

Biorremediación Ambiental con Eucalipto: Una Alternativa Verde frente a los Relaves de la Minería Informal

Erik Cristian Suca Mancha ^{a1} Luis Fernando Quispe Apaza ^{a2} Edison Yordi Ilasaca Gomez ^{a3}

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

RESUMEN

La minería informal en el Perú ha generado un creciente problema ambiental debido a la acumulación de relaves mineros con altas concentraciones de metales pesados como plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu). Esta contaminación afecta gravemente la calidad del suelo, del agua y la salud de las comunidades cercanas. En este marco, el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) se presenta como una especie forestal con alto potencial para absorber, acumular y estabilizar metales pesados en su biomasa. Diversas investigaciones peruanas han demostrado su tolerancia a condiciones adversas en suelos contaminados, así como su capacidad para remover elementos tóxicos. En estudios realizados en relaves mineros de zonas altoandinas, *Eucalyptus globulus* ha mostrado buenos niveles de crecimiento, incluso sin mejoras en el sustrato, lo que lo convierte en un candidato ideal para programas de restauración ambiental. En conclusión, el eucalipto representa una solución verde y sostenible frente al problema de los suelos contaminados por relaves mineros. Su aplicación práctica puede contribuir significativamente a la recuperación de zonas degradadas por la minería informal, al tiempo que promueve un enfoque más responsable y regenerativo en la gestión ambiental del país.

Palabras clave: Eucalipto globulus, minería informal, contaminación minera, relaves.

ABSTRACT

Informal mining in Peru has generated a growing environmental problem due to the accumulation of mine tailings containing high concentrations of heavy metals such as lead (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd), and copper (Cu). This contamination seriously affects soil and water quality, as well as the health of nearby communities. In this context, eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) is presented as a forest species with a high potential to absorb, accumulate, and stabilize heavy metals in its biomass. Various Peruvian studies have demonstrated its tolerance to adverse conditions in contaminated soils, as well as its ability to remove toxic elements. In studies conducted on mine tailings in high Andean areas, *Eucalyptus globulus* has shown good growth rates, even without substrate improvements, making it an ideal candidate for environmental restoration programs. In conclusion, eucalyptus represents a green and sustainable solution to the problem of soils contaminated by mine tailings. Its practical application can significantly contribute to the recovery of areas degraded by informal mining, while promoting a more responsible and regenerative approach to the country's environmental management.

Keywords: *Eucalyptus globulus*, informal mining, mining pollution, tailings.

¹ Erik Cristian Suca Mancha
Tel.: 935 478 667
E-mail: 76985219@upeu.edu.pe

² Luis Fernando Quispe Apaza
Tel.: 917414517
E-mail: 74698689@upeu.edu.pe

³ Edison Yordi Ilasaca Gomez
Tel.: 935 458 545
E-mail: 75433607@upeu.edu.pe

1. Introducción

La minería informal, caracterizada por el desarrollo de actividades extractivas sin cumplir con los marcos legales ni ambientales establecidos, representa una de las principales amenazas ecológicas en regiones altoandinas como Puno (Perú). Esta práctica, particularmente intensa en zonas como Ananea, La Rinconada y Sandia, genera grandes volúmenes de relaves mineros que contienen metales pesados como mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd) y zinc (Zn). Estos residuos tóxicos afectan profundamente los ecosistemas locales, alteran la fertilidad del suelo, contaminan cuerpos de agua y representan un serio riesgo para la salud humana. (Llacta Condori, 2024)

Según (Enriquez Ludium, 2024) la remediación ambiental surge como una estrategia clave para restaurar suelos contaminados. Entre las distintas técnicas existentes —como la física o química—, la fitoremediación ha cobrado relevancia por ser una alternativa ecológica, de bajo costo y relativamente accesible para comunidades rurales. Esta técnica consiste en el uso de plantas con capacidad para absorber, estabilizar o transformar metales pesados, y ha sido ampliamente estudiada en especies nativas de los Andes, tales como *Bidens triplinervia*, *Mullinum spinosum* y *Muhlenbergia angustata*

El eucalipto (*Eucalyptus globulus*) —una especie de rápido crecimiento y amplia distribución en zonas altoandinas— ha comenzado a despertar interés por su potencial en procesos de fitoremediación. Estudios en Argentina y otras regiones de América Latina han demostrado su capacidad para absorber metales como Cu, Cd, Zn y Pb, así como su tolerancia a suelos pobres y contaminados (Heredia et al., 2022). No obstante, su implementación debe evaluarse cuidadosamente debido a posibles efectos negativos sobre el consumo de agua y la biodiversidad.

Este artículo de revisión tiene como objetivo analizar el potencial del eucalipto como alternativa verde para la remediación ambiental de suelos afectados por relaves mineros provenientes de la minería informal, con especial énfasis en la región de Puno, Perú. A partir del análisis de estudios científicos y experiencias en contextos similares, se busca aportar evidencia que fundamente su posible aplicación en ecosistemas andinos contaminados.

2. Desarrollo o Revisión

La revisión que estamos analizando se centra en la problemática de la contaminación por relaves mineros en la región Puno, Perú. Es un problema que afecta a la salud de la población y al ecosistema. Los siete documentos que hemos revisado nos muestran un panorama complejo, donde la minería artesanal e informal, principalmente la extracción de oro, genera un impacto ambiental significativo debido a la falta de control y la utilización de métodos tradicionales que liberan metales pesados como mercurio, plomo y arsénico.

2.1. Minería informal y contaminación por relaves

La minería informal en el Perú, especialmente en la región de Puno, representa una de las principales actividades económicas en zonas como La Rinconada, Ananea, Sandia y Carabaya. Esta forma de explotación se caracteriza por la ausencia de regulación ambiental, condiciones laborales precarias y el uso indiscriminado de sustancias tóxicas, como el mercurio (Hg) para la extracción de oro (Ayamamani Calapuja, 2023)

Los relaves mineros son residuos sólidos y semilíquidos generados por el procesamiento de minerales. Estos contienen metales pesados como mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe), los cuales tienen un impacto negativo significativo en el suelo, el agua y la salud humana. El mercurio, por ejemplo, es altamente neurotóxico y puede bioacumularse en peces, afectando las cadenas alimenticias. El plomo afecta el sistema nervioso, especialmente en niños, y el arsénico está asociado a diversos tipos de cáncer (Llacta Condori, 2024)

2.2. *Remediación ambiental: conceptos y enfoques*

La remediación ambiental se refiere al conjunto de estrategias destinadas a reducir, controlar o eliminar contaminantes del ambiente, principalmente en suelos y aguas afectadas por actividades industriales y mineras. Se reconocen tres enfoques principales: la remediación física, la química y la biológica (Ortiz & Aranibar, 2023)

2.2.1. Remediación física: incluye la remoción mecánica del suelo contaminado o el aislamiento mediante recubrimientos impermeables.

2.2.2. Remediación química: implica el uso de reactivos para inmovilizar o transformar los contaminantes.

2.2.3. Remediación biológica o biorremediación: emplea organismos vivos (bacterias, hongos o plantas) para degradar o absorber contaminantes.

Dentro de la remediación biológica, la fitoremediación destaca como una alternativa verde y sostenible. Esta técnica utiliza plantas capaces de extraer, estabilizar o transformar contaminantes en suelos y aguas. Existen distintos mecanismos de fitoremediación: fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y fitostabilización (Muñoz Menéndez, 2021)

Estudios en los Andes peruanos han identificado especies nativas como *Bidens*, *Mullinum* y *Eriochloa* que muestran potencial fitorremediador frente a metales como As, Cu, Zn y Pb. Estos trabajos sientan las bases para explorar nuevas especies que puedan cumplir una función similar, como el eucalipto (Enriquez Ludium, 2024).

2.3. *Eucalipto como especie potencial*

El género *Eucalyptus* ha sido ampliamente utilizado en programas de forestación por su rápido crecimiento, resistencia a condiciones adversas y capacidad para adaptarse a suelos pobres. Además, se ha documentado su capacidad para absorber metales pesados como Cd, Zn, Cu y Pb en estudios realizados fuera de Perú, incluyendo trabajos en Argentina (Enriquez Pari, 2024)

Aunque no es una especie nativa de los Andes, el eucalipto ha mostrado tolerancia a condiciones de toxicidad por metales y buena capacidad de acumulación en tejidos. En su uso experimental, ha sido propuesto como una solución complementaria en la rehabilitación de suelos contaminados debido a su sistema radicular profundo y elevada biomasa (Villa Novoa, 2022)

Sin embargo, su uso también presenta controversias. El eucalipto tiene una alta demanda hídrica, lo que podría afectar los ecosistemas locales si no se maneja adecuadamente. Además, puede competir con especies nativas, alterar la biodiversidad y modificar la estructura del suelo si se introduce sin criterios ecológicos.

A pesar de estas limitaciones, su potencial como herramienta de fitoremediación en contextos de minería informal no debe descartarse. Se requieren más estudios locales que evalúen su eficacia en condiciones propias de la región de Puno, comparándolo con especies nativas y observando sus efectos a largo plazo.

3. Análisis de la investigación

Tabla 1

Tabla comparativa de especies utilizadas en fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados en zonas andinas.

Especie	Origen	Tipo de remediación	Metales absorbidos	Zona de estudio	Referencia
<i>Eucalyptus globulus</i>	Introducida	Fitoextracción, fitostabilización	Cd, Zn, Cu, Pb	Argentina	Heredia et al. (2022)
<i>Bidens triplinervia</i>	Nativa andina	Fitoextracción	As, Cu, Zn, Pb	Cajamarca, Perú	Bech et al. (2014)
<i>Mullinum spinosum</i>	Nativa andina	Fitostabilización	Zn, Pb	Andes Centrales	Bech et al. (2014)
<i>Eriochloa meyeriana</i>	Nativa andina	Fitostabilización	Cu, Zn, Pb	Cajamarca, Perú	Bech et al. (2014)
<i>Muhlenbergia angustata</i>	Nativa de Puno	Fitoextracción	Pb, Cd	Ananea, Puno	Calvanapon (2023)
<i>Alopecurus magellanicus</i>	Nativa de Puno	Fitostabilización	Pb, Zn	Ananea, Puno	Calvanapon (2023)
<i>Polylepis sp.</i>	Nativa andina	Fitoextracción/estabilización	As, Pb, Zn	Hualgayoc, Cajamarca	Cruzado-Tafur et al. (2020)
<i>Plantago major</i>	Cosmopolita	Fitoextracción	Cu, Cd	Altiplano de Puno	Llacta Condori (2024)



Figura 1. Contaminación de Suelos y Recursos Hídricos por Relaves Mineros - Ananea.

4. Conclusiones

La minería artesanal e informal en el Perú representa un desafío ambiental crítico, caracterizado por la extensa contaminación de suelos y cuerpos de agua con metales pesados como mercurio, plomo, arsénico, cobre, hierro, entre otros. Esta situación genera impactos significativos en la salud humana y en la biodiversidad. Por ello, es imperativo implementar estrategias de remediación eficientes, económicas y sostenibles.

El presente estudio analiza el uso de la fitorremediación con eucalipto como una tecnología sostenible para la remoción de estos contaminantes. Los resultados preliminares muestran una notable capacidad del eucalipto para absorber metales pesados, destacando su mecanismo de liberación gradual a través de las hojas. Este proceso permite una remediación continua sin la necesidad de cosechar toda la biomasa, lo que reduce considerablemente los costos asociados a la extracción y procesamiento.

El análisis costo-beneficio evidencia que la generación de ingresos derivados de la explotación forestal sostenible del eucalipto refuerza el valor económico de esta tecnología, especialmente en contextos con recursos limitados. Sin embargo, para escalar esta estrategia se requiere un enfoque integral y multidisciplinario que considere aspectos técnicos, económicos, sociales y políticos.

5. Recomendaciones

- 5.1.1. Fomentar estudios de campo en la región de Puno para validar el uso del eucalipto en condiciones locales y compararlo con especies nativas.
- 5.1.2. Desarrollar protocolos de manejo sostenible para el uso del eucalipto, considerando su alta demanda hídrica y posibles impactos ecológicos.
- 5.1.3. Integrar la fitorremediación en planes de recuperación ambiental rural, especialmente en comunidades afectadas por minería informal.

- 5.1.4. Promover la educación ambiental y la capacitación técnica sobre tecnologías verdes en zonas altoandinas.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Peruana Unión, especialmente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por brindarnos el soporte académico y formativo durante el desarrollo de este artículo. Agradecemos también a nuestros docentes y personas cercanas del programa de Ingeniería Ambiental, quienes nos orientaron con sus conocimientos y sugerencias valiosas a lo largo del proceso de la revisión y redacción. Este trabajo representa un esfuerzo conjunto motivado por nuestro compromiso con el medio ambiente y la búsqueda de soluciones sostenibles para los problemas que enfrenta nuestra región.

REFERENCIAS

- Ayamamani Calapuja, J. E. (2023). Vigilancia de la contaminación de suelos por relaves mineros en la minería artesanal e informal de la región Puno (Rinconada-Ananea). *Vigilancia de la contaminación de suelos por relaves mineros en la minería artesanal e informal de la región Puno (Rinconada-Ananea)*. Puno, Perú.
- Enriquez Pari, L. . (2024). Evaluación de técnicas de bioingeniería para mitigar la lixiviación. LIMA , PERÚ: TESIS.
- Enriquez, Ludium. L. (2024). Evaluación de técnicas de bioingeniería para mitigar la lixiviación de cianuro en suelos mineros en la Rinconada, Puno 2023. *Evaluación de técnicas de bioingeniería para mitigar la lixiviación de cianuro en suelos mineros en la Rinconada, Puno 2023*. Lima, Perú.
- Llacta Condori, H. R. (2024). Fitoextracción de metales pesados por especies nativas en relaves mineros del río Inambari, Sandía, Puno 2023. *Fitoextracción de metales pesados por especies nativas en relaves mineros del río Inambari, Sandía, Puno 2023*. Lima, Perú.
- Manuela, E. P. (2024). Evaluación de técnicas de bioingeniería para mitigar la lixiviación de cianuro en suelos mineros en la Rinconada, Puno 2023. *Evaluación de técnicas de bioingeniería para mitigar la lixiviación de cianuro en suelos mineros en la Rinconada, Puno 2023*. Lima, Perú.
- Muñoz Menéndez, J. (2021). CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y SUELO POR LOS RELAVES MINEROS. *CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y SUELO POR LOS RELAVES MINEROS*. Lima, Perú.
- Ortiz, & Aranibar. (2023). PLANTAS ACUMULADORAS DE METALES EN RELAVES MINEROS DEL ALTIPLANO DE LA REGIÓN PUNO. *PLANTAS ACUMULADORAS DE METALES EN RELAVES MINEROS DEL ALTIPLANO DE LA REGIÓN PUNO*. Puno, Perú.
- Villa Novoa, H. H. (2022). Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. Ananea, Santa Teresa, Perú: Revista de Investigaciones Altoandinas.