# Aplicaciones de microorganismos en la biorremediación de suelos mineros contaminados con metales pesados

## Microorganism application as a tool for bioremediation of mining soil contaminated with heavy metals

Gabriel Solís-Ramírez[1], María Jesús Ruiz-González[2], Jimena Arguedas-Castro[3], Juan David Bolaños-Acosta[4], Adrián Navarro-Quesada[5]

*Fecha de recepción: 8 de diciembre, 2025*
*Fecha de aprobación: 21 de abril, 2026*

Solís-Ramírez, G; Ruiz-González, M.J; Arguedas-Castro, J; Bolaños-Acosta, J.D; Navarro-Quesada, A. Aplicaciones de microorganismos en la biorremediación de suelos mineros contaminados con metales pesados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 77-90.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8339

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
g.solis.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0008-9425-8091
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
m.ruiz.1@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0000-1358-8999
3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
j.arguedas.3@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0008-3546-2754
4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
j.bolanos.3@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0006-9156-8620
5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
adriannq@estudiantec.cr
https://orcid.org/0009-0002-3422-9850

## Palabras clave

Bioabsorción; biomineralización; biotransformación; fijación; lixiviación.

## Resumen

La minería industrial, tanto como la artesanal, suelen acarrear un considerable daño ambiental que puede verse agravado debido a la contaminación residual en el área. Entre los contaminantes más persistentes se encuentran los metales pesados, los cuales pueden contribuir a una toxicidad del suelo que previene la actividad biológica. La biorremediación, a través del uso de microorganismos como *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, o *Mucor sp.* se muestra como una tecnología prometedora. A través de mecanismos como la biotransformación o la biosorción, estos microorganismos son capaces de transformar metales en especies menos nocivas, fijarlos a través de moléculas externas, o incluso absorberlos en su interior permitiendo la recuperación de la actividad biológica en el ecosistema. También se ha observado el amplio potencial para eficientizar dichos procesos a través de técnicas de mejoramiento genético, abriendo una valiosa área de acción para investigaciones biotecnológicas. Estudios acerca de la aplicación de microorganismos en la biorremediación de metales pesados en terrenos de explotación agrícola, o cuerpos de agua demuestran su potencial y sientan las bases para extender su aplicabilidad en otros contextos de contaminación, como los suelos de explotación minera. Para este último caso, la evidencia disponible proviene principalmente de la bioprospección de cepas microbianas resistentes en el sitio, y su posterior evaluación en condiciones de laboratorio, por lo que su validación mediante ensayos a escala piloto representa la siguiente etapa en la línea de investigación.

## Keywords

Bioabsorption; biomineralization; biotransformation; fixation; leaching.

## Abstract

Industrial mining, as well as artisanal mining, often causes considerable environmental damage that can be exacerbated by residual contamination in the area. Among the most persistent pollutants are heavy metals, which can contribute to soil toxicity that hinders biological activity. Bioremediation, through the use of microorganisms such as Bacillus, Pseudomonas, or Mucor sp., is emerging as a promising technology. Through mechanisms such as biotransformation or biosorption, these microorganisms are capable of transforming metals into less harmful species, binding them through external molecules, or even absorbing them internally, allowing for the recovery of biological activity in the ecosystem. The broad potential to enhance these processes through genetic improvement techniques has also been observed, opening a valuable field of action for biotechnological research. Studies on the use of microorganisms for the bioremediation of heavy metals in agricultural lands or bodies of water demonstrate their potential and lay the groundwork for extending their application to other contaminated contexts, such as mining sites. Regarding the latter, available evidence stems primarily from the bioprospecting of resistant microbial strains at the site and subsequent laboratory evaluation; therefore, validation through pilot-scale trials represents the next stage in this line of research.

## Introducción

La minería ya sea industrial o artesanal es un sector productivo de gran importancia en múltiples economías alrededor del globo [1]. Sin embargo, esta industria se asocia con una destrucción a largo plazo del ambiente donde se lleva a cabo. La compactación del suelo, la desertificación, la pérdida de actividad biológica, emisiones de efecto invernadero, lluvia ácida, y contaminación por metales pesados son solo algunos de los fenómenos que se asocian con la actividad minera [2-4]. Uno de los factores más persistentes que llevan a que estos ecosistemas no se logren recuperar, es la presencia de metales pesados, por lo que los esfuerzos de remediación contribuyen a restaurar estas regiones [5].

De manera general, los metales pesados son un grupo de metales con una alta densidad, además de un elevado número atómico [6]. Estos elementos se pueden dividir entre metales esenciales como el hierro, el zinc, o el manganeso; y metales tóxicos como el plomo, el cadmio, o el arsénico [7]. Para fines de este documento, sólo se hará hincapié en metales tóxicos aunque no es de olvidarse que incluso, en concentraciones elevadas, los metales esenciales pueden llegar a ser tóxicos [8]. En un amplio rango de industrias, la liberación de metales pesados, se puede dar en forma de subproductos o como reactivos importantes para la realización de distintas actividades, aunado a su capacidad de acumularse indefinidamente en el ambiente [9] y su nocividad tanto para organismos animales, como vegetales [10][11].

La biorremediación de metales pesados corresponde a un proceso de gran importancia en la investigación científica reciente, que corresponde a remover, inmovilizar y desintoxicar el ambiente contaminado mediante organismos como lo pueden ser bacterias, hongos, cianobacterias y otros [12]. Por ejemplo, algunas comunidades microbianas poseen metabolismos distintos que permiten la formación de sustancias orgánicas a la vez que interactúan con metales tóxicos, mientras que otros participan en la liberación de nanopartículas naturales que ayudan a reducir la concentración de contaminantes en el medio. El estudio de estos microorganismos para su uso como biocatalizadores en la transformación de contaminantes en el suelo conlleva a investigaciones y conocimiento más amplio en genómica, transcriptómica, biología sintética y otros, que ofrecen a la biotecnología un área de acción para la creación de sistemas biológicos complejos que permitan recuperar la salud del suelo [13].

## Metodología

Para la presente revisión sistematizada se consultaron únicamente fuentes publicadas en los últimos 10 años dándole prioridad a las fuentes pertinentes más recientes. Se consultaron las bases de datos de Google Scholar, Science Direct, y SciELO además de numerosos repositorios universitarios utilizando palabras clave como “bioremediation”, “heavy metal contamination”, “microbial consortia”, “mining industry”, “remediation”, “bioremediation mechanisms”, “lixiviation”, “bioleaching”, “genetic engineering”, “bioaccumulation”, “biosorption”, “biotransformation”, “biomineralization”, “policies”, “legislation”, y sus complementarios en español. Además se realizó investigación de seguimiento con la bibliografía relevante de las fuentes citadas siempre limitándose al marco de tiempo definido. Se excluyó literatura la cual no se encontrara indexada en una de las fuentes anteriormente mencionadas.

En lo referente a la legislatura, convenios, y políticas pertinentes al área de la biorremediación en casos de aplicación a suelos con contaminación minera, se realizó un sondeo en Google, y la base de datos de la Asamblea Legislativa de Costa Rica, además de bases de datos de otros organismos como la ONU haciendo uso de palabras clave como “policies”, “legislation”, “bioremediation”, “heavy metal contamination”, “mining industry”, “industrial contamination” y sus complementarios en español. En lo que concierne a estas fuentes, se ignoró el marco de

tiempo definido de 10 años considerando que en muchos casos, la política vigente puede ser antigua o estar desactualizada. Se excluyeron aquellas fuentes que no aplicaran a los temas del estudio.

## Contaminantes de la explotación minera, microorganismos y consorcios

Dentro de los principales contaminantes de la explotación minera alrededor del mundo se encuentran el Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Fe y Ni; los cuales han sido encontrados y analizados en lugares como el Amazonas, Ecuador, Corea y Marruecos. Estos contaminantes metálicos no solo representan una amenaza inmediata para la salud humana, sino que también deterioran ecosistemas enteros. Desde 1989 hasta el 2020, se pudo evidenciar un claro enriquecimiento metálico en áreas de minería en la cuenca amazónica, con concentraciones hasta 100 veces superiores a los valores de fondo natural, superando los estándares internacionales de calidad ambiental tanto acuática como de sedimento; dentro de los contaminantes principales, en mayor volumen se encuentra el mercurio. Es ampliamente utilizado en procesos de amalgamación en la minería artesanal. Al liberarse al ambiente se acumula en organismos acuáticos, transfiriéndose a lo largo de la cadena alimentaria, incluído el consumo de peces por los habitantes de las zonas dependientes de estos alimentos, exponiéndose a posibles efectos neurológicos e inmunológicos [14][15].

Incluso en suelos contaminados por metales pesados u otros subproductos de la explotación minera, se ha observado la persistencia de actividad microbiológica tolerante [16]. Algunos microorganismos de suelo pueden contribuir a la remediación de contaminación por metales pesados, donde se destaca el uso de bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Geobacter*, *Streptomyces*, y *Ochrobactrum* [17]. Tal es el caso de *Mucor rouxii*, cuya biomasa ha demostrado capacidades de biosorción de cobre [18], además de cadmio, plomo, y níquel [19]. Otros ejemplos del uso de organismos fúngicos para la remediación de metales pesados incluye el uso de géneros como *Aspergillus*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Penicillium*, y *Coprinopsis* [20]. Por ejemplo el uso de *Aspergillus niger* para la remediación de cadmio y plomo [21][22]. También es de interés la capacidad de algunos de los microorganismos remediadores de formar consorcios para lograr una biorremediación más efectiva. Destacable es el caso de un consorcio conformado por *Achromobacter denitrificans*, *Klebsiella oxytoca*, y *Rhizobium radiobacter* el cual se ha observado, logra biorremediar cantidades considerables de Hg, Cd, Pb, y Ni por mecanismo de biosorción, inclusive llegando a observarse una mayor calidad de fijación de contaminantes al asociarse con la planta *Trifolium pratense L.* [23].

## Lixiviación

La lixiviación hace referencia al proceso en el cual los metales pesados presentes en fases sólidas del suelo se solubilizan y son arrastrados por el agua aprovechando la porosidad del suelo. Condiciones de pH ácido, una alta concentración de complejantes orgánicos e inorgánicos, y reacciones redox son típicos contribuyentes al movimiento de metales pesados en el suelo [24]. Cuando se habla de lixiviación generalmente se hace bajo una perspectiva negativa, sin embargo este proceso que ocurre por naturaleza también puede ser aprovechado para extraer los metales pesados de suelos contaminados, lo que se ha denominado como biolixiviación [25]

Se ha logrado utilizar microorganismos como *Acidithiobacillus spp*. para la biolixiviación de suelos mineros. Estos organismos producen sustancias, como ácido sulfúrico, que ayudan a aumentar la solubilidad de otros sulfuros metálicos, mientras que hongos y algunas bacterias heterótrofas producen ácidos orgánicos y surfactantes que ayudan a movilizar metales pesados, los cuales luego pueden ser recuperados [24].

Por otro lado, otra estrategia es contener los metales pesados para disminuir la cantidad de los mismos que se pueda lixiviar, por lo que se enfatiza más su inmovilización. Al aumentar la capacidad de intercambio catiónico del suelo, junto con el pH, mediante el uso de productos como el biochar, se disminuye la disponibilidad y movilidad de los metales [26]. Combinar esta estrategia con otros materiales como compost o minerales activos resultó en sinergias positivas, lo que disminuye la concentración de metales en el agua del suelo, lo que a su vez ayuda a la fitoestabilización [27][28].

En casos específicos de drenaje de minas, se ha realizado una lixiviación intensiva de metales mediante la oxidación de sulfuros. Para esto se utilizan bacterias reductoras de sulfato que ayudan a precipitar los metales en forma de sulfuros más estables, lo que causa un aumento en el pH de la zona trabajada [29][30].

La lixiviación y la biorremediación trabajan de forma sinérgica para disminuir la contaminación por metales pesados: la lixiviación controlada ayuda a movilizar los metales, los cuales son luego extraídos mediante otros mecanismos de biorremediación como la bioacumulación, o la biosorción, evitando que los minerales residuales en el suelo que no lograron recuperarse, sean absorbidos por otros organismos [31].

## Biotransformación y Biomineralización

La biotransformación es el mecanismo a través del cual un organismo es capaz de alterar un compuesto, para aprovecharlo, o neutralizarlo [32]. Para lograr este objetivo, existen múltiples rutas tales como la biomineralización mediada por enzimas, a través de la cual se convierte un metal de una forma tóxica a una menos nociva, que, a su vez, se trata de uno de los métodos más comunes y eficientes para la eliminación de metales pesados [12]. Esto se puede ver por ejemplo en bacterias aeróbicas resistentes al mercurio, que pueden transformarlo de su forma $CH_3Hg^+$ a su forma elemental Hg(II), la cual es 100 veces menos tóxica en el ecosistema [33]. Esto, por lo tanto, también facilita su eliminación de cuerpos de agua y suelos [34]. Otro mecanismo de biotransformación en el marco de la biorremediación, puede ser la bioprecipitación, a través de la cual, un organismo fija moléculas dañinas en forma de quelatos, aislándolos y neutralizándolos [23].

Los hongos, bacterias, y otros microorganismos del suelo permiten la formación de moléculas bioaprovechables, al alterar las propiedades físicas y químicas de los compuestos tóxicos [35]. La actividad bacteriana, inicialmente, es clave en los procesos de biomineralización. Las bacterias reductoras de sulfatos son bacterias anaerobias que usan los sulfatos como aceptor de electrones, por tanto, pueden formar precipitados insolubles con metales contaminantes disueltos en el suelo al reducir sulfato ($SO_4^{2-}$) a sulfuro ($S^{2-}$) [36]. Estas han demostrado actividad eficaz con metales pesados como zinc, níquel, cadmio, manganeso, hierro, plomo, cobre y cromo [34][37][38]. Algunas bacterias que cumplen con esta actividad son las pertenecientes a los géneros *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum* [39].

Otras bacterias, como *Bacillus* y *Comamonas*, participan en procesos de precipitación de carbonatos inducida por microbios. Estas son conocidas por ser bacterias con acción ureolítica, lo cual, las convierte en un mecanismo eficaz en la degradación de la urea a través de enzimas ureasas, resultando en amoniaco y dióxido de carbono que, al disolverse en

agua, forma ácido carbónico [40]. Esta reacción aumenta el pH y desplaza el equilibrio del carbonato, formando iones que reaccionan con metales como zinc, níquel, y cadmio para formar minerales insolubles [41]. Se ha encontrado que el mineral producto de la precipitación (polimorfos de carbonato como calcita, dolomita, vaterita, entre otros) depende de factores tanto bióticos como abióticos más que del proceso metabólico de las bacterias [42]. El papel de los hongos en la precipitación por carbonatos también es de gran importancia. Hongos como *Rhodotorula sp.* utilizan enzimas como la anhidrasa carbónica, que cataliza la hidratación y deshidratación del dióxido de carbono en ácido carbónico, elevando el pH y facilitando la precipitación de sales [43]. Este proceso también se puede dar con otro tipo de procesos metabólicos, como fotosíntesis, fijación de nitrógeno, reducción de sulfatos o reducción de nitrato, entre otros [44]. Otros hongos, como descomponedores de la madera (*Serpula himantioides, Serpula lacrymans, Coniophora puteana, Antrodia xantha*), tienen la capacidad de formar oxalatos de metales insolubles como plomo, cobre y manganeso debido a que producen ácido oxálico, lo que ofrece un potencial de investigación importante [45].

Seguidamente, la precipitación por fosfatos es otro método importante de mineralización inducido por bacterias como *Bacillus megaterium, Enterobacter sp.* y *Pseudomonas sp.* [46-48]. Los microorganismos secretan fosfatasas que hidrolizan fuentes de fósforo, generando fosfato ($PO_4$), capaz de reaccionar con metales y formar, nuevamente, sales de fosfato cuya solubilidad es mucho menor a los minerales de carbonato [46]. La precipitación por fosfatos es mucho menor en este caso, pero se considera que tiene mayor estabilidad mineral y puede inmovilizar metales como cadmio, cobre, plomo, zinc y uranio [49].

## Biosorción y bioacumulación

La biosorción es la capacidad que posee la materia orgánica, ya sea viva o muerta, de incorporar en sí misma metales pesados gracias a procesos físico químicos de absorción, adsorción y desorción [50]. Estos procesos son adaptables para múltiples organismos, pues no es necesario que estos estén vivos para cumplir la función de aislante o “encapsulantes biológicos” [51], entre los más utilizados están los hongos, con los cuales en los últimos años se han obtenido resultados alentadores respecto a la biorremediación en metales pesados como el cadmio, plomo, mercurio, zinc o selenio [52].

Ejemplos de biosorción son los estudios de Vallejo Aguilar *et al* [50], de R. Sharma *et al* [53] o de Rozman [54], donde se pusieron a prueba hongos como *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum, Talaromyces islandicus* y *Aspergillus terreus* con soluciones con Pb, Cr y Cd disueltos. En pruebas con estos metales se obtuvieron porcentajes de fijación de hasta un 80% o más (según el tratamiento), a excepción del tratamiento con cadmio de Vallejo, en donde tan solo se eliminó un 2,25% debido a la presencia de otro ión metálico, con el cuál se presentó “antagonismo de biosorción”. Por el otro lado, Vallejo Aguilar *et al* también indicó que no se obtuvieron concentraciones de plomo y cromo en medio sólido capaces de inhibir el crecimiento de las hifas del hongo, lo que aumenta su valor en la biosorción, pues presentará una mayor cantidad de biomasa para ser aprovechada.

Como se mencionó previamente, existen varios factores que determinan la capacidad de biosorción según la materia orgánica y el metal. El pH destaca pues puede solubilizar iones metálicos y generar una menor competencia, sin embargo, dependerá de organismos en específico. Si se trabaja con bacterias, lo ideal son medios neutros o alcalinos [55], mientras que los hongos, se beneficiarán más en medios ácidos. Otros dos factores relevantes son el tiempo y la concentración de materia orgánica, pues ante su aumento, se obtendrá un incremento en la captación del metal hasta su saturación (no es posible absorber más de forma externa) [56]. Esta capacidad de absorción se atribuye a la cantidad de grupos funcionales como alcoholes,

carbonilos y aminas, pues al tratarse de iones metálicos, poseen carga positiva, capaz de enlazarse con los grupos, generando sales metálicas [52]. La biosorción no solo se limita al reino fungi, pues las bacterias también son capaces de actuar como "biocápsulas". El uso de *Bacillus cereus*, *Acinetobacter sp.*, *Micrococcus sp.*, *Rhodococcus opacus*, entre otros, para captar metales, logrando una remoción del medio de hasta un 90% [57-60].

Estos resultados resaltan las altas capacidades que tienen los organismos para ser utilizados como agentes biorremediadores y la ventana de oportunidades para generar programas de tratamiento de residuos. Nuñez [52], incluso propuso diseños de compostaje a base de residuos urbanos. A pesar de ello, se debe tomar en cuenta el acceso por parte de compañías a este tipo de tecnologías y realizar una comparación entre costos y beneficios previo a su implementación [61].

Por otro lado, existe la bioacumulación, también llamada biosorción dependiente del metabolismo. Este proceso se entiende como la acumulación en un organismo, de sustancias nocivas hasta el punto en que estas superan la concentración ambiental. Este fenómeno radica en la excreción de las moléculas nocivas ocurriendo a un ritmo menor que su absorción, lo que lleva a un incremento en su concentración dentro del organismo [5]. Este proceso, a diferencia de la biosorción, requiere la inversión de energía por parte del organismo, pues muchas veces está ligado a la biotransformación de estas sustancias a moléculas menos tóxicas [62] [63]. En este campo destacan las bacterias extremófilas, pues son capaces de desarrollarse en ambientes con niveles extremos de pH (muy ácidos o muy alcalinos) y con presencia de sustancias tóxicas. Ejemplos de estas son la *T. ferrooxidans*, bacteria capaz de oxidar el hierro y el azufre inorgánico para obtener energía, además de otras especies como *A. indicireducens*, *A. pelagium*, *Fontibacter sp.*, *P. donghaensis* y *Bacillus subtilis,* capaces de acumular metales como Cd, Cr, Cu, Fe, Pb o Zn [64].

La bioacumulación, al conllevar una inversión metabólica por parte de la célula, requiere a su vez que esta se encuentre viva y en buena condición. Además, es posible que el organismo pueda seguir creciendo a medida que absorbe metales, mas, únicamente si se logra sustentar adecuadamente, pues estos iones ingresan por las mismas vías que sus nutrientes esenciales [65]. Para cumplir con esto, los organismos deben poder cambiar el estado iónico de los metales, procesos que permiten su solubilización de estos, para posteriormente sufrir reacciones de oxido-reducción, quelación, metilación, entre otros para pasar de un estado de oxidación más alto a uno menor. Por ejemplo, *Thiobacillus ferroxidans* y *T. thiooxidans* son capaces de realizar oxidación enzimática de metales como el uranio.

El primer paso de la bioacumulación consiste en el "secuestro extracelular", donde moléculas como citrato, ácido oxálico, glomalina, polifenoles y otras ajenas a la membrana celular salen al espacio extracelular e interaccionan con metales pesados [5]. A partir de este punto, entran en juego vias para el ingreso a la célula a través de la membrana, donde actúan sideróforos, canales de iones, endocitosis, permeabilidad compleja y de lípidos, entre otros, según la sustancia a ingresar [66][67].

Durante la bioacumulación, la célula no sale ilesa, se producen reducciones en la actividad enzimática, interrupciones en el ciclo celular e incluso daños en el ADN [13]. Por esta razón, se han aplicado estudios para unir a dos organismos con gran capacidad de biorremediación, hongos o bacterias con plantas. Muchos de estos organismos (como hongos endógenos) son capaces de promover el crecimiento de la planta hospedera, a la par que permitir una mejor absorción y tolerancia a metales como el Pb, Cd, o Hg [68][69].

## Potencial de mejoramiento genético

Gracias al desarrollo de la ingeniería genética y herramientas afines, se han podido aprovechar los microorganismos genéticamente modificados para la biorremediación de metales. Para esto, se han empleado técnicas como la sobreexpresión de proteínas o péptidos, alteración de rutas redox en bacterias, y diseño de biosensores, junto con estrategias híbridas, para optimizar los procesos de inmovilización, transformación y recuperación de metales pesados del ambiente.

La expresión de metalotioneínas ha sido un tema altamente explotado para la biorremediación de suelos, siendo un ejemplo claro del potencial de mejoramiento genético. Las metalotioneínas son proteínas ricas en cisteína que poseen una alta afinidad por los metales pesados como cadmio y plomo, lo que las vuelve extremadamente útiles en la biorremediación de metales pesados mediante la quelación de metales. Estas son conocidas por su gran capacidad antioxidante debido a su contenido de grupos sulfhidrilo. Estos grupos sulfhidrilo junto con la cisteína poseen un rol crucial en la quelación de metales [70]. La incorporación de los genes codificantes de metalotioneínas en bacterias en estudios de laboratorio ha logrado mejorar la capacidad de captura de estos metales pesados, así como aumentar la tolerancia celular a metales pesados bajo condiciones tóxicas. Se ha logrado evidenciar un aumento significativo de la adsorción de cadmio en *Escherichia coli* mediante la expresión superficial de metalotioneínas [71]. Por otra parte, se ha sistematizado el uso de péptidos derivados de estas proteínas, ya que han demostrado potencial para aplicaciones en entornos más complejos fuera del laboratorio, como la biorremediación de suelos [72]. Se ha comprobado el potencial del uso de cepas probióticas para la expresión de metalotioneínas recombinantes para disminuir la biodisponibilidad de cadmio en modelos biológicos, lo que demuestra su aplicabilidad en microbios de rizosfera [73]. Otro complemento para la expresión de metalotioneínas es el uso de materiales como nanopartículas de selenio (Se) para potenciar la captura de de plomo y cadmio, aplicables a diversas condiciones ambientales [74]. Estas proteínas permiten modificar organismos que las aprovechen y sean aplicables a la biorremediación de diferentes ambientes.

Por otro lado, un ejemplo claro del uso de técnicas de mejoramiento se evidencia en el uso de péptidos quelantes sintéticos, los cuales son pequeñas cadenas de aminoácidos con alta afinidad por iones metálicos gracias a la presencia de grupos funcionales como cisteína, histidina, ácido glutámico, y ácido aspártico. Debido a su afinidad por los iones metálicos, se pueden seleccionar, e incluso diseñar, péptidos específicos que maximicen su afinidad por algún metal a biorremediar, como por ejemplo el cadmio [72]. Se han utilizado bibliotecas de "phage display" para seleccionar el péptido más idóneo, el cual luego es expresado en la superficie de una levadura lo que maximiza la biosorción [75].

La biorremediación también se puede dar mediante el aprovechamiento de las rutas redox bacterianas, las cuales pueden ser modificadas para que transformen especies altamente tóxicas en formas menos móviles y dañinas. Con esta estrategia se ha trabajado principalmente con cromo presente en suelos contaminados por minería, mediante la aceleración de la reducción del mismo de Cr(VI) a Cr(III), una versión menos soluble. Esto se logra mediante la sobreexpresión de reductasas específicas, como ChrR y YieF [76]. Se han encontrado cepas bacterianas capaces de mantener una reducción rápida y eficiente incluso en presencia de una gran gama de metales, como generalmente se encuentran en los suelos mineros [77]. Se encontró que la manipulación del operón Ars permite la creación de bacterias que ayudan a la detoxificación del arsénico (As), funcionando como biosensores ambientales [78]. Estos biosensores junto con los circuitos genéticos son un gran área de innovación aplicable a la biorremediación de suelos. Estos circuitos están basados en promotores sensibles a metales, entre los cuales destacan ArsR para el arsénico, MerR para mercurio (Hg), y CzcD para el cobalto (Co). Estos activan genes específicos cuando existe la presencia de los contaminantes y reducen la carga metabólica [79].

En suelos afectados por drenaje ácido, se han aprovechado microorganismos acidófilos para movilizar metales pesados. Entre ellos destaca *Acidithiobacillus ferrooxidans,* cuya capacidad para crecer en pH bajos y tolerar altas concentraciones de metales pesados como hierro, cobre y zinc se pueden aprovechar en estrategias de mejoramiento genético. Esta resistencia se deriva de adaptaciones genómicas que incluyen genes asociados al manejo de metales como el operón Mer y diversos transportadores de flujo, junto con la síntesis de hopanoides y antiportadores Na+/H+ que mantienen la homeostasis celular en ambientes altamente ácidos [80].

Se ha profundizado en la implementación de estrategias híbridas combinando microorganismos modificados con la aplicación de diversos materiales. Entre estas combinaciones destacan la utilización de *Bacillus cereus* junto con biochar para disminuir la disponibilidad de metales en suelos de mina fosfatada, y también contribuye a una mejor diversidad microbiana mediante la influencia en la regulación de genes de resistencia a metales entre los que destacan zitB, czcD, zntA y cmtR [81]. Asimismo, se ha determinado que el biochar ayuda a regular el pH, la capacidad de intercambio catiónico, y la porosidad del suelo, lo que ayuda a crear mejores condiciones para los microorganismos que se insertan en el suelo [82].

A pesar del potencial de las estrategias de mejoramiento genético para la biorremediación de metales pesados, su aplicación en ecosistemas mineros abiertos representa un desafío de bioseguridad y regulación ambiental, ya que la liberación deliberada de microorganismos recombinantes conlleva riesgos ecológicos difíciles de predecir y de revertir una vez que el microorganismo se ha establecido en el ambiente [83]. A nivel internacional, el Convenio Sobre la Diversidad Biológica (CDB) en su artículo 8(g) exige a los Estados Parte establecer o mantener medios para regular, administrar, o controlar los riesgos derivados de la liberación de organismos modificados biotecnológicamente que puedan tener efectos adversos sobre la diversidad biológica [84].

En el caso de Costa Rica, este mandato es puesto en efecto mediante la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio) [85], creada mediante la Ley de Protección Fitosanitaria N°7664 [86] y su reglamento (Decreto Ejecutivo N°26921-MAG) [87], así como de las garantías de seguridad ambiental establecidas en la Ley de Biodiversidad N°7788 [88]. Bajo esta normativa se dispone la creación de mecanismos para regular la liberación de organismos genéticamente modificados con el fin de proteger la integridad de los ecosistemas. Sin embargo, el alcance operativo de estos instrumentos limitan explícitamente su aplicación a organismos vivos modificados de uso agrícola, sin contemplar un procedimiento equivalente para la liberación de microorganismos modificados con fines de remediación ambiental en sitios de exploración minera, lo que deja un vacío normativo para la eventual implementación de estas estrategias en el país.

## Conclusión

A partir de la evidencia revisada, los microorganismos tanto de forma individual como en consorcio demuestran un potencial considerable para la biorremediación de metales pesados mediante mecanismos como la biosorción, la biotransformación, la bioacumulación, y biomineralización. Gran parte de esta evidencia proviene de estuarios en terrenos de explotación agraria, cuerpos de agua contaminados, o de ensayos a escala de laboratorio. Sin embargo, esto no representa una incompatibilidad de métodos, ya que estas mismas técnicas de biorremediación pueden ser adaptadas para su aplicación en casos de contaminación en suelos mineros

El uso de bacterias como *Bacillus*, *Acinetobacter*, o *Thiobacillus*, así como hongos como *Pleurotus*, *Ganoderma*, o *Aspergillus*, junto con consorcios microbianos y asociaciones con plantas se han observado como estrategias efectivas a la hora de extraer, fijar, o neutralizar estos contaminantes que de otra manera contribuirían a la toxicidad del suelo.

Finalmente, es resaltable el amplio potencial de mejoramiento genético en gran medida inexplotado que podría llegar a eficientizar esta tecnología volviendola un mecanismo de remediación aún más práctico.

## Referencias

[1] A. K. Kirsanov y S.-S. Sh. Saaya, «Global mining in the 21st century: An overview», *J. Geogr. Cartogr.*, vol. 7, n.º 1, p. 6090, jun. 2024, doi: 10.24294/jgc.v7i1.6090.

[2] A. A. Tella y N. D. Nathaniel D. Danjibo, «The Environmental Impact of Mining Activities in the Local Community: A Structural Equation Modelling Approach», *IJSW*, vol. 11, n.º 1, p. 44, feb. 2024, doi: 10.5296/ijsw.v11i1.21747.

[3] W. Vilela-Pincay, M. Espinosa-Encarnación, and A. Bravo-González, "La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro," *Estudios de la Gestión*, no. 8, pp. 215–233, 2020.

[4] S. C. Pal et al., «Anthropogenic drivers induced desertification under changing climate: Issues, policy interventions, and the way forward», Progress in Disaster Science, vol. 20, p. 100303, dic. 2023, doi: 10.1016/j.pdisas.2023.100303.

[5] S. Verma, P. Bhatt, A. Verma, H. Mudila, P. Prasher, y E. R. Rene, «Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices», Clean Techn Environ Policy, vol. 25, n.º 5, pp. 1485-1507, jul. 2023, doi: 10.1007/s10098-021-02029-8.

[6] S. Kumari y A. Mishra, «Heavy Metal Contamination», en Soil Contamination - Threats and Sustainable Solutions, M. L. Larramendy y S. Soloneski, Eds., IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.93412.

[7] G. Abdel-Rahman, «Heavy metals, definition, sources of food contamination, incidence, impacts and remediation: A literature review with recent updates», Egypt. J. Chem., vol. 0, n.º 0, pp. 0-0, jul. 2021, doi: 10.21608/ejchem.2021.80825.4004.

[8] S. E. A. Abdel Haleem, «Management of Acute Ferrous Sulfate Poisoning Using Activated Charcoal Monotherapy: A Case Report», Cureus, dic. 2023, doi: 10.7759/cureus.49972.

[9] M. Vijaya Kumar y H. Prasad Raju, «Heavy Metals in the Environment: Sources, Fate, and Health Implications», en Groundwater Resource Management Planning Strategies, V. Sunitha, B. Muralidhara Reddy, Y. Sudharshan Reddy, M. Prasad, B. Pradeep Kumar, y E. Balaji, Eds., en Springer Water. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 135-153. doi: 10.1007/978-3-031-88870-0_5.

[10] I. Tahir y K. A. Alkheraije, «A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle», Front. Vet. Sci., vol. 10, p. 1149720, mar. 2023, doi: 10.3389/fvets.2023.1149720.

[11] S. Mitra et al., «Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity», Journal of King Saud University - Science, vol. 34, n.º 3, p. 101865, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.101865.

[12] S. Mallick, T. Pradhan, y S. Das, "Bacterial biomineralization of heavy metals and its influencing factors for metal bioremediation", *J Environ Manage*, vol. 373, p. 123977, ene. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123977.

[13] V. Pande, S. C. Pandey, D. Sati, P. Bhatt, y M. Samant, "Microbial Interventions in Bioremediation of Heavy Metal Contaminants in Agroecosystem", *Front. Microbiol.*, vol. 13, may 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.824084.

[14] A. Barakat, O. E. Harti, y W. Ennaji, «ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM HEAVY METALS IN SOILS SURROUNDING THE ABANDONED MINE OF TANSRIFT (CENTRAL HIGH-ATLAS, MOROCCO)», *The Journal Agriculture And Forestry*, vol. 68, n.º 2, jun. 2022, doi: 10.17707/agricultforest.68.2.16.

[15] G. M. Moulatlet *et al.*, «A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards», *Chemosphere*, vol. 339, p. 139700, jul. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139700.

[16] S.-J. Chun, Y.-J. Kim, Y. Cui, y K.-H. Nam, «Ecological network analysis reveals distinctive microbial modules associated with heavy metal contamination of abandoned mine soils in Korea», Environmental Pollution, vol. 289, p. 117851, nov. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117851.

[17] S. Verma, P. Bhatt, A. Verma, H. Mudila, P. Prasher, y E. R. Rene, «Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices», Clean Techn Environ Policy, vol. 25, n.º 5, pp. 1485-1507, jul. 2023, doi: 10.1007/s10098-021-02029-8.

[18] L. Dusengemungu, G. Kasali, C. Gwanama, y K. O. Ouma, «Recent Advances in Biosorption of Copper and Cobalt by Filamentous Fungi», Front. Microbiol., vol. 11, p. 582016, dic. 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.582016.

[19] T. A. Kurniawan et al., «Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions Using Biomaterials and/or Functional Composites: Recent Advances and the Way Forward in Wastewater Treatment Using Digitalization», J. Compos. Sci., vol. 7, n.º 2, p. 84, feb. 2023, doi: 10.3390/jcs7020084.

[20] N. Vaid, J. Sudan, S. Dave, H. Mangla, y H. Pathak, «Insight Into Microbes and Plants Ability for Bioremediation of Heavy Metals», Curr Microbiol, vol. 79, n.º 5, p. 141, may 2022, doi: 10.1007/s00284-022-02829-1.

[21] O. M. El-Mahdy, H. I. Mohamed, y A. M. Mogazy, «Biosorption effect of Aspergillus niger and Penicillium chrysosporium for Cd- and Pb-contaminated soil and their physiological effects on Vicia faba L.», Environ Sci Pollut Res, vol. 28, n.º 47, pp. 67608-67631, dic. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-15382-4.

[22] J. Qiu et al., «Experimental and modeling studies of competitive Pb (II) and Cd (II) bioaccumulation by Aspergillus niger», Appl Microbiol Biotechnol, vol. 105, n.º 16-17, pp. 6477-6488, ago. 2021, doi: 10.1007/s00253-021-11497-3.

[23] V. V. Atuchin, L. K. Asyakina, Y. R. Serazetdinova, A. S. Frolova, N. S. Velichkovich, y A. Yu. Prosekov, «Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals», Microorganisms, vol. 11, n.º 4, p. 864, mar. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11040864.

[24] E. K. Sarkodie *et al.*, "A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors," *Front. Microbiol.*, vol. 13, Dec. 2022. doi: 10.3389/fmicb.2022.1049277

[25] X. Zheng *et al.*, "Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 284, Oct. 2024, Art. no. 116883. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116883

[26] Z.-R. Gu *et al.*, "Research Progress on the Application of Biochar in the Remediation of Heavy Metals in Tailings Soil," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 33, no. 3, pp. 3123–3138, 2024, doi: 10.15244/pjoes/176043

[27] X. Nie *et al.*, "Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects," *Toxics*, vol. 12, no. 12, p. 872, 2024. doi: 10.3390/toxics12120872

[28] Chafik *et al.*, "Synergistic Effects of Compost and Biochar on Soil Health and Phytoremediation in Mining Wastes," *Agronomy*, vol. 15, no. 6, p. 1295, 2025. doi: 10.3390/agronomy15061295

[29] I. M. S. Anekwe and Y. M. Isa, "Bioremediation of Acid Mine Drainage – Review," *Alex. Eng. J.*, vol. 65, pp. 1047–1075, 2023. doi: 10.1016/j.aej.2022.09.053.

[30] C. Leng *et al.*, "Preparation and Screening of SRB Gel Particles Used for Acid Mine Drainage Treatment," *Processes*, vol. 12, no. 4, p. 704, 2024. doi: 10.3390/pr12040704.

[31] L. Xu *et al.*, "A Review on Remediation Technology and the Standards/Evaluation of Heavy Metal-Contaminated Soils," *Toxics*, vol. 12, no. 12, p. 897, 2024. doi: 10.3390/toxics12120897.bro

[32] R. Miglani et al., «Degradation of Xenobiotic Pollutants: An Environmentally Sustainable Approach», Metabolites, vol. 12, n.º 9, p. 818, ago. 2022, doi: 10.3390/metabo12090818.

[33] A. Saeid, L. Cepoi, M. Jastrzębska, y P. N. Nomngongo, «Bioremediation of Heavy Metal Ions Contaminated Soil», en Soil Bioremediation, 1.ª ed., J. A. Parray, A. H. Abd Elkhalek Mahmoud, y R. Sayyed, Eds., Wiley, 2021, pp. 87-114. doi: 10.1002/9781119547976.ch5.

[34] L. Liao, Q. Li, Y. Yang, R. Xu, y Y. Zhang, "Immobilization Behavior and Mechanism of Cd2+ by Sulfate-Reducing Bacteria in Anoxic Environments", *Water*, vol. 16, núm. 8, p. 1086, ene. 2024, doi: 10.3390/w16081086.

[35] B. Aytekin, A. Mardani, y Ş. Yazıcı, "State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties", *Construction and Building Materials*, vol. 378, p. 131198, may 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198

[36] S. Si, Y. Ke, B. Xue, Z. Zhang, y X. Zhu, "Immobilized sulfate reducing bacteria (SRB) enhanced passivation performance of biochar for Zn", *Science of The Total Environment*, vol. 892, p. 164556, sep. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164556.

[37] Y. Dong *et al.*, "Study on the Effectiveness of Sulfate Reducing Bacteria to Remove Heavy Metals (Fe, Mn, Cu, Cr) in Acid Mine Drainage", *Sustainability*, vol. 15, núm. 6, p. 5486, ene. 2023, doi: 10.3390/su15065486.

[38] BAKHTIAR y SUKOSO, "Use of sulfate-reducing bacteria and different organic fertilizer for bioremediation of ex-nickel mining soils", *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*, vol. 30, núm. 4, pp. 561–572, 2021, doi: 10.22630/PNIKS.2021.30.4.47.

[39] Y. Dong *et al.*, "Study on the effectiveness of sulfate-reducing bacteria to remove Pb(II) and Zn(II) in tailings and acid mine drainage", *Front. Microbiol.*, vol. 15, mar. 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1352430.

[40] D. Arias, K. Gallardo, M. Saldana, y F. Galleguillos-Madrid, "Urease-Driven Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) for the Circular Valorization of Reverse Osmosis Brine Waste: A Perspective Review", *Minerals*, vol. 15, núm. 5, p. 543, may 2025, doi: 10.3390/min15050543.

[41] A. Rajasekar *et al.*, "Removal of high concentrations of zinc, cadmium, and nickel heavy metals by Bacillus and Comamonas through microbially induced carbonate precipitation", *Biodegradation*, vol. 36, núm. 3, p. 40, may 2025, doi: 10.1007/s10532-025-10131-7.

[42 ] A. Rajasekar, S. Wilkinson, y C. K. S. Moy, "MICP as a potential sustainable technique to treat or entrap contaminants in the natural environment: A review", *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 6, p. 100096, abr. 2021, doi: 10.1016/j.ese.2021.100096.

[43] N. A. Awadeen, M. Eltarahony, S. Zaki, A. Yousef, S. El-Assar, y H. El-Shall, "Fungal carbonatogenesis process mediates zinc and chromium removal via statistically optimized carbonic anhydrase enzyme", *Microbial Cell Factories*, vol. 23, núm. 1, p. 236, ago. 2024, doi: 10.1186/s12934-024-02499-7.

[44] S. H. Shivaprakash y S. E. Burns, "Microbial interactions during carbonate biomineralization via urea hydrolysis metabolic pathway", *Acta Geotech.*, vol. 20, núm. 8, pp. 3929–3950, ago. 2025, doi: 10.1007/s11440-025-02609-8.

[45] D. Y. Vlasov, M. S. Zelenskaya, A. R. Izatulina, S. Y. Janson, y O. V. Frank-Kamenetskaya, "Oxalate Crystallization under the Action of Brown Rot Fungi", *Crystals*, vol. 13, núm. 3, p. 432, mar. 2023, doi: 10.3390/cryst13030432.

[46] Z.-F. Xue, W.-C. Cheng, M. M. Rahman, L. Wang, y Y.-X. Xie, "Immobilization of Pb(II) by *Bacillus megaterium*-based microbial-induced phosphate precipitation (MIPP) considering bacterial phosphorolysis ability and Ca-mediated alleviation of lead toxicity", *Environmental Pollution*, vol. 355, p. 124229, ago. 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124229.

[47] G. Zeng *et al.*, "The effect of phosphate solubilizing bacteria on the fate of cadmium immobilized by microbial induced phosphate precipitation", *J Environ Manage*, vol. 380, p. 125125, abr. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.125125.

[48] Y. Kato, S. Kimura, T. Kogure, y M. Suzuki, "Deposition of Lead Phosphate by Lead-Tolerant Bacteria Isolated from Fresh Water near an Abandoned Mine", *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, núm. 5, p. 2483, ene. 2022, doi: 10.3390/ijms23052483.

[49] D. Peng *et al.*, "Effect of phosphate-mineralized bacteria on multi-metals migration behavior in vanadium tailing slags: Coexistence of immobilization and mobilization", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 480, p. 135880, dic. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135880.

[50] M. L. A. Vallejo Aguilar *et al.*, «Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de Pleurotus ostreatus (Jacq. Ex Fr.) P. Kumm», *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 12, n.º 2, pp. 275-289, mar. 2021, doi: 10.29312/remexca.v12i2.2687.

[51] B. V. Tangahu, M. Berlianto, y A. A. G. Kartika, «Deconcentration of Chromium Contained in Wastewater Using a Bacteria and Microalgae Consortia with a High Rate Algal Reactor System», Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.jeeng.net/Deconcentration-of-Chromium-Contained-in-Wastewater-Using-a-Bacteria-and-Microalgae,126878,0,2.html

[52] W. E. Nuñez, D. A. Sotomayor, C. V. Ballardo, y E. Herrera, «Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales», *Scientia Agropecuaria*, vol. 14, n.º 1, pp. 79-91, ene. 2023, doi: 10.17268/sci.agropecu.2023.008.

[53] R. Sharma *et al.*, «Bioremediation potential of novel fungal species isolated from wastewater for the removal of lead from liquid medium», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 18, p. 100757, may 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100757.

[54] U. Rozman, G. Kalčíková, G. Marolt, T. Skalar, y A. Žgajnar Gotvajn, «Potential of waste fungal biomass for lead and cadmium removal: Characterization, biosorption kinetic and isotherm studies», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 18, p. 100742, may 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100742.

[55] E. Rojas, «Influencia del Nostoc commune en la biosorción in vitro de metales pesados en agua contaminada», feb. 2025, Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14597/9129

[56] S. Sundararaju, A. Manjula, V. Kumaravel, T. Muneeswaran, y T. Vennila, «Biosorption of nickel ions using fungal biomass Penicillium sp. MRF1 for the treatment of nickel electroplating industrial effluent», *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 12, n.º 4, pp. 1059-1068, abr. 2022, doi: 10.1007/s13399-020-00679-0.

[57] L. Pérez-Bou *et al.*, «Biosorción de cinc y cadmio por bacterias inactivadas pretratadas», *Minería y Geología*, vol. 37, n.º 1, pp. 90-104, mar. 2021.

[58] A. M. Rodrigues-Pimentel, P. Reynoso-Quispe, R. J. Cabello-Torres, y L. G. Valdiviezo-Gonzales, «Bioadsorción de Co(II) y Mn(II) en soluciones acuosas por la bacteria Rhodococcus opacus», *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 13, n.º 4, pp. 225-275, jul. 2022, doi: 10.24850/j-tyca-2022-04-05.

[59] J. V. Rodríguez Eugenio, «Biosorción de plomo mediada por consorcios microbianos en biorreactores Air Lift», 2024, Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14292/2871

[60] M. M. Cayllahua Ramos y L. Gonzales Carhuapoma, «BIOSORCIÓN DE COBRE (Cu) Y PLOMO (Pb) PROVENIENTES DE RELAVES MINEROS MEDIANTE EL USO DE BIOMASA MICROBIANA, MINA BUENAVENTURA - JULCANI», oct. 2020, Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3321

[61] M. A. F. Cerna, E. A. J. Segura, J. J. M. Fukomoto, J. S. M. O. Tantapoma, y O. H. R. Qusipe, «Tecnologías de biorremediación frente a métodos tradicionales para manejar los tratamientos de residuos industriales de países en desarrollo (2005 – 2025)», *Gestión de Operaciones Industriales*, vol. 4, n.º 1, pp. 48-59, ago. 2025, doi: 10.17268/goi4.0.2025.03.

[62] P. Carriquiriborde, *Biodisponibilidad, bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación de los contaminantes*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2021. Accedido: 28 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/131168

[63] A. Santana-Flores *et al.*, «Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México», *Terra Latinoamericana*, vol. 38, n.º 1, pp. 67-75, mar. 2020, doi: 10.28940/terra.v38i1.430.

[64] J. D. la C. Jiménez Venegas, «Bacterias extremófilas como herramienta para la remediación de relaves mineros», 2024, Accedido: 29 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/204305

[65] N. D. Nnaji, H. Onyeaka, T. Miri, y C. Ugwa, «Bioaccumulation for heavy metal removal: a review», *SN Appl. Sci.*, vol. 5, n.º 5, p. 125, abr. 2023, doi: 10.1007/s42452-023-05351-6.

[66] S. Pasricha, V. Mathur, A. Garg, S. Lenka, K. Verma, y S. Agarwal, «Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in hyperaccumulators», *Environmental Challenges*, vol. 4, p. 100197, ago. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100197.

[67] Z. Yang *et al.*, «Heavy metal transporters: Functional mechanisms, regulation, and application in phytoremediation», *Science of The Total Environment*, vol. 809, p. 151099, feb. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151099.

[68] W. Pietro-Souza *et al.*, «Mercury resistance and bioremediation mediated by endophytic fungi», *Chemosphere*, vol. 240, p. 124874, feb. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124874.

[69] R. Chaturvedi *et al*, «Harnessing Pisum sativum-Glomus mosseae symbiosis for phytoremediation of soil contaminated with lead, cadmium, and arsenic», *Int J Phytoremediation*, vol. 23, n.º 3, pp. 279-290, 2021, doi: 10.1080/15226514.2020.1812507.

[70] R. Yang, D. Roshani, B. Gao, P. Li, and N. Shang, "Metallothionein: A comprehensive review of its classification, structure, biological functions, and applications," *Antioxidants*, vol. 13, no. 7, Art. 825, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/antiox13070825

[71] H. He, Y. Tang, X. Li, et al., "Surface expression of metallothionein enhances bioremediation in *Escherichia coli*," *Desalination and Water Treatment*, vol. 317, p. 100070, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100070

[72] Y. Luo, Y. Zhang, Z. Xiong, X. Chen, A. Sha, W. Xiao, L. Peng, L. Zou, J. Han, and Q. Li, "Peptides used for heavy metal remediation: A promising approach," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 12, Art. 6717, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/ijms25126717

[73] C. Zou, Y. Chen, H. Li, W. Li, J. Wei, Z. Li, X. Wang, T. Chen, and H. Huang, "Engineered Bacteria EcN-MT Alleviate Liver Injury in Cadmium-Exposed Mice via its Probiotics Characteristics and Expressing of Metallothionein," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 13, 2022, Art. no. 857869, doi: https://doi.org/10.3389/fphar.2022.857869

[74] Z. Zhou, Y. Dong, L. Zhu, X. Xia, S. Li, G. Wang, and K. Shi, "Effective and stable adsorptive removal of cadmium(II) and lead(II) using selenium nanoparticles modified by microbial SmtA metallothionein," *Chemosphere*, vol. 307, p. 135818, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135818

[75] S. Wang, L. Shi, Y. Guo, H. Chen, and Z. Xu, "Enhanced biosorption of cadmium ions on immobilized surface-engineered yeast using cadmium-binding peptides," *Frontiers in Microbiology*, vol. 15, Art. no. 1496843, 2024. doi: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1496843

[76] N. N. Ramli, R. Omar, and S. C. Tan, "Bacterial metabolic pathways for Cr(VI) reduction: A review," *Chemosphere*, vol. 320, p. 138001, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127288

[77] P. Yin, Z. Wu, R. Lv, Z. Long, Y. Huang, T. Chen, X. Ye, Z. Zhu, and L. Zou, "Characteristics and mechanism of rapid Cr(VI) reduction and multiple heavy metal tolerance in *Cytobacillus firmus* isolated from chromium residue soil," *Chemical Engineering Journal*, vol. —, no. —, Art. 166268, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166268

[78] M. A. E. Naiel, E. S. Taher, F. Rashed, S. Ghazanfar, A. M. Shehata, N. A. Mohammed, R. Pascalau, L. Smuleac, A. M. Ibrahim, A. Abdeen, and M. Shukry, "The arsenic bioremediation using genetically engineered microbial strains on aquatic environments: An updated overview," *Heliyon*, vol. 17, p. e36314, 2024, doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36314

[79] S. Mathur, R. Sharma, and P. Gupta, "Genetic circuits in microbial biosensors for heavy metal detection," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, vol. 1866, no. 2, p. 194959, Feb. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.02.031

[80] T. Peng *et al.*, "Genomic and transcriptomic analyses reveal adaptation mechanisms of an Acidithiobacillus ferrivorans strain YL15 to alpine acid mine drainage," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 5, p. e0178008, May 2017, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178008

[81] Y. Zhang, J. Peng, Z. Wang, F. Zhou, J. Yu, R. Chi, and C. Xiao, "Metagenomic analysis revealed the bioremediation mechanism of lead and cadmium contamination by modified biochar synergized with *Bacillus cereus* PSB-2 in phosphate mining wasteland," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16, Art. no. 1529784, 2025, doi: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1529784

[82] P. Ouyang, M. Narayanan, X. Shi, X. Chen, Z. Li, Y. Luo, and Y. Ma, "Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils," *Sustainable Remediation*, vol. 5, Art. no. 63, 2023, doi: https://doi.org/10.1007/s42773-023-00265-3

[83] A. Lerner *et al.*, "Genetically Modified Microorganisms: Risks and Regulatory Considerations for Human and Environmental Health," *Microorganisms 2026, Vol. 14, Page 467*, vol. 14, no. 2, p. 467, Feb. 2026, doi: 10.3390/MICROORGANISMS14020467.

[84] Naciones Unidas, *Convenio sobre la Diversidad Biológica*, Río de Janeiro, 5 de junio de 1992, art. 8(g). [En línea]. Disponible en: https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf

[85] Ministerio de Agricultura y Ganadería, *Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio)*, Servicio Fitosanitario del Estado, Costa Rica. [En línea]. Disponible en: https://www.sfe.go.cr

[86] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, *Ley de Protección Fitosanitaria*, N.° 7664, 8 de abril de 1997. [En línea]. Disponible en: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=43939

[87] Ministerio de Agricultura y Ganadería, *Reglamento a la Ley de Protección Fitosanitaria*, Decreto Ejecutivo N.° 26921-MAG, 20 de marzo de 1998. [En línea]. Disponible en: https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=43150&nValor3=92975&strTipM=TC

[88] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, *Ley de Biodiversidad*, N.° 7788, 30 de abril de 1998. [En línea]. Disponible en: https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=39796&nValor3=74714&strTipM=TC

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *Claude* para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y la traducción de secciones. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado..