

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Perfil de proyecto de investigación: Fitorremediación de relaves
mineros y su reaprovechamiento sostenible en la construcción
enfoque integral en la reducción del impacto ambiental en la
ciudad de Ananea**

Por:

Autor 1 Kevin Uriel Mamani Huaqui

Asesor:

Doctor. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Juliaca, Junio de 2025

1. Planteamiento del Problema

A nivel mundial, las actividades mineras y metalúrgicas han intensificado la contaminación de suelos con metales pesados, provocando alteraciones graves en la salud humana, el ambiente y la calidad del suelo **(Mousavi Kouhi, 2020)** En el Perú, esta situación es crítica, ya que existen alrededor de 600 relaves mineros (RMs) abandonados que representan una amenaza constante para los ecosistemas, debido a la presencia persistente de metales tóxicos como el plomo, mercurio, arsénico y cadmio (Rodríguez, 2020; Chang et al., 2018). Estos elementos no se degradan naturalmente y pueden llegar a ser agentes mutagénicos y carcinógenos (Peña y Beltrán, 2017, p. 32; González, 2005, p. 31), afectando a largo plazo la biota terrestre y la salud pública.

Frente a esta problemática, la fitorremediación ha emergido como una alternativa biotecnológica prometedora, al permitir la absorción, acumulación y estabilización de metales pesados mediante especies vegetales (Xie et al., 2020; Petelka et al., 2019). Sin embargo, aunque esta técnica es económica y ecológica, su aplicación práctica en contextos como el reaprovechamiento de residuos mineros en la construcción sostenible aún es limitada y requiere mayor investigación (LanderosMárquez et al., 2011, p. 11; Sing, 2003, p. 408).

Pese al potencial de la fitorremediación, sigue sin resolverse el aprovechamiento eficiente de los residuos extraídos y de los suelos tratados. De allí surge la necesidad de integrar esta tecnología con alternativas de reaprovechamiento sostenible, como su incorporación en la industria de la construcción, lo cual podría representar una solución integral para mitigar el impacto ambiental de los relaves mineros. No obstante, aún existe una brecha en el conocimiento respecto a la efectividad de especies vegetales específicas en diferentes tipos de suelos contaminados, así como su potencial aplicación en materiales constructivos con bajo riesgo ambiental.

1.1 Justificación

La investigación es de gran relevancia porque se centra en la utilización de la fitorremediación, una herramienta útil desde una perspectiva ambiental sostenible para la recuperación de suelos afectados por relaves mineros. Con esta ciencia no solo se busca la recuperación de aquellos ecosistemas impactados por metales pesados. Además de ello, esta estrategia ambiental permite un modelo de economía circular mediante los residuos que son utilizados para la fabricación de materiales de construcción y la pavimentación de caminos. De este modo se minimizan los impactos ambientales de la actividad minera, la acumulación de residuos y se valora el potencial de los relaves como insumo alternativo en las obras de infraestructura, potenciando así el crecimiento sostenible y la innovación en el sector de la construcción.

1.2 Estado del Arte

Los relaves mineros son residuos generados durante el procesamiento de minerales, que contienen productos químicos antropogénicos, metales pesados y rocas estériles, los cuales, al ser eliminados inadecuadamente, contaminan el suelo, el agua y la biota circundante, provocando la pérdida de insectos, animales y especies vegetales (Petelka et al., 2019).

El origen de los relaves mineros se encuentra en el proceso de extracción y beneficio de minerales, donde se emplean técnicas físico-químicas que generan residuos con alto contenido de metales pesados y compuestos químicos antropogénicos. Estos residuos provienen del procesamiento de minerales y la posterior eliminación de relaves y aguas residuales en zonas aledañas a las minas (Zunaidi, Lim, Metali, 2023).

La composición química de los relaves mineros está caracterizada por la presencia de elementos altamente tóxicos como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr), selenio (Se) y zinc (Zn), entre otros metales pesados, los cuales representan un grave riesgo ambiental y sanitario debido a su alta peligrosidad y potencial contaminante (Villena-Chávez, 2018).

La contaminación por relaves mineros es un grave problema ambiental, ya que los depósitos de relaves descargados en ríos, lagos y quebradas pueden liberar hasta 4000 toneladas diarias de residuos, que contienen metales pesados altamente tóxicos (Martínez, 2018). Estos metales, cuando superan ciertos niveles de concentración en el ambiente, resultan nocivos para la salud humana, afectando directamente tanto a los ecosistemas como a la subsistencia de especies animales y vegetales (Barraza, 2015). La toxicidad de estos metales genera envenenamiento, daños a la biodiversidad y la alteración de la calidad del agua, afectando a los seres vivos que dependen de estos recursos.

La fitorremediación es un proceso de remediación ambiental que utiliza plantas para reducir, eliminar o estabilizar contaminantes en el suelo, agua o sedimentos, incluyendo metales pesados y compuestos orgánicos e inorgánicos. A través de este proceso, las plantas absorben los contaminantes, los almacenan en sus tejidos, o los transforman en formas menos tóxicas, lo que ayuda a restaurar los ambientes contaminados. Las especies vegetales empleadas en este proceso pueden acumular los metales pesados principalmente en sus raíces y tejidos, contribuyendo a la purificación del suelo y reduciendo el riesgo de movilización de estos contaminantes (Mousavi et al., 2020; Novo et al., 2018). La fitorremediación no solo es una estrategia ecológica efectiva, sino que también facilita la estabilización del suelo, reduciendo su erosión y la dispersión eólica de los contaminantes (Petelka et al., 2019).

Técnicas de fitorremediación

La Fito extracción es el proceso mediante el cual las plantas absorben contaminantes, especialmente metales pesados, a través de sus raíces y los acumulan en sus hojas y tallos. Estas plantas se pueden cosechar para eliminar los contaminantes del suelo. Es una técnica adecuada para la remediación de suelos con alta concentración de metales pesados.(Mousavi et al., 2020; Xie et al., 2020).

La fitodegradación implica la utilización de plantas para descomponer contaminantes orgánicos en sus tejidos o en el suelo circundante. Las plantas liberan enzimas que pueden transformar estos

compuestos tóxicos en productos menos peligrosos. Esta técnica es útil para la remediación de suelos contaminados con pesticidas, solventes o hidrocarburos. (Petelka et al., 2019).

La fitostabilización se refiere a la capacidad de las plantas para estabilizar los contaminantes en el suelo, impidiendo su dispersión o movilización hacia el agua subterránea o la atmósfera. Las plantas absorben los contaminantes y los retienen en sus raíces, evitando su dispersión. Esta técnica es eficaz para la remediación de suelos contaminados con metales pesados como plomo o arsénico. (Xie et al., 2020; Petelka et al., 2019).

La fitovolatilización implica la absorción de contaminantes como metales pesados o productos orgánicos por las plantas, los cuales luego se volatilizan y se liberan en el aire a través de las estomas de las hojas. Esta técnica es útil para la remediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles o metales volátiles como el mercurio. (Novo et al., 2018; Xie et al., 2020).

La fitofiltración es el proceso mediante el cual las plantas absorben los contaminantes presentes en el agua a través de sus raíces, ayudando a purificar fuentes de agua como ríos, lagos y estanques. Las plantas utilizadas en esta técnica tienen la capacidad de absorber metales pesados, nutrientes en exceso o compuestos orgánicos del agua. (Mei et al., 2019; Mousavi et al., 2020).

La sostenibilidad en la construcción con relaves mineros representa una estrategia clave para mitigar los impactos ambientales negativos de la minería, al mismo tiempo que se aprovechan los residuos generados por la actividad minera.

Los relaves mineros, tradicionalmente considerados como residuos no valorizables (Araya et al., 2021; Hernández-Ramos et al., 2024), pueden ser aprovechados como materiales áridos en la construcción de pavimentos. Este aprovechamiento no solo reduce los costos operacionales de las empresas mineras, sino que también disminuye la contaminación ambiental generada por la disposición inadecuada de los relaves (Tumialán et al., 2023).

La viabilidad de utilizar los relaves mineros en la construcción de carreteras se evalúa mediante diversas pruebas, como el análisis de granulometría, la medición del pH y la prueba CBR (Sandoval Vallejo & Rivera Mena, 2019).

El uso de relaves mineros como áridos no solo tiene beneficios ambientales, sino también económicos. Según (Luukkonen et al., 2024), un enfoque de economía circular reduce la necesidad de materiales vírgenes, lo que contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

La valorización de los relaves en la construcción de carreteras es una alternativa sostenible que reduce la acumulación de residuos mineros en el ambiente, evitando la contaminación de suelos, aguas y la emisión de polvos tóxicos que afectan tanto la biodiversidad como la salud humana (García Troncoso et al., 2022). Además, la utilización de estos residuos en la industria del pavimento permite mitigar los efectos negativos de los metales pesados presentes en los relaves, como plomo, mercurio y arsénico (Miguel et al., 2022)

Los estudios de estabilidad y flujo del pavimento mediante el uso de materiales derivados de los relaves mineros muestran que las mezclas con áridos reciclados pueden tener una resistencia superior al desgaste, lo que resulta en una mayor durabilidad del pavimento (Calva Herrera & Muñoz Pérez, 2022). El uso de estos materiales en la construcción de pavimentos flexibles (Goli, 2022) optimiza la capacidad de carga y resiste mejor las condiciones de tráfico pesado.

La implementación de esta tecnología en regiones mineras, como Santa Barbara de Carhuacayan en Junín, no solo fomenta el desarrollo local, sino que también promueve la recuperación ambiental. La valorización de relaves mineros contribuye al bienestar social y económico de las comunidades, al mismo tiempo que ofrece una solución innovadora para la gestión de residuos y la construcción de infraestructuras sostenibles.

1.3 Objetivos

1.4 Objetivo general

Desarrollar una propuesta integral que combine la fitorremediación de relaves mineros con su posterior uso como insumo en materiales de construcción, con el fin de reducir los impactos ambientales de la actividad minera y promover un aprovechamiento sostenible de estos residuos.

Objetivo específico

1. Determinar los niveles de contaminación y los tipos de metales pesados presentes en los relaves mineros.
2. Evaluar la eficacia de diferentes técnicas de fitorremediación (fitoextracción, fitodegradación, fitostabilización, fitovolatilización y fitofiltración) aplicadas a los relaves mineros en condiciones controladas y de campo.
3. Seleccionar y emplear especies vegetales con alta capacidad de absorción y estabilización de contaminantes, para evaluar su efectividad en procesos de fitorremediación.
4. Determinar las propiedades físico-químicas y mecánicas de los relaves tratados, a fin de validar su viabilidad como material complementario en la elaboración de mezclas de construcción.

1.4 Hipótesis

La implementación de un enfoque integral basado en la fitorremediación de relaves mineros, mediante el uso de especies vegetales con alta capacidad de absorción y estabilización de metales pesados, permite no solo la recuperación ambiental de suelos contaminados y la mejora de sus propiedades físico-químicas, sino también el aprovechamiento de estos relaves tratados como insumo alternativo en materiales de construcción. Esta estrategia, enmarcada en los principios de sostenibilidad y economía circular, contribuye significativamente a la reducción de la contaminación del suelo, agua y aire,

disminuye la acumulación de residuos mineros peligrosos y promueve el desarrollo de infraestructuras más responsables con el medio ambiente y las comunidades afectadas por la actividad minera.

1.5 Variables

Variables independientes

Acumulación de relaves
Falta de tratamiento a los relaves

Variables dependientes

Desborde de relaves mineros

Degradación de suelos cercanos

Contaminación de agua y ríos cercanos

2. Metodología

2.1 Diseño Metodológico

El enfoque utilizado en los estudios revisados fue cuantitativo y experimental, enfocado en determinar el potencial fitorremediador de diversas especies vegetales expuestas a metales pesados como Cd, Cr, Pb, Zn, Ni y As, bajo condiciones de campo e invernadero.

2.2 Diseño muestral

El diseño experimental encerró un diseño factorial con dos factores: i) especie vegetal (tres especies) y ii) concentración de MP en LX (dos concentraciones). HCSFH se organiza en dos módulos experimentales (T1 y T2), dispuestos aleatoriamente y ejecutados en paralelo. Cada bloque consta de seis reactores con plantas (tres reactores, una especie en cada reactor, cada uno con Repetir) y dos unidades sin fábricas, cada una con un total de 8 reactores y dos módulos experimentales con un total de 16. (Madera Parra & Solante Soto, 2014)

2.3 Técnicas de Recolección de Datos

Para el experimento de extracción, las plantas sanas fueron cuidadosamente desarraigadas, almacenadas en una bolsa de muestreo estéril y enviadas de vuelta al laboratorio. Los tejidos secos de las plantas de *Leucaena* fueron finamente molidos y digeridos con una mezcla concentrada de HNO_3 y HClO_4 (5:1, v/v) antes de la medición de las concentraciones de metales pesados utilizando ICPAES. Las capacidades de corrección de L.El sistema de *leucocephala-Rhizobia* se determinó mediante el cálculo del factor de coeficiente de bioconcentración (BCF) y el factor de translocación (TF). (Kang Xiumi & Golian , 2018)

2.4 Técnicas Estadísticas para el Procesamiento de la Información

El propósito de este trabajo es determinar si *Brachionella brachii* tiene el potencial de mejorar las propiedades físicas del suelo y al mismo tiempo extraer oro del suelo. Otro propósito es verificar si el girasol tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas del suelo además de que el girasol es un extracto de planta dorada. Para ello, las plantas se utilizaron en un diseño completamente aleatorio, repetido cuatro veces. La aplicación de tiocianato de amonio indujo la absorción de oro en las plantas y el análisis estadístico fue ejecutado a través del software R-Studio. (Ramirez Pisco , Gomez Yarce , & Gaviria Palacio, 2017)

Si la data que se va a analizar no está disponible al público, se debe presentar una prueba de permiso de parte de la(s) entidad(es) donde se realizará el estudio. Estudios con trabajadores de la UPeU deben pasar por el comité de ética en investigación de la UPeU para conseguir los permisos necesarios. Estudios con estudiantes de la UPeU solo necesitan aprobación por un comité de ética a nivel de su Facultad (a través del correspondiente Centro de Investigación e Innovación) y no necesitan permisos adicionales.

Pasos y etapas

Etapa diagnostico

Identificación del área de contaminación

Muestreo de suelo inicial

Análisis de laboratorio base

Etapa diseño muestral

Selección de población y muestra

Etapa 3 técnicas de recolección de datos

Técnica, instrumentos, materiales de extracción de muestra y materiales de campo

Etapa 4 técnicas estadísticas para el procesamiento de información

Usaremos el anova, y el tukey DCA

3. Administración del Proyecto

3.1 Cronograma de Actividades Tabla

1

Cronograma de Actividades

[illegible]

Ejecución	Recolección de datos		X	x	x	x							
	Procesamiento y análisis de datos						x	x					
Redacción	Redacción de borradores del artículo							x	x				
	Dictaminación del artículo									X	x	x	
	Sumisión del artículo									x	x	x	
Cierre	Sustentación												X
	Entrega del documento final al repositorio												x

3.2 Presupuesto Projectado Tabla

2

Presupuesto Projectado

Tipo de Recursos	Cantidad	Precio por Unidad	Precio Total
Viáticos	20	75	1500
Insumos de laboratorio (materiales y reactivos)	4	500	2000
Costo por análisis	7	40	280
Equipos menores (Cámara, GPS, etc.)	3	400	1200
Otros (especificar)			
Total			4480

4. Referencias Bibliográficas

De acuerdo al estilo de la revista escogida y con el uso de un gestor bibliográfico (EndNote, Mendeley)

Kang Xiumi , & Golian , W. (2018). Una reducción de la absorción de metales

para *Leucaena leucocephala* crecido en colas de minas y suelos contaminados con metal.

Madera Parra , C., & Solante Soto , E. (2014). Efecto de la concentración de metales pesados en la

respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales

tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.

Mousavi Kouhi, S. M. (Enero de 2020). Evaluación del potencial de fitorremediación de especies de

plantas nativas que crecen naturalmente en un suelo salino-sódico contaminado con metales

pesados. *Investigación en Ciencias Ambientales y Contaminación* , 0027–1003.

Ramirez Pisco , R., Gomez Yarce , J. P., & Gaviria Palacio, D. (2017). Phytoextraction de oro y recuperación

de suelos degradadas por la minería.

5. Anexo A

Instrumentos de Recolección de Datos

6. Anexo B

Matriz de operacionalización de variables

Solo para estudios con variable(s) social(es).

7. Anexo C

Imágenes, planos, figuras, tablas u otros

Opcionales, según la metodología aplicada.