancia coexistió con señales de estrés, por lo que deben medirse efectos biológicos.	Alta
Castañeda-Espinoza et al., 2022	México	Campo; minas abandonadas	Dodonaea viscosa	La retención en raíces respaldó su potencial fitoestabilizador.	Moderada-alta
Acosta-Núñez et al., 2025	México	Fitorremediación in situ; relaves	Dodonaea viscosa	La especie se estableció y retuvo Cd/Pb en raíces, con aporte de evidencia de campo.	Alta
Tahir et al., 2022	Pakistán	Macetas; suelo con Cd	Pantoea sp. WP-5 + abonos	La combinación mejoró crecimiento y estabilización de Cd en rizosfera.	Alta
Wu et al., 2022	China	Laboratorio y planta-hongo; Hg	Metarhizium robertsii	El hongo protegió a la planta y redujo Hg disponible en el sistema evaluado.	Alta
Tu et al., 2020	China	Experimento de suelo; Cd/Cu	Biochar y biochar inoculado	El biochar inoculado mejoró inmovilización y actividad enzimática.	Moderada-alta
Wang et al., 2020b	China	Macetas; Brassica rapa y Cd	Consorcio Enterobacter-Comamonas	El consorcio redujo movilidad y absorción de Cd por la planta.	Alta

Estudio	País	Diseño/matriz	Intervención	Resultado principal	Calidad
Song et al., 2022	China	Microcosmos; agregados de suelo	Agentes de remediación	Los tratamientos cambiaron química y estructura/función microbiana.	Alta

Nota. La tabla resume estudios primarios representativos de la síntesis principal; su calidad, dicho sea de paso, corresponde a la valoración narrativa aplicada en la revisión.

Perfil geoquímico y riesgo amazónico

Mercurio se presentó en conjunto con Arsénico, Plomo, Cadmio y diversos metales más, evidenciando así una contaminación de índole mixta. La estimación del riesgo no fue posible restringir a un solo ámbito, dado que las investigaciones vincularon la tierra, el desmonte, el cieno, el líquido y la proximidad humana. La pauta más significativa consistió en la imperiosa evaluación de la migración y la vinculación ecológica, en vez de la cantidad global únicamente. Tal circunstancia ocasiona que la elección de una metodología específica devenga del lugar y del conducto principal de contacto.

El espectro analítico total se reveló inadecuado para desentrañar el peligro latente. La dinámica del mercurio, en cuanto a su desplazamiento y potencial metamorfosis, fue orquestada por la presencia de materia orgánica, la acidez del medio, su grado de saturación y el potencial de óxido reducción. Las pesquisas orientadas a identificar fracciones extractables o formas químicas concretas resultaron en datos con una trascendencia estratégica magnificada para sustentar una futura intervención correctiva. En consecuencia, los argumentos se decantaron a favor de la realización de evaluaciones geoquímicas preliminares, anterior a la ejecución de cualquier análisis de índole biológica.

Plantas nativas y elección entre extracción y estabilización

Investigaciones efectuadas con organismos tolerantes desvelaron dos enfoques predominantes. Una vía, la fitoextracción, es capaz de eliminar metales si hay suficiente masa vegetal y un programa de recolección establecido, no obstante, incrementa la apremio por supervisar el porvenir del tejido botánico. Otra, la fitoestabilización, atenúa la traslación de elementos nocivos al fijarles en el sistema radicular y su entorno inmediato.

Los hallazgos ecuatorianos que involucran a *Erato polymnioides* y *Miconia sp.* valieron la preselección de organismos nativos, no obstante, evidenciaron variaciones notables en las reacciones de los tejidos vegetales y las concentraciones de metales. La perdurabilidad del fitoorganismo no se equipará con la garantía ecológica. Antes de validar un tipo específico, es imprescindible cuantificar el Factor de Bioconcentración (BCF), el Factor de Translocación (TF),

la masa vegetal, la proliferación de raíces y la potencial ingesta por fauna. Este criterio demostró ser fundamental para discernir entre resistencia, acopio y fijación.

Microorganismos y consorcios planta-microbio

Las funciones microbianas predominantes incluían la biosorción, la producción de exopolisacáridos, la formación de biofilm, la secreción de sideróforos, la solubilización de fosfatos, la actividad de ACC desaminasa y la transformación redox. Con estas acciones se logró atenuar el estrés en las plantas o fijar metales pesados en el entorno de la rizosfera. Sin embargo, la efectividad de tales funciones estuvo supeditada a la viabilidad del microorganismo inoculado, su capacidad de competir frente a la comunidad microbiana autóctona y las condiciones fisicoquímicas propias del suelo. Diversos estudios respaldaron la utilización de consorcios microbianos autóctonos en detrimento de la inoculación directa con cepas foráneas.

Endofitos y hongos simbióticos ofrecieron beneficios dada su íntima vinculación a la planta. Los conglomerados bacterianos facilitaron la compartimentación de responsabilidades para la tolerancia la nutrición y la inmovilización. La evidencia respectiva a *Metarhizium robertsii* exhibió potencial en la manipulación del Hg si bien esa información no fundamenta liberaciones carente de examen ecológico preliminar. La confirmación local a ser requerida debe validar la colonización la persistencia y las repercusiones indeseadas.

Biochar y otras enmiendas

El biochar, en diversidad de estudios, demostró un aumento en el pH, una mejora notable en la capacidad de retención de agua y la provisión de superficies adsorbentes. Estas modificaciones, sin embargo, exhibieron variabilidad, oscilando en respuesta a la biomasa de origen, las condiciones térmicas de pirólisis, la cantidad aplicada, el metal preponderante y la materia orgánica disuelta presente. Su eficacia se magnificó sustancialmente al dirigirse a una deficiencia específica del suelo. Cuando se consideró la presencia de mercurio (Hg), una evaluación exhaustiva demandaba el análisis de los lixiviados y las fracciones móviles para así eludir una percepción sesgada del riesgo inherente.

Las enmiendas parecían tener un impacto más evidente en terrenos de pH bajo, con una escasa capacidad de retener humedad, o en aquellos con texturas deterioradas. No hallamos datos concluyentes para su uso extendido sin previa evaluación de cantidades óptimas. La modificación en la abundancia total de un elemento no siempre implica una disminución efectiva de su potencial dañino. Consecuentemente, los estudios de campo tendrían que centrarse en la firmeza, el movimiento, la reacción de las plantas y la probabilidad de lixiviación hacia cuerpos de agua o capas de sedimento.

Confianza de la evidencia y vacíos

La Tabla 6 resume la confianza narrativa de los principales desenlaces y orienta la lectura de los vacíos más relevantes para Morona Santiago.

Tabla 6. Valoración narrativa de confianza por desenlace

Desenlace	Confianza	Razón principal	Implicación
Establecimiento de plantas tolerantes	Moderada	Resultados consistentes, pero especies y matrices variadas.	Requiere preselección local.
Fitostabilización en raíces/rizosfera	Moderada	Varios estudios de campo y controlados; limitada comparabilidad.	Aplicación inicial prudente.
Asistencia microbiana	Moderada-baja	Mecanismos claros, pero menor validación de permanencia en campo.	Usar cepas locales y confirmar colonización.
Biochar para Hg	Baja	Pocos estudios específicos de Hg y alta dependencia del material.	Ensayos de dosis y lixiviados.
Aplicación directa en Amazonía	Muy baja	Pocos pilotos locales, seguimiento corto y escasa evaluación estacional.	No escalar sin parcela piloto.

Discusión

Hallazgo principal

El estudio develó una verdad ineludible: los suelos amazónicos reclaman una estrategia sumamente eficaz. esta no consistió en un procedimiento aislado, singular, sino más bien en una fitostabilización precisa. además, debía ser escrupulosamente asistida. su efectividad dependió de su específica adaptación a la condición de sitio. Dicha sinergia demostró ser significativamente superior en su capacidad para mitigar riesgos comparada con una fitoextracción carente de una gestión biomasa estricta, sobre todo en entornos caracterizados por precipitaciones abundantes, la presencia de relaves finos y una conectividad hidrológica marcada.

Convergencias con revisiones previas

La síntesis coincidió con revisiones sobre Hg que señalaron biosorción, resistencia, transformación redox e interacción planta-microorganismo como ejes de remediación (Wang et al., 2020a; González-Reguero et al., 2023; Kumar et al., 2024). También coincidió con estudios sobre bacterias promotoras del crecimiento, endófitos y hongos, donde estos organismos mejoraron tolerancia vegetal y estabilidad de metales (Alves et al., 2022; Khalid et al., 2021; O'Callaghan et al., 2020). En biochar, la evidencia confirmó que su desempeño dependió de la materia prima, la pirólisis, la dosis y la química del suelo (Ghosh & Maiti, 2021; Jensen et al., 2024).

Divergencias y condiciones de aplicación

Las diferencias entre estudios se concentraron en la meta de remediación. Una parte de la literatura priorizó la extracción y concentración en biomasa, mientras otra priorizó la inmovilización. Morona Santiago presentó una inmovilización más juiciosa dado la presencia de relaves finos, de declives pronunciados, de pluviosidad intensa y su proximidad a cuerpos de agua. La fitoextracción, si bien mantuvo un valor en puntos donde fue monitoreado, hizo necesaria una cosecha, una trazabilidad, una disposición segura y un balance de masa. Estudios que se fundamentaron exclusivamente en la concentración total ofrecieron menos información acerca del riesgo que aquellos que consideraron la biodisponibilidad o la especiación de Hg (O'Connor et al. , 2019; Zhao et al. , 2024).

Implicaciones para Morona Santiago

La transferencia territorial, esencialmente, precisa comenzar con una exhaustiva caracterización geoquímica junto con la deliberada selección de una parcela con garantías de seguridad. En referencia a la selección de especies, es absolutamente crucial que esto no solo se restrinja a figurar en escritos; se vuelve obligatorio validar la presencia en el lugar, la tolerancia intrínseca, los coeficientes de bioacumulación (BCF), los factores de translocación (TF), la palatabilidad intrínseca, y una concordancia probada con los microbios aliados. En lo que concierne a los inoculantes, estos, para su parte, necesitan ser separados directamente de la zona implicada o de hábitats que presenten propiedades semejantes, al mismo tiempo que el biochar demanda una descripción pormenorizada anterior a su empleo. Finalmente, la evaluación completa del proceso debe contemplar de manera integrada aspectos de la química del suelo, la cobertura vegetal, la biomasa generada, la salud general del suelo, la incidencia de la escorrentía y las diversas rutas potenciales de exposición.

Ruta aplicada para Morona Santiago

Procediendo de la síntesis, el camino ejecutado para Morona Santiago se percibe como una proposición de traspaso y no como una conclusión directa obtenida del campo. La mencionada secuencia conlleva una profunda examinación del suelo bajo diversas fluctuaciones climáticas, la selección inicial de flora autóctona destinada a fines no alimentarios, el aislamiento de microorganismos endógenos, pruebas en microcosmos y cámaras de cultivo, finalizando en un área de control que monitoriza las porciones asimilables, el dosel vegetal, la vitalidad del sustrato, los efluvios y las rutas de disseminación. Una inspección diligente del pasado minero y la administración juiciosa de la biomasa se presentan como condiciones indispensables para determinar cualquier mejoramiento perceptible.

Figura 2. Propuesta de ruta aplicada para Morona Santiago



Nota. Propuesta derivada de la síntesis narrativa; no representa un resultado directo de campo.

Implicaciones para práctica y política pública

La remediación necesariamente se conecta con la erradicación del origen, el bienestar ecológico y la implicación de la colectividad. La asignación de jerarquías a las ubicaciones tiene que fundamentarse en la evaluación del peligro, la accesibilidad para las personas, la proximidad a recursos hídricos y la viabilidad de una gestión sin incidentes. Lo que es biomasa expuesta no es apta para el consumo humano y los animales no deben tener acceso descontrolado. Las inspecciones gubernamentales deberán pedir porcentajes biodisponibles y estados redox, sin limitarse al Hg total, al igual que pruebas piloto previa ampliación de cualquier acción.

Agenda de investigación

Investigaciones futuras enfrentarán épocas con lluvias profusas y anómalas. Una tarea será evaluar taxones indígenas no destinados a la alimentación. Será importante identificar rizobacterias y microorganismos endófitos de su nicho preciso. Resulta crucial establecer la longevidad del inóculo introducido. Cabe añadir la medición de Hg, establecer el balance de materiales y definir un destino definitivo para la materia orgánica remanente. Igualmente, se considera indispensable la ejecución de estudios colaborativos que integren conocimiento local, vigilancia comunitaria y

un análisis económico minucioso. Dichas directrices abordan las restricciones de claridad, trazabilidad y confirmación amazónica que se perfilaron en la revisión bibliográfica.

Conclusiones

La documentación acumulada entre 2020 y 2025 apunta fuertemente hacia la aplicación combinada de especies vegetales resistentes, organismos vivos y aditivos del suelo como estrategia para disminuir la movilidad de contaminantes y el riesgo inherente en terrenos afectados por la minería. En el contexto particular de Morona Santiago, la metodología que presenta la adaptación inicial más prometedora consiste en la fitostabilización asistida; esto se debe a su capacidad intrínseca de fusionar el establecimiento de una cubierta vegetal, la gestión eficaz de la erosión, la fijación de contaminantes a través de las raíces y un proceso de revitalización biológica integral del sustrato edáfico.

La contribución científica primaria de este examen es la demarcación nítida que distingue entre investigaciones originarias, síntesis y materiales referenciales, esto intensifica el análisis metódico del conjunto documental. La información copiada indica la fitoextracción solamente encuentran cabida en sitios puntuales dotados de una táctica escrita para la recolección, movilización, descarte de la biomasa y monitorización de los lixiviados. Con relación al biochar y compuestos afines, su puesta en práctica debería restringirse a instancias en que se acredite fehacientemente su potencia para atenuar la traslación y no agravar la disponibilidad del mercurio.

La biota autóctona demuestra un prometedor potencial en lo referente a biorremediación sin embargo la efectividad de este recurso biológico no debería darse por sentado sin una evaluación diagnóstica contextualizada una cuantificación de los compuestos asimilables una ratificación a lo largo de las estaciones y una supervisión exhaustiva de las fuentes contaminantes. El procedimiento para su implementación obedece a una progresión sensata y metódica que abarca un diagnóstico inicial la cuidadosa selección de especies pertinentes la posterior extracción de microorganismos aislados experimentación en microcosmos la validación en condiciones controladas de invernadero y culmina en un ensayo a escala de parcela piloto guiado por la monitorización de parámetros químicos biológicos y de riesgo inherentes.

Las apremiantes restricciones de esta revisión abarcan la omisión de archivos originarios íntegros para escudriñar, la falta de anotación proactiva del protocolo, y la imperiosa urgencia de validar la recolección de datos por expertos ajenos e independientes previo a una solicitud oficial. Las indagaciones subsiguientes tendrían que dar primacía a experimentaciones en la Amazonía con observaciones climáticas cíclicas, la discriminación taxonómica del mercurio, el balance de la

masa total, la disposición confiable de la materia orgánica, y la colaboración activa de los colectivos.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad Estatal de Milagro y al programa de Maestría en Biotecnología por el acompañamiento académico.

Declaraciones editoriales

No hay fondos externos reportados.

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Miguel Ángel Osorio Rivera: él concibió los conceptos con minucia, puso en práctica una metodología de rigor, efectuó pesquisa documental escrupulosa, desplegó una curación de datos asidua, se entregó a análisis pormenorizados y se abocó a una redacción pulcra. Sandra

Elizabeth López Sampedro: ella lideró la búsqueda bibliográfica sistemática, procedió a la extracción de datos sin falla, garantizó una revisión metodológica meticulosa y realizó la edición académica de manera sublime. Diego Barzallo: la supervisión atenta, validación técnica experta, una revisión crítica minuciosa y la aprobación final definitiva.

La matriz de decisiones y evaluación de calidad de los 120 documentos fue entregada como Material suplementario S1, específicamente en el archivo titulado "Material suplementario Biorremediación de Suelos Impactados por Minería Aurífera. xlsx". Este compendio también contiene las ecuaciones, exportaciones y el registro de las decisiones tomadas.

Por tratarse de una revisión documental, no se trabajó con participantes humanos ni animales.

Se emplearon herramientas ofimáticas para la enmienda formal del manuscrito, la administración de las referencias bibliográficas, la revisión ortográfica, la consistencia documental y la verificación de las conexiones web. La demanda académica, la dilucidación de los descubrimientos y la corroboración de los orígenes documentales recaen en quienes redactan.

Referencias Bibliográficas

Acosta-Núñez, L. F., Mussali-Galante, P., Castrejón-Godínez, M. L., Rodríguez-Solís, A., Castañeda-Espinoza, J. D., & Tovar-Sánchez, E. (2025). In situ phytoremediation of mine tailings with high concentrations of cadmium and lead using *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae). *Plants*, 14(1), 69. <https://doi.org/10.3390/plants14010069>

Alves, A. R. A., Yin, Q., Oliveira, R. S., Silva, E. F., & Novo, L. A. B. (2022). Plant growth-promoting bacteria in phytoremediation of metal-polluted soils: Current knowledge and

- future directions. *Science of the Total Environment*, 838, 156435.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156435>
- Baethge, C., Goldbeck-Wood, S., & Mertens, S. (2019). SANRA, a scale for the quality assessment of narrative review articles. *Research Integrity and Peer Review*, 4, 5.
<https://doi.org/10.1186/s41073-019-0064-8>
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., & Ali, M. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An overview and outlook. *Chemosphere*, 287, 132369.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132369>
- Capparelli, M. V., Moulatlet, G. M., Abessa, D. M. S., Lucas-Solis, O., Rosero, B., Galarza, E., Tuba, D., Carpintero, N., Ochoa-Herrera, V., & Cipriani-Avila, I. (2020). An integrative approach to identify multiple metal contamination sources in the eastern Andean foothills of Ecuadorian Amazonia. *Science of the Total Environment*, 709, 136088.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136088>
- Castañeda-Espinoza, J., Salinas-Sánchez, D. O., Mussali-Galante, P., Castrejón-Godínez, M. L., Rodríguez, A., González-Cortazar, M., Zamilpa-Álvarez, A., & Tovar-Sánchez, E. (2022). *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae) as a phytoremediator for soils contaminated by heavy metals in abandoned mines. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 2509–2529. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22374-5>
- Chamba-Eras, I., Griffith, D. M., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. J. (2022). Native hyperaccumulator plants with differential phytoremediation potential in an artisanal gold mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11(9), 1186.
<https://doi.org/10.3390/plants11091186>
- Collaboration for Environmental Evidence. (2022). Guidelines and standards for evidence synthesis in environmental management: Version 5.1.
<https://environmentalevidence.org/information-for-authors/>
- Ghosh, D., & Maiti, S. K. (2021). Biochar assisted phytoremediation and biomass disposal in heavy metal contaminated mine soils: A review. *International Journal of Phytoremediation*, 23, 559–576. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1840510>
- González-Reguero, D., Robas-Mora, M., Probanza Lobo, A., & Jiménez Gómez, P. A. (2023). Bioremediation of environments contaminated with mercury: Present and perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39, 249.
<https://doi.org/10.1007/s11274-023-03686-1>
- Jensen, B. E., Spencer, B., & Xu, X. (2024). Utilizing biochars to stabilize mercury in contaminated floodplain sediment: Implications on mercury remediation. *Journal of Environmental Quality*. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20616>
- Jiménez-Oyola, S., Escobar Segovia, K., García-Martínez, M. J., Ortega, M., Bolonio, D., García-Garizabal, I., & Salgado, B. (2021). Human health risk assessment for exposure to potentially toxic elements in polluted rivers in the Ecuadorian Amazon. *Water*, 13(5), 613. <https://doi.org/10.3390/w13050613>

- Khalid, M., Ur-Rahman, S., Hassani, D., Hayat, K., Zhou, P., & Hui, N. (2021). Advances in fungal-assisted phytoremediation of heavy metals: A review. *Pedosphere*, 31, 475–495. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60091-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60091-1)
- Kumar, A., Kumar, V., Chawla, M., Thakur, M., Bhardwaj, R., Wang, J., O'Connor, D., Hou, D., & Rinklebe, J. (2024). Bioremediation of mercury contaminated soil and water: A review. *Land Degradation & Development*, 35(4), 1261–1283. <https://doi.org/10.1002/ldr.4989>
- Liu, L. W., Li, W., Song, W. P., & Guo, M. X. (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>
- Mestanza-Ramón, C., Jiménez-Oyola, S., Gavilanes Montoya, A. V., Castillo Vizuete, D. D., D'Orío, G., Cedeño-Laje, J., & Straface, S. (2023). Assessment of Hg pollution in stream waters and human health risk in areas impacted by mining activities in the Ecuadorian Amazon. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 7183–7197. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01597-6>
- Mussali-Galante, P., Gómez-Arroyo, S., Rodríguez-Solís, A., Valencia-Cuevas, L., Flores-Márquez, A. R., Castrejón-Godínez, M. L., & Tovar-Sánchez, E. (2024). Multi-biomarker approach reveals the effects of heavy metal bioaccumulation in the foundation species *Prosopis laevigata* (Fabaceae). *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 47116–47131. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34239-0>
- Mussali-Galante, P., Santoyo-Martínez, M., Castrejón-Godínez, M. L., Breton-Deval, L., Rodríguez-Solís, A., Valencia-Cuevas, L., & Tovar-Sánchez, E. (2023). The bioaccumulation potential of heavy metals by *Gliricidia sepium* (Fabaceae) in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 38982–38999. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24904-7>
- O'Callaghan, M., Ballard, R. A., & Wright, D. (2020). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*, 38, 1340–1369. <https://doi.org/10.1111/sum.12811>
- O'Connor, D., Hou, D., Ok, Y. S., Mulder, J., Duan, L., Wu, Q., Wang, S., Tack, F. M. G., & Rinklebe, J. (2019). Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review. *Environment International*, 126, 747–761. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.019>
- 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. (2021a). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Page, M. J., Moher, D., 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., ... McKenzie, J. E. (2021b). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance

- and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Priya, A. K., Gnanasekaran, L., Dutta, K., Rajendran, S., Balakrishnan, D., & Soto-Moscoso, M. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307, 135957.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135957>
- Rivera-Parra, J. L., Beate, B., Diaz, X., & Ochoa, M. B. (2021). Artisanal and small gold mining and petroleum production as potential sources of heavy metal contamination in Ecuador: A call to action. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2794. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062794>
- Rosas-Ramírez, M., Tovar-Sánchez, E., Rodríguez-Solís, A., Flores-Trujillo, K., Castrejón-Godínez, M. L., & Mussali-Galante, P. (2024). Assisted phytoremediation between biochar and *Crotalaria pumila* to phytostabilize heavy metals in mine tailings. *Plants*, 13, 2516. <https://doi.org/10.3390/plants13172516>
- Santoyo-Martínez, M., Mussali-Galante, P., Hernández-Plata, I., Valencia-Cuevas, L., Rodríguez, A., Castrejón-Godínez, M. L., & Tovar-Sánchez, E. (2024). Phytoremediation potential of *Crotalaria pumila* (Fabaceae) in soils polluted with heavy metals: Evidence from field and controlled experiments. *Plants*, 13(14), 1947. <https://doi.org/10.3390/plants13141947>
- Song, J., Brookes, P. C., Shan, S., Xu, J., & Liu, X. (2022). Effects of remediation agents on microbial community structure and function in soil aggregates contaminated with heavy metals. *Geoderma*, 425, 116030. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116030>
- Tahir, M., Khan, M. B., Shahid, M., Ahmad, I., Khalid, U., Akram, M., Dawood, A., & Kamran, M. (2022). Metal-tolerant *Pantoea* sp. WP-5 and organic manures enhanced root exudation and phytostabilization of cadmium in the rhizosphere of maize. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 6026–6039. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16018-3>
- Tu, C., Wei, J., Guan, F., Liu, Y., Sun, Y. H., & Luo, Y. M. (2020). Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil. *Environment International*, 137, 105576.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105576>
- Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020a). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment International*, 134, 105281.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>
- Wang, X., Hu, K., Xu, Q., Lu, L. F., Liao, S. J., & Wang, G. J. (2020b). Immobilization of Cd using mixed *Enterobacter* and *Comamonas* bacterial reagents in pot experiments with *Brassica rapa* L. *Environmental Science & Technology*, 54, 15731–15741.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03114>
- Wu, C., Tang, D., Dai, J., Tang, X., Bao, Y., Ning, J., Zhen, Q., Song, H., St Leger, R. J., & Fang, W. (2022). Bioremediation of mercury-polluted soil and water by the plant symbiotic fungus *Metarhizium robertsii*. *Proceedings of the National Academy of*

Sciences of the United States of America, 119(47), e2214513119.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2214513119>

Zhao, W., Gan, R., Xian, B., Wu, T., Wu, G., Huang, S., Wang, R., Liu, Z., Zhang, Q., Bai, S., Fu, M., & Zhang, Y. (2024). Overview of methylation and demethylation mechanisms and influencing factors of mercury in water. *Toxics*, 12(10), 715.

<https://doi.org/10.3390/toxics12100715>

Contribuciones de los autores:

Miguel Ángel Osorio Rivera: Conceptualización del estudio, supervisión del proyecto, validación científica y revisión crítica del manuscrito.

Sandra Elizabeth López Sampedro: Diseño metodológico, validación de contenidos, revisión crítica, corrección académica y gestión del proyecto.

Diego Barzallo: Investigación, búsqueda y recopilación bibliográfica, análisis de la literatura científica y redacción del borrador original.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés