

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Ambiental

“ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS MÁS EFICIENTES PARA
LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON
RELAVES MINEROS PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD
MINERA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autores:

Maria Lucelina Tarrillo Diaz

Ever Nuñez Bustamante

Asesor:

M. Sc. Marieta Eliana Cervantes Peralta

Cajamarca - Perú

2022

DEDICATORIA

A Dios por ser la luz que guía mi camino.

A mis padres, hermanos y demás familiares

por apoyarme siempre y nunca dejarme sola.

Y a mis amigos por toda su confianza.

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a Dios en primer lugar, y a todos quienes me apoyaron en la realización de este trabajo, en especial a mis familiares por su incondicionalidad y por estar siempre a mi lado.

A mis compañeros de estudio por su amistad, espacio y tiempo invaluable.

A la Universidad Privada del Norte, a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental por brindarme toda su enseñanza y prepararme para los retos profesionales.

Tabla de Contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. Hipótesis.....	16
1.4.1. Hipótesis general	16
1.4.2. Hipótesis específicas.....	16
CAPÍTULO II. MÉTODO.....	18
2.1. Tipo de investigación.....	18
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	19
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	20
CAPÍTULO III. RESULTADOS	23
3.1. Resultados de las características físico químicas de los suelos contaminados con relaves mineros	23
3.2. Resultados de le eficiencia de métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros	27
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	33
REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los suelos utilizados, durante la Fitorremediación con <i>Brassica campestris</i> L.....	23
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos utilizados, durante la Fitorremediación con <i>Zea mays</i> L.....	24
Tabla 3. Análisis de caracterización de las enmiendas orgánicas.....	24
Tabla 4. Propiedades químicas y físicas de los suelos evaluados en la remediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas.....	25
Tabla 5. Propiedades químicas de suelos contaminados con Zn, evaluados para la aplicación de la técnica electrorremediación.....	25
Tabla 6. Características físicos y químicos del suelo utilizado durante la remediación con microorganismos eficaces (EM).....	26
Tabla 7. Parámetros físicos y químicos del abono Bocashi y suelo a tratar.....	26
Tabla 8. Eficiencia de remoción de metales pesados, mediante Fitorremediación utilizando <i>Brassica campestris</i> L.....	27
Tabla 9. Eficiencia de remoción de plomo y cadmio mediante la fitorremediación con el cultivo de maíz.....	28
Tabla 10. Eficiencia de remoción de metales pesados, mediante la utilización de enmiendas orgánicas e inorgánicas.....	28
Tabla 11. Eficiencia en la remediación de suelos contaminados con Zn, mediante la Electrorremediación	29
Tabla 12. Eficiencia de remoción de suelos contaminados con Cadmio mediante la utilización de Microorganismos eficientes (EM).....	30
Tabla 13. Eficiencia de Biorremediación de suelo contaminado con Pb mediante abono Bocashi.....	30
Tabla 14. Comparación del promedio de las eficiencias de métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de los promedios de los métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros según su eficiencia.....	32
---	----

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo de analizar los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera. La metodología implica un enfoque de investigación cualitativo, tipo de investigación descriptiva, con diseño no experimental, el espacio muestral consta de 06 estudios relacionados al tema en cuestión. Los resultados revelan que mediante la Biorremediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas se puede remover hasta un 78% de los contaminantes del suelo, Electrorremediación (74%), Biorremediación con maíz (54%), Fitorremediación con *Brassica Canpestris* L (48%), y el menos eficiente la Biorremediación con microorganismos eficaces (EM) con un 6%. En tal sentido la eficiencia de remoción de los métodos estudiados, pueden variar el uno del otro, dependiendo del tipo de contaminante, insumos utilizados y tiempo de tratamiento. Por lo que se concluye que las técnicas pasivas para el tratamiento de suelos contaminados con relaves mineros son recomendables, debido a que no altera el ecosistema y son amigables y sostenibles con el ambiente.

Palabras clave: métodos de recuperación de suelos, relaves mineros, suelos contaminados

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La problemática de contaminación de suelos por presencia de relaves mineros se debe a la actividad extractiva principalmente, estos desechos son producto de la metalurgia que implica la minería para la depuración de los elementos de interés, que resulta ser económicamente rentables. Esta contaminación se agrava al existir la generación de residuos sólidos y líquidos urbanos, la mala ocupación, el uso del suelo y los diferentes productos de la actividad humana. En este sentido, el suelo es muy susceptible de contaminarse, conllevando a la pérdida de sus propiedades; puesto que se comporta como un filtro a través del cual se producen y regulan los flujos de energía y materia, por lo que retiene a los contaminantes que se sedimentan o que son transportados por el agua (Berg, 2013). “Es esencial considerar los factores climáticos propios de cada zona (Abasolo, 2011).

En el Perú como ejemplo se tienen los suelos contaminados en La Oroya, que en la actualidad es un tema de conflicto legal ambiental, en este, se tiene la presencia de contaminantes producto de relaves mineros, en esencia de los metales pesados como arsénico, cadmio, plomo, mercurio, antimonio, superando los estándares internacionales. Lo cual constituye así una problemática que tiene que ser atendida de una manera integral, no solamente por la presencia de los contaminantes en los suelos, sino también para atacar y disminuir, o eliminar, la fuente de generación de los contaminantes. Ello muestra que “existe falta de una legislación ambiental con relación al suelo y subsuelo, que comprenda desde su fase rocosa a la parte orgánica de los componentes del suelo” (Díaz, 2016), inclusive “algunos contaminantes superan en un 87% el estándar de Calidad para suelos comerciales, industriales y extractivos”. (Calderón, 2015)

Existen múltiples tecnologías disponibles para la descontaminación de suelos y seleccionar la más adecuada depende del tipo de contaminante y el costo del mismo. Según Díaz (2016), estas técnicas se dividen en dos grandes grupos: 1) Tecnologías in situ: se

ejecuta en el mismo sitio donde se encuentra la contaminación o el desecho sólido que ha causado la contaminación del suelo, en este grupo se encuentra la solidificación, la biorremediación y 2) Tecnologías ex situ, consiste en trasladar el suelo contaminado hacia un lugar distinto para recibir el tratamiento y extraer el contaminante; en este grupo se encuentra la incineración, biorremediación, solidificación - estabilización, desorción térmica, lavado - extracción con solventes.

Asimismo, Cortez et al. (2015) evaluó el efecto en la movilidad de los metales pesados adheridos a los relaves mineros como: níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb) debido a la aplicación de ácidos húmicos (AH) en la extracción secuencial de dichos elementos en dos tipos de suelos contaminados (Andisol y Vertisol) con propiedades contrastantes bajo condiciones controladas. Además, Sarria et al. (2015) en su estudio encontró contaminantes de suelos (por presencia de relaves mineros) a elementos como: As, Cu, Zn, Cd y Pb; 7 días después, los suelos se sometieron a medidas de remediación mediante retirada del lodo y adición de enmiendas orgánicas como carbono orgánico (CO) y espuma azucarera (CaCO_3), e inorgánicas como arcilla y óxidos de Fe y Mn.

De acuerdo con Lodoño (2020), con la contaminación de suelos mineros por metales como Mercurio (Hg), Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), es un riesgo serio para la salud pública y ambiental. La toxicidad y estabilidad química que presentan estos elementos frente a procesos de biodegradación natural crea un problema por bioacumulación y un efecto creciente de su concentración en suelos y en la cadena trófica. Las técnicas fisicoquímicas aplicadas convencionalmente para la recuperación de ambientes degradados son poco efectivas, exigen altos costos de operación, sin contar con la generación de residuos con potencial contaminante adicionales a estas. Como resultado, en los últimos años se ha centrado la atención en tecnologías de biorremediación, dado a su eficiencia, menores costos operativos y por contribuir de manera positiva al ambiente.

También, la potencialidad de daño ambiental aumenta por la acumulación tanto de los relaves mineros, como de los recipientes de cianuro y mercurio, por tal, se propone la implementación de una tecnología de limpieza para tratar los relaves metalúrgicos, denominada “tratamiento integral de neutralización de relaves metalúrgicos” (Flores et al., 2019).

Hoy en día, según Loroña et al. (2018) existen numerosas y diferentes tecnologías de remediación de suelos contaminados y se pueden agrupar en 3 tipos: a) biológicos (biorremediación, bioestimulación, fitorremediación, biolabranza, etc.); b) fisicoquímicos (electrorremediación, lavado, solidificación/estabilización, etc.); y c) térmicos (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.). En este sentido, Zúñiga et al. (2011) menciona que “los tratamientos más efectivos en cuanto respuesta fisiológica y productividad son los biológicos con uso de microorganismos (biofertilizantes y electromagnetismo)”.

Para remediar suelos contaminados por metales pesados, específicamente con mercurio presente en los relaves mineros se han diseñado tecnologías físicas de tratamiento como la excavación, fijación y lixiviación, pero presentan costos elevados y además contribuyen con el deterioro del sitio tratado. En contraste existe la técnica llamada fitorremediación, “consistente en la utilización de plantas para remover, acumular e inactivar contaminantes” (Vidal et al., 2010). “La fitorremediación es recomendable porque no altera los ecosistemas, es una técnica pasiva, amigable y sostenible con el ambiente” (Minive et al., 2018). Al respecto, “las cepas *Bacillus* son consideradas como promotoras de crecimiento de plantas, degradadoras de enzimas, utilizadas como bacterias bioremediadoras de suelos contaminados” (Sernaqué et al., 2017).

Por otra parte, “el uso de los residuos de construcción y demolición consiste en emplearlos en suelos degradados por presencia de relaves mineros producto de la minería, con el fin de mejorar propiedades fisicoquímicas de los suelos degradados y generar aporte

de nutrientes (Ca, Mg, K, entre otros)” (Mejía et al., 2015). Otro de los métodos de recuperación de suelos es la biosorción, la cual “es un fenómeno ampliamente estudiado para la biorremediación de metales como el cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), níquel (Ni), zinc (Zn) y cobre (Cu)”. “La biosorción está determinada por los mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes” (Nieves et al., 2019).

Cabe mencionar que existen distintos mecanismos de desagregación en el suelo: “desagregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia, microfisuración por hinchamiento diferencial y dispersión por procesos fisicoquímicos” (Gabioud et al., 2011).

Pino et al. (2012), concluyó que “una adecuada aplicación de nutrientes contribuye al desarrollo de la población microbiana en el suelo contaminado por los desechos mineros, con capacidad de degradarlos aumentando la efectividad del proceso”.

Antecedentes internacionales

Lodoño (2020), en su estudio *Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con Mercurio, Cadmio y Plomo (Hg, Cd, Pb)*; estableció como objetivo dar a conocer estrategias de remediación biológica, mediante recolección de información en artículos científicos, publicaciones, resultados de investigaciones, que permitan comprender en qué consisten las metodologías de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, mercurio, cadmio y plomo. Concluyó que la biorremediación de Hg, Cd y Pb, mostraron una eficiencia variada utilizando diversos tipos de microorganismos y técnicas, presentando eficiencias en un rango de 20-99%.

López (2014), desarrolló su investigación *Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras*, con el fin de evaluar la alternativa más adecuada para la disposición final de los residuos generados en el proceso

de fitorremediación; comprendió una metodología basada en la revisión de bibliografía a través de bases de datos. los avances metodológicos con el guarumo. En síntesis, se identificó que las tasas de remoción de Hg en suelo estuvieron entre 15.7% y 33.7 % de efectividad, en cuatro meses de crecimiento de la planta, lo que implica que esta especie tiene una significativa capacidad para ser empleada en fitorremediación de suelos contaminados.

Álvarez (2019), realizó su tesis *Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de Biochar*, con la finalidad de conocer el efecto de la adición de Biochar procedente de residuos ganaderos sobre suelos contaminados por metales y su combinación con una técnica de fitorremediación. Los resultados indican que la adición de Biochar aumenta el pH y la CE de los suelos y da lugar a resultados variables en la biomasa microbiana, las actividades enzimáticas, movilidad de los metales pesados según el tipo de suelo y Biochar utilizado De este estudio se concluye que al utilizando la combinación de Biochar y *Brassica napus*, favorece el aumenta el pH en el suelo, la CE, y reduce de manera significativa la concentración de Co, Cu, Cr, Se y As.

Antecedentes nacionales

Mauricio (2016), en su trabajo de investigación *Biorremediación con abono bocashi para la recuperación de los suelos contaminados con plomo (Pb) en la comunidad Vicco-Pasco 2016*, tuvo como objetivo evaluar en qué medida la biorremediación con abono bocashi recupera los suelos contaminados por plomo en la comunidad Vicco-Pasco. El nivel de investigación es descriptivo y el diseño es experimental. En conclusión, el abono bocashi es óptimo para la biorremediación del suelo contaminado con plomo ya que se redujo en un 67,37% este metal pesado con un tratamiento de 2 meses aun pH 7,06; 6,34% M.O; 3,68% CO; 396 mg/kg P; 655 mg/kg K obteniendo los parámetros óptimos.

Cortez et al. (2015), en *Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos*, tuvo como objetivo extraer los metales pesados en dos suelos contaminados enmendados con ácidos húmicos. La metodología implica el uso de ácidos húmicos purificados en concentraciones de 0%, 2.5% y 5% (peso/peso) sobre la extracción secuencial de metales pesados después de incubación a 60 y 90 días, mediante extracción secuencial de Tessier. Los resultados revelan que la movilidad de los metales se redujo con la adición de dichos ácidos, con mayor retención de Ni, Cu, Zn y Cd en la matriz del suelo. En conclusión, los ácidos húmicos pueden ser utilizados, en general, como enmienda orgánica para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, producto de los relaves mineros.

En el artículo *Suelos contaminados con plomo en la Ciudad de La Oroya Junín y su impacto en las aguas del Río Mantaro*, Arce y Calderón (2017), establecieron como objetivo analizar contaminación generado por la presencia de la Fundición de La Oroya, cuyas actividades dieron como resultado la contaminación con plomo del aire y suelos de la Oroya por más de 90 años. Como resultados se ha comprobado que los suelos de la ciudad de La Oroya esta impactada con plomo llegando a valores tan que sobrepasan los 9000 mg/Kg. En conclusión, La Oroya necesita una urgente remediación de suelos para ser considerado apto para vivienda y para que el rio recupere su capacidad de vida acuática, y/o sea apta para riego.

Según Flores et al., (2019)., “la recuperación del suelo contaminado por relaves mineros, especialmente del pastizal pobre es lenta; la humedad, biomasa e infiltración es de alta sensibilidad; y la técnica de surcos y hoyos son opciones accesibles para la mejora del pastizal degradado”.

Dentro de las técnicas de remediación usadas en el método de remediación se tiene:

La electrorremediación es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se

basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa (Llancari, 2018). Cabe aclarar que, para la implementación de diferencial potencial o una corriente directa, es necesario el uso de electrodos (ánodo y cátodo). Estos son dispuestos en pozos que se construyen a partir de la excavación en el suelo. En condiciones normales, estos se humectan junto a un electrolito en pro de ayudar a mantener un equilibrio en las condiciones de conducción que se presentan en el campo eléctrico. Es importante destacar que la acción en relación con el electrolito facilita el transporte del contaminante hacia los lugares que fueron excavados (pozos) y allí serán extraídos.

Actualmente, existen diversas tecnologías de tratamiento de suelos, siendo la biorremediación la mejor alternativa para el tratamiento de medios contaminados, caracterizada por usar diferentes organismos (plantas, levaduras, hongos, bacterias, etc.) para neutralizar sustancias tóxicas, convirtiéndolas en inocuas para el medio ambiente y la salud humana. Estos métodos se han usado para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles, pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos. En este sentido, existen varias alternativas de biorremediación, dentro de ellas tenemos a los microorganismos eficaces (EM), que vienen a ser un inoculante microbiano, que reestablece el equilibrio microbiológico del suelo, mejorando sus condiciones fisicoquímicas. (Loroña et al., 2018)

Otro de los métodos que se viene usando a mayor escala es la fitorremediación, una tecnología emergente basada en plantas superiores y microorganismos asociados al rizósfera, que constituye una opción para la remoción in situ o ex situ de contaminantes. En ecosistemas naturales las plantas actúan como filtros que buscan remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar, concentrar o estabilizar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelo, lodos, agua y sedimentos. Con asistencia de enmiendas

orgánicas es un procedimiento eficaz para reducir la biodisponibilidad de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), tanto en suelos contaminados como en residuos de mina. (Munive et al., 2018)

Según Guevara et al. (2017) “la fitorremediación a través de plantas halotolerantes y la usurpación del sodio por un catión alternativo, son los métodos más comunes”. A pesar de tener cierta eficacia, ambos métodos recuperan parcialmente el suelo contaminado con desechos metalúrgicos mineros.

Un suelo contaminado “es aquel que funciona mal como componente ambiental” (Díaz, 2016).

Por otra parte, los relaves mineros, “son los residuos sólidos mineros que resultan del proceso de flotación de minerales polimetálicos en las plantas concentradoras de las minas son conocidos en la minería como existiendo estos en sus dos modalidades, como pasivos mineros y activos mineros” (Romero y Flores, 2010), “son residuos sólidos producidos por el procesamiento de la minería” (Zhu et al., 2017).

El presente tema se justifica porque en el Perú, especialmente en las regiones donde la actividad minera es perene como Cajamarca el tema de contaminación de suelos todavía no ha sido tratado adecuadamente, dado que no se tiene todavía toda la conciencia de los problemas ambientales que causan los suelos contaminados; sabiendo que todos los contaminantes vertidos al ambiente se depositan finalmente en el suelo y permanecen mucho tiempo depositados, hasta que sean eliminados, extraídos o neutralizados (Díaz, 2016). Por ende, la “contaminación del suelo con metales pesados, producto de la descarga de desechos mineros no tratados, es una amenaza considerable para la integridad ecológica y el bienestar humano” (Ávila et al., 2018). Por ende, la contaminación de suelos por metales pesados afecta el medio ambiente y es un riesgo para la salud humana, por esta razón su identificación permite desarrollar políticas de control, recomendaciones para su gestión y/o para realizar

programas de remediación.

1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera

1.3.2. Objetivos específicos

Describir las características fisicoquímicas de los suelos contaminados por relaves mineros.

Identificar los principales métodos que usa la actividad extractiva para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Será posible analizar los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera, los cuales están enmarcados por la eficiencia que tienen respecto a la recuperación de metales pesados presentes en los suelos, siendo que el método de fitorremediación logrará una eficiencia superior al 90%.

1.4.2. Hipótesis específicas

Las principales características fisicoquímicas iniciales de los suelos contaminados

con relaves mineros provenientes de las diversas compañías mineras son: gran concentración de metales pesados, acidez, textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica, principalmente.

Los principales métodos que usa la actividad extractiva para el tratamiento de suelos, según las fuentes revisadas sitúan en primer lugar a la biorremediación seguida de la fitorremediación.

CAPÍTULO II. MÉTODO

2.1. Tipo de investigación

Enfoque de investigación

El enfoque considerado para esta investigación es cualitativo, Grinnell (1997) lo denominó “investigación naturalista, fenomenológica, explicativa o etnográfica, que involucra una serie de conceptos, visiones, tecnologías e investigaciones no cuantitativas”, además se basa en la recopilación de datos, el análisis de los mismos y la forma de narrar los hechos encontrados.

Tipo de investigación

La investigación es descriptiva, según Rodríguez (2005), “es un tipo de investigación que incluye la descripción, registro, análisis y explicación de la naturaleza, composición o proceso actual de un fenómeno”. Asimismo, “la investigación descriptiva se fundamenta en hechos fácticos y su correcto análisis e interpretación” (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). En este sentido, esta investigación se basará en la información de métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros, revelados en diferentes fuentes de información.

Diseño de investigación

Esta investigación es de naturaleza no experimental, desde el punto de vista de Kerlinger (1975), “la manipulación de variables en esta investigación es absurda, y la observación de variables se hacen tal y como son, para posteriormente realizar un análisis continuo”. En este sentido, en el estudio en cuestión, se explica y analiza los métodos de recuperación de suelo con presencia de relaves mineros.

Transversal

Cabe mencionar que esta investigación presenta un corte transversal, puesto que “se basa en datos de un solo momento” (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). Además, tiene como objetivo describir variables y analizar su incidencia, en particular se evaluarán los métodos más eficaces en la recuperación de suelos contaminados con desechos mineros.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población

Arias (2012), define población como un “conjunto de elementos, personas o instituciones, finitos o infinitos, que son objeto de investigación y comparten características comunes”. La población está determinada por los temas y objetivos de la investigación. En la investigación en cuestión se consideró una población ilimitada debido a que se desconoce la cantidad de elementos que componen el estudio, para este estudio se consideró como población los estudios nacionales e internacionales relativos a los métodos de tratamiento de suelos con presencia de relaves mineros.

Muestra

La muestra es un subconjunto de la población objetivo sobre la que se recopilan datos y se definen con precisión de antemano. Para la determinación de la muestra se utilizarán métodos no probabilísticos, que consiste en seleccionar individuos idóneos para el investigador que considere sus propios criterios (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

Criterios de inclusión y exclusión para la selección de la muestra

Los criterios de inclusión se basaron principalmente en recursos más prácticos que teóricos, lo que significa que además de mostrar métodos perfectos, también tienen resultados concisos, claros y fundamentados.

Los criterios de exclusión incluyen la estantería de recursos que no presenten resultados técnicos afines a los métodos de tratamiento de suelos contaminados con relaves de mina y otros recursos que no se tomaron en cuenta por su antigüedad, pues se requirió que no tengan más de 10 años. En algunos casos, no se encontró una estructura completa en la que se han observado ciertas partes, como un resumen, sin siquiera mostrar el método y los resultados, y en otros casos archivos ocultos o archivos protegidos; esto llevó a su eliminación de la lista de fuentes para su consideración.

Por tanto, la muestra consta de nueve (06) estudios relacionados con los métodos de tratamiento de suelos con presencia de relaves mineros.

Método

Método inductivo-deductivo. Este método permitió el análisis de conocimientos de general a específico. Es decir, el análisis de las variables en el marco de los objetivos de investigación fue científico, por lo que la hipótesis se puede confirmar. Esto significa que la información de varios estudios se centra en evaluar los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros (Jiménez, 2017)

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Fuentes secundarias: incluyó la revisión de la literatura y la recopilación de información sobre trabajos similares.

Técnica de análisis documental: para obtener la documentación teórica del problema y objeto de investigación de este tema, se revisaron las investigaciones y eventos similares al tema de métodos de tratamiento de suelos contaminados con relaves mineros. Para ello, se utilizaron las siguientes herramientas de recopilación de información: a) Motores de

búsqueda o bases de datos virtuales: Scielo, Redalyc, Dialnet, etc.; estos facilitaron la extracción de artículos científicos, revistas científicas, artículos y trabajos, que obviamente son de contenido laboral, b) fichas de observación y c) hojas de cálculo de Excel para organizar el contenido y la cantidad de fuentes de información como parte de la revisión sistemática de la literatura.

Técnicas e instrumentos de análisis de datos

Una vez obtenida la información y los datos necesarios, se procedió a ordenar y organizar la información mediante el uso de Microsoft Excel, permitiendo elaborar tablas que revelan los resultados finales de las variables, cabe mencionar también, para la redacción del informe se utilizó el paquete office 2019.

Además, los datos obtenidos del estudio retrospectivo se analizaron e interpretaron, de manera que los parámetros que se deben considerar para elegir los métodos de tratamiento de los suelos contaminados con desechos mineros. En este proceso, se utilizaron gráficos estadísticos, como tablas, gráficos de barras y gráficos circulares

Un gráfico estadístico es una tabla que se utiliza para organizar, categorizar y resumir los datos relacionados recopilados para encontrar información sobre el tema. Su uso permite registrar, clasificar y resumir los resultados cuantitativos recogidos de cualquier variable de la encuesta, así como establecer relaciones entre variables.

Aspectos éticos de la investigación.

Se está citando a todas las fuentes consultadas y consideradas en esta investigación, asimismo la información obtenida será usada solo con fines académicos, basándonos en el método científico y sin dejar de lado valores que un investigador debe observar; todos los resultados se presentan sin alterar datos reales. Además, el presente trabajo se desarrolló bajo las consideraciones que maneja la Universidad Privada del Norte. Entre ellas las más importantes donde se refleja que el autor: a) Realizará investigaciones que lleven a aumentar el bienestar de la población y la comunidad de interés, b) Cumplirá las normas institucionales que regulan la investigación científica, c) Mostrará su investigación, metodología y análisis de la forma más precisa posible, d) Citará apropiadamente las investigaciones relevantes utilizadas en la revisión sistemática, utilizando las normas APA correctamente.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Los resultados de los métodos que se vienen usando por su alta eficiencia se muestran en las tablas siguiente, dichos resultados se han extraído como producto de la revisión sistemática de la literatura del tema en cuestión.

3.1. Resultados de las características fisicoquímicas de los suelos contaminados con relaves mineros

Tabla 1.

Propiedades fisicoquímicas de los suelos utilizados, durante la Fitorremediación con Brassica campestris L.

Parámetro	Unidad	Lote A		Lote B		Lote C	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
pH	-	6.23	7.48	6.15	7.94	6.65	7.9
C.E	dS/m	0.52	0.55	0.54	0.59	0.53	0.5
CaCO ₃	%	2.1	3.0	0	2	0	1.3
M.O	%	2.97	2.12	2.74	2.18	3.17	3.48
Arena	%	49	47	35	39	29	41
Limo	%	35	31	45	37	43	29
Arcilla	%	29	22	20	24	28	30
Clase Textural		Franco	Franco	Franco	Franco	Franco	Franco
CIC		11.84	11.2	10.88	14.08	11.15	16.3

Fuente: Ogosi (2018)

pH: Potencial de Hidrógeno, C.E: Conductividad eléctrica, M.O: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico.

En la tabla 1, se presenta las propiedades de los suelos que fueron utilizados antes y después del experimento.

Tabla 2.

Propiedades fisicoquímicas de los suelos utilizados, durante la Fitorremediación con Zea mays L

Características	Unidad	Mantaro	Muqui
Clase textural		Franco Arcilloso	Franco Arenoso
pH 1:1	---	7.3	7.85
C.E.	dS/m	0.18	0.38
CaCO ₃	%	0	15.7
M.O.	%	3.56	2.3
P disponible	mg/kg	29.7	15.8
K disponible	mg/kg	239	149
CIC total	meq/100	20	11.2
Saturación de bases	%	100	100
Ca	mg/kg	17.08	9.57
Mg	mg/kg	2.37	1.23
K	mg/kg	0.47	0.33
Na	mg/kg	0.09	0.97
Pb	mg/kg	208.24	1174.44
Cd	mg/kg	6.76	8.26

Fuente: Munive (2018)

Tabla 3.

Análisis de caracterización de las enmiendas orgánicas

Características	Unidad	Compost	Vermicompost
pH 1:1	---	7.23	6.82
C.E.	dS/m	1.31	1.87
M.O.	%	20.18	29.55
N	%	0.81	1.1
P ₂ O ₅	%	0.52	1.09
K ₂ O	%	0.41	0.38
CaO	%	1.61	2.3
MgO	%	0.32	0.49
Hd	%	23.58	39.74
Na	%	0.02	0.02
Pb	mg/kg	31.08	35.1
Cd	mg/kg	39.25	39.25

Fuente: Munive (2018)

Se observa en la Tabla 2, que presentan diferente textura; el suelo del Mantaro textura fina (Franco Arcilloso) mientras que el suelo de Muqui textura gruesa (Franco Arenoso). Así mismo en la Tabla 3, se evidencia diferencias entre los valores para las enmiendas orgánicas,

siendo superior el vermicompost en los diferentes parámetros, excepto en pH, estas diferencias pueden influenciar en la fitorremediación propuesta con el maíz.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas de los suelos evaluados en la remediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas.

Prof. (cm)	pH	CaCO ₃ (mg/ kg)	CT (%)	CO (%)	CIC (cmol/ kg)	Feo	Fed	Mno	Mnd	C	FEL	FIL	J	Y	A (%9)	L (%)	Ar (%)
0-1	3.2	0	1.14	1.21	15.37	20.9	51.04	0.17	0.15	12	8	3	17	60	18.9	51.6	29.5
4-5	3.27	0	1.51	1.11	18.36	15.75	49.8	0.09	0.09	13	10	3	20	54	18.4	48.3	33.3
1015	2.31	0	0.95	1.52	18.36	20.9	63.35	0.05	0.06	13	9	4	24	50	21.2	46.1	32.7
40-50	2.93	0	0.44	0.93	14.5	14.1	42.17	0.06	0.06	25	20	6	19	30	48.11	27.36	24.53
0-1	6.33	0.74	1	1.28	17.55	3.92	19.17	0.36	0.33	49	26	22	0	3	59.57	22.26	18.17
4-5	5.97	0.89	0.98	0.89	14.67	4.01	15.68	0.33	0.3	52	21	27	0	0	65.34	22.35	12.3
1015	5.96	0.84	0.67	0.88	16.43	3.62	17.76	0.31	0.29	51	22	27	0	0	63.28	22.53	14.2
40-50	4.05	0.39	0.55	0.62	11.01	3.16	14.32	0.19	0.18	52	24	24	0	0	71.55	19.24	9.21
0-1	6.82	0.63	3.18	3.09	15.55	1.09	6.97	0.47	0.4	71	16	13	0	0	62.71	30.05	7.24
4-5	6.49	0.59	0.88	0.79	9.48	1.04	7.15	0.36	0.29	69	15	16	0	0	63.99	29.04	6.97
1015	5.07	0.71	0.41	0.34	1.82	1.02	6.65	0.28	0.25	81	12	7	0	0	69.42	24.36	6.22
40-50	5.28	0.5	0.31	0.25	6.23	1.44	6.44	0.31	0.27	85	12	3	0	0	68.08	24.31	7.62

Fuente: Sarria (2015)

SC: suelo contaminado, SR: suelo remediado, SNC: suelo no contaminado.

pH: pH del suelo (1:2.5); CaCO₃: carbonato de calcio (mg/kg); CT: %carbono total; CO: %carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio Catiónico (cmol/kg); Feo: hierro amorfo (g/kg); Fed: hierro libre (g/kg); Mno: manganeso amorfo (g/kg); Mnd: Manganeso libre(g/kg); C: cuarzo; FEL: feldespatos; FIL: filosilicatos; J: jarosita; Y: yeso; A: %arena; L: %limo; Ar: %arcilla.

Según la tabla 4, hasta 5 cm de profundidad el SR y SNC presentaron textura franco-arenosa, mientras que el SC es franco arcillo limoso, a partir de 10 cm existe variaciones, debido a la presencia de material.

Tabla 5.

Propiedades químicas de suelos contaminados con Zn, evaluados para la aplicación de la técnica electrorremediación

Tratamiento	Parámetros	
	pH	Zn (mg/kg)
T1	4.59	1131
T2	4.59	1131

Fuente: Llancari (2018)

En la tabla 5, se puede apreciar que los tratamientos T1 y T2 presentaron las mismas características respecto al pH y Zn, sin embargo el tiempo de humectación fue diferente, siendo de 24 h para el T1 y de 12 h para el T2.

Tabla 6.

Características fisicoquímicas del suelo utilizado durante la remediación con microorganismos eficaces (EM)

Parámetros	Unidad	Resultado
PH	---	7.98
Conductividad Eléctrica	(dS/m)	0.46
CaCO ₃	%	15.32
Materia Orgánica	%	2.05
Fosforo disponible	ppm	18.5
Potasio disponible	ppm	145
Clase Textural	---	Franco
CIC	cmol/kg	19.72
Cadmio	ppm	14.79

Fuente: Kcana (2021)

Se observa en la Tabla 6, las características de suelo utilizado, así como la concentración del Cadmio los cuales fueron sometidos a diferentes concentraciones de EM

Tabla 7.

Parámetros fisicoquímicos del abono Bocashi y suelo a tratar

Características	Unidad	Bocashi	Suelo inicial
pH	---	7.97	3.75
M.O.	%	42.02	2.75
COT	%	72.44	1.6
P	mg/kg	2084	14.6
N	%	1.89	1.89
K	mg/kg	2.93	321
Pb	mg/kg	---	95.45

Fuente: Mauricio (2016)

En la tabla 7, se aprecia las condiciones de concentración, respecto a las propiedades

físicos y químicos en la que funciono dicho experimento, siendo el valor inicial del Pb de 95.45 mg/kg.

3.2. Resultados de le eficiencia de métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros

Tabla 8.

Eficiencia de remoción de metales pesados, mediante Fitorremediación utilizando Brassica campestris L.

Lote	Metal	Primer monitoreo (Antes de la fitoextracción)	Primer monitoreo (Durante la fitoextracción)	Primer monitoreo (Después de la fitoextracción)	Eficiencia (%)
A	Arsénico	mg/kg 48.3	35.7	11.6	76
	Cadmio	mg/kg 9.28	7.57	5.9	36
	Cobre	mg/kg 60	33.2	13.6	77
	Cromo	mg/kg 10	7.6	5.1	49
	Plomo	mg/kg 111.5	60.6	13.8	88
B	Arsénico	mg/kg 32.5	21.1	11.9	63
	Cadmio	mg/kg 7.99	5	4.75	41
	Cobre	mg/kg 38.5	46.7	16	16
	Cromo	mg/kg 10.4	7.1	3	71
	Plomo	mg/kg 54.5	33.6	20.7	62
C	Arsénico	mg/kg 26	36.2	22.7	13
	Cadmio	mg/kg 3.03	3.56	1.8	41
	Cobre	mg/kg 33.2	39.9	28.8	13
	Cromo	mg/kg 10.3	11.8	13.7	---
	Plomo	mg/kg 44.2	48	34	23

Fuente: Ogoşi (2018)

En la tabla 8, se muestra la eficiencia de eliminación de metales pesados mediante la fitoextracción utilizando *Brassica campestris L.*, las máximas eficiencias de remoción se presentaron en el Lote A para el Plomo y Cobre con 88% y 77% respectivamente y las mínimas eficiencias se evidencia en el Lote C para el Arsénico (13%) y Cobre 13 (13%). Por otro lado, en el Lote C, no se presentó remoción alguna para el Cromo, el mismo que durante el tratamiento incrementó su concentración en el suelo de 10.3 mg/kg a 13.7 mg/kg

Tabla 9.

Eficiencia de remoción de plomo y cadmio mediante la fitorremediación con el cultivo de maíz

Tratamientos	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)		
	Antes del tratamiento (suelo + enmienda)	Después del tratamiento	% Eficiencia	Antes del tratamiento (suelo + enmienda)	Después del tratamiento	% Eficiencia
MA T1 (Compost)	239.32	220.96	8	46.01	7.6	83
MA T2 (Vermicompost)	243.34	187.5	23	46.01	7.24	84
MA T3 (Químico)	208.24	173.9	16	6.76	7.29	---
MU T1 (Compost)	1205.52	1854.16	---	47.51	9.25	81
MU T2 (Vermicompost)	1209.54	1703.77	---	47.51	8.98	81
MU T3 (Químico)	1174.44	2114.18	---	8.26	9.43	---

Fuente: Munive (2018)

En la tabla 9, se observa que las enmiendas orgánicas contribuyen en alguna medida a una mayor extracción de Cadmio, evidenciándose máximas eficiencias de remoción en el tratamiento MA T1 y MA T2 con el 83% y 84% respectivamente, similar comportamiento presento MU T2 y MU T3. De igual forma la máxima eficiencia de remoción de Plomo se registró en el MA T2 (Vermicompost) con 23% y la mínima MA T1 (8%). Por otro lado, no se reportó remoción alguna en el MU T1, MU T2 y MU T3 para el Pb y en el MA T3 y MU T3 para el Cd.

Tabla 10.

Eficiencia de remoción de metales pesados, mediante la utilización de enmiendas orgánicas e inorgánicas

Metal	Suelo Prof. (cm)	0-1				4-5				10-15				40-50			
		SNC	SC	SR	% Eficiencia	SNC	SC	SR	% Eficiencia	SNC	SC	SR	% Eficiencia	SNC	SC	SR	% Eficiencia
CuT	mg/kg	16.1	245	135	45	14.6	158	125	21	13.4	117	118	---	16	127	153	---
ZnT	mg/kg	51.8	759	173	77	43.2	421	165	61	46.8	262	161	39	46.7	214	132	38
AsT	mg/kg	10.4	456	58.1	87	9.01	388	56.3	85	7.91	637	48.2	92	8.23	288	29.9	90
PbT	mg/kg	37.1	497	102	79	57	735	91	88	40.1	907	81	91	33.3	701	77.2	89
CuW	mg/kg	0.16	90.7	2.03	98	0.2	41.7	1.18	97	0.14	35.5	1.15	97	0.21	24.6	6.1	75
ZnW	mg/kg	0.22	538	3.47	99	0.18	325	2.19	99	0.24	151	2.55	98	0.2	91.3	13.2	86
AsW	mg/kg	0.1	0.25	0.09	64	0.07	0.26	0.05	81	0.04	0.3	0.02	93	0.02	0.11	0.01	91
PbW	mg/kg	0.25	0.02	0.63	---	0.48	0.03	0.6	---	0.6	0.05	0.5	---	0.52	0.1	0.11	---
CuE	mg/kg	6.45	143	73.8	48	4.71	83.4	65.3	22	3.68	48.3	69.2	---	3.75	44.7	80.5	---
ZnE	mg/kg	11.6	697	33.1	95	4.07	331	31.9	90	2.44	153	36.9	76	0.95	89.6	23.5	74
AsE	mg/kg	0.29	3.31	0.38	89	0.16	1.72	0.2	88	0.13	14.2	0.18	99	0.07	0.92	0.17	82
PbE	mg/kg	12.4	2.82	14.3	---	10.3	4.1	14.5	---	11.4	5.47	16.2	---	6.34	3.39	17.6	---
pH		6.88	3.34	6.47	---	6.53	3.46	6.19	---	5.28	2.51	6.11	---	5.37	3.02	4.19	---
CE		141	2935	395	---	89.8	3145	76.6	---	5.05	2645	28.3	---	40.5	2660	13.5	----

Fuente: Sarria (2015)

En la tabla 10, se aprecia que a profundidades de 0-1, 4-5 y 10-15 cm, el ZnW y CuW presentaron las máximas eficiencias de remoción comprendidas entre 98 - 99% y 97-98% respectivamente, del mismo modo a una profundidad de 40-50 cm se registró para el AsW siendo del 91%. Por otro lado, se puede evidenciar que no existió remoción alguna para PbW y PbE en todas las profundidades evaluadas, similar comportamiento presento CuE (10-15 cm), el CuT y CuE a 40-50 cm.

Durante el experimento la máxima eficiencia fue de 99% y la mínima de 21%, los cuales son dependientes de la profundidad, tipo y estado del metal.

Tabla 11.

Eficiencia en la remediación de suelos contaminados con Zn, mediante la

Electrorremediación

Tratamiento	Metal	Unidad	Suelo sin tratamiento	Suelo con tratamiento	% Eficiencia
T1	Zn	mg/kg	1131	259.2	77
T2	Zn	mg/kg	1131	324.6	71

Fuente: Llancari (2018)

En la tabla 1, se aprecia que mediante la técnica de electroremediación, la máxima eficiencia de remoción se logró a un tiempo de humectación del suelo de 24 h siendo de 77% para el T1.

Tabla 12.

Eficiencia de remoción de suelos contaminados con Cadmio mediante la utilización de Microorganismos eficientes (EM)

Tratamiento	Cd Inicial (ppm)	Cd Final (promedio) (ppm)	% Eficiencia
20% EM + 20% Compost	14.79	13	13
15% EM + 20% Compost	14.79	13.15	11
10% EM + 20% Compost	14.79	13.5	9
5% EM + 20% Compost	14.79	13.93	6
0% EM + 20% Compost	14.79	13.95	6
20% EM	14.79	14.34	3
15% EM	14.79	14.66	1
10% EM	14.79	14.71	1
5% EM	14.79	14.81	---
0% EM	14.79	14.85	---

Fuente: Kcana (2021)

En la tabla 12, se observa que la enmienda orgánica (compost) contribuye en alguna medida a una mayor eliminación de Cadmio, evidenciándose máximas eficiencias de remoción en el tratamiento conformado por el 20% EM + 20% Compost con un 13% de remoción, por otro las eficiencias más bajas se registraron en los tratamientos donde no se utilizó compost.

Tabla 13.

Eficiencia de Biorremediación de suelo contaminado con Pb mediante abono Bocashi

Parámetro	Unidad	Pretratamiento	Post Tratamiento	% Eficiencia
Plomo	mg/kg	95.5	31.2	67%

Fuente: Mauricio (2016)

En la tabla 13, se aprecia que mediante la utilización de abono Bocashi se puede recuperar suelos contaminados con Pb, lográndose una eficiencia hasta el 75% de remoción.

Tabla 14.

Comparación del promedio de las eficiencias de métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros

Método de recuperación	Autor	% Eficiencia
Fitorremediación utilizando Brassica campestris L.	Ogosi (2018)	48%
Fitorremediación (cultivo de maíz)	Munive (2018)	54%
Biorremediación con enmiendas orgánicas	Sarria et al.(2015)	78%
Electrorremediación	Llancari (2018)	74%
Biorremediación (Microorganismos eficientes - EM)	Kcana (2021)	6%
Biorremediación con abono bocashi	Mauricio (2016)	67%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 14, se muestra el promedio de la eficiencia de los principales métodos que se viene utilizando para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros.

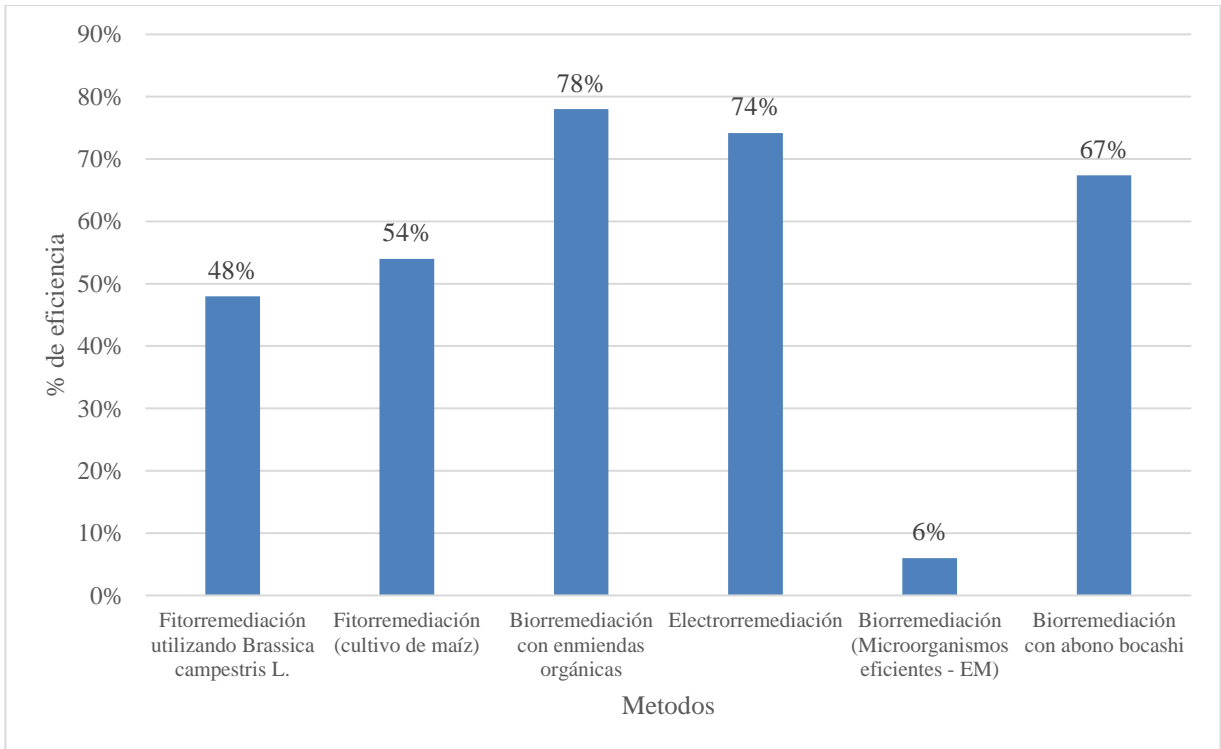


Figura 1. Comparación de los promedios de los métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros según su eficiencia.

De acuerdo con la figura 1, el método más eficiente de acuerdo a los promedios, para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros es la biorremediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas (78%), seguida de la electrorremediación (74%) y Biorremediación con Bochashi (67%). Por otro lado, mediante la utilización de microorganismos eficaces solo se logró una eficiencia de 6%.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

Dentro de las características fisicoquímicas de los suelos contaminados con relaves mineros, resalta el potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, carbonatos, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, textura, así como P, K, Ca, Mg y Na (tabla 1 y 2), la existencia de arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, zinc, etc, son muy resaltantes en estos suelos, cuyas concentraciones no cumplen con las normas ambientales vigentes. Sin embargo, al aplicar ciertos métodos de tratamiento han logrado cumplir con los estándares pertinentes. El potencial de hidrógeno (pH) característico de los suelos contaminados es muy resaltante, que por lo general son ácidos con niveles altos toxicidad.

De acuerdo con Sarria et al. (2015), encontró toxicidad sobre las bacterias entre 40 cm y 50 cm de profundidad debido, principalmente, al pH de la solución del suelo y a los contenidos de Cu y Zn. Por ello Nieves (2019) expresa que los metales pesados están directamente relacionados con los riesgos por contaminación de los suelos, toxicidad en las plantas y los efectos negativos sobre la calidad de los recursos naturales y el ambiente influenciado por factores como el potencial redox, el pH, el contenido de materia orgánica, por la capacidad de intercambio catiónico. Asimismo, Munive (2018) alude que la planta de maíz absorbe los metales pesados del suelo como lo demuestra la mayor acumulación de plomo y cadmio en la raíz de ésta.

Por otro lado, respecto a los métodos de recuperación de suelos contaminados con relaves mineros usados en la actualidad, en figura 1, se resume en función a su eficiencia de remoción, el cual indica que la Biorremediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas logro remover 78% de los contaminantes del suelo. Por otro lado, mediante la Electrorremediación presento una eficiencia de 74%, seguido de la Biorremediación con

abono bocachi que alcanzó una remoción de 67%. Por su parte la eficiencia de los estudios enfocados en la Fitorremediación estuvo comprendido entre 48 y 54%, siendo menos eficiente la Biorremediación con microorganismos eficaces (EM) con 6%. De este modo, no se cumple con la hipótesis formulada, donde se establece que mediante fitorremediación se lograría una eficiencia superior al 90%.

A comparación de Sarria et al. (2015), en su estudio reveló que después de aplicar enmiendas orgánicas (CO) e inorgánicas (CaCO₃, Fe y Mn) se redujeron las concentraciones de Cu, Zn, As, Pb, Zn y Pb. Asimismo, Munive (2018) sostiene que la fitorremediación con maíz contribuye a la solubilización de los metales pesados (Pb y Cd) para una mejor absorción.

Limitaciones

Esta investigación ha tenido como limitantes la restricción de acceso a información de los artículos científicos en páginas virtuales respecto a métodos de recuperación de suelos. Asimismo, se ha visto condicionada en algunos artículos científicos en su contenido, Además, otra de las limitaciones ha sido la incompleta estructura de las investigaciones, principalmente carece de resultados o metodología.

Conclusiones

Según los estudios contemplados entre los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros, está la biorremediación, electorremediación y fitorremediación, cuya eficiencia depende del tipo de contaminante a tratar.

Con los datos analizados se establece que, dentro de las características fisicoquímicas iniciales de un suelo contaminado con relaves mineros, resalta la alta acidez, y concentraciones elevadas de metales pesados como: cadmio, cobre, cromo, plomo, zinc y

arsénico, cuya variabilidad de metales conlleva a la aplicación de diferentes métodos de remediación.

Según el análisis comparativo se infiere que los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros, está la biorremediación con enmiendas orgánicas e inorgánicas con una eficiencia de remoción del 78%, seguido de la Electrorremediación con 74%, fitorremediación (54%) y el de menor la Biorremediación con microorganismos eficaces (EM) con 6%.

La eficiencia de remoción de los métodos estudiados, pueden variar el uno del otro, dependiendo del tipo de contaminante, especie, sustrato o microorganismos utilizados, así como de las condiciones iniciales del suelo, tiempo de tratamiento y especiaciones y naturaleza de los contaminantes.

Las técnicas pasivas para el tratamiento de relaves mineros, son recomendables, debido a que no altera los ecosistemas y son amigables y sostenibles con el ambiente.

REFERENCIAS

- Abasolo, V.E. (2011). Revalorización de los saberes tradicionales campesinos relacionados con el manejo de tierras agrícolas. *Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana*, 3(11), 98-120.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=211019068006>
- Álvarez, S.S. (2019). *Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Arce, S. y Calderón, M. (2017). Suelos contaminados con plomo en la Ciudad de La OroyaJunín y su impacto en las aguas del Río Mantaro. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, 20(40), 48 – 55.
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/14389/1272>
- Arias, F.G. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica*. Caracas, Venezuela. Episteme.
- Ávila, P.F.; Candeias, C.; Ferreira, A.; Ferreira da Silva, E.; Rocha, F. (2018). Absorção de metais/metaloídeos por Brassica olerácea L. e riscos químicos de consumo em solos contaminados de duas minas portuguesas de tungsténio. *Geoquímica dos Processos de Alteração, dos Solos e dos Processos Biogeoquímicos*, 201- 205.
- Berg, V.D.R., Denneman, C.A.J. y Riels, J.M. (2013). Risk assessment of contaminated soil: Proposals for adjusted, toxicologically bases Dutch soil clean-up criteria. *Contaminated Soil*, 93, 349- 364.
- Cortes, L.E, Bravo, I., Martín F.J. y Menjívar, J.C. (2015). Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agronómica*, 65(3), 232-238. doi:

<http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>.

Díaz, W. (2016). Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú. Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, 19(38), 103 – 110.

<https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13575>

Flores, S., Nuñez, P., Zegarra, E., Flores, N. y Flores, J. (2019). Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de Cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible. Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, 22(44), 85 – 94. <http://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.17289>

Gabioud, E.A., Wilson, M.G., y Sasal, M.C. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencias del Suelo*, 29(2), 129-139.

https://www.researchgate.net/publication/262654569_Analisis_de_la_estabilidad_de_agregados_por_el_metodo_de_Le_Bissonnais_en_tres_ordenes_de_suelos ARG

Jiménez, A. 2017. Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento.

Rev. Escuela de Administración de Negocios.Colombia. DOI:

<https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (Vol. 3). México: McGraw-Hill.

Grinnell, R. (1997). *Social work research of evaluation: Quantitative and qualitative approaches*. Itasca, Illinois USA: Peacock Publisher

Guevara, I., Lloclla, H., Carreño, C.R., Esqueche, A.S. y Zúñiga, G.E. (2017). Especies de *Bacillus* productoras de acidez aisladas de suelos salinos en ciudad Eten – Lambayeque. *UCV-Scientia*, 9, 127 – 132. <http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/UCV-SCIENTIA/article/view/1562>

- Kcana, H.M. (2021). *Microorganismos eficientes (EM) en la recuperación de un suelo contaminado con cadmio del distrito de San Jerónimo, Cusco* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima – Perú.
- Kerlinger, F. (1975). *Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento*. México. Interamericana.
- Lodoño, I.P. (2020). *Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con Mercurio, Cadmio y Plomo (Hg, Cd, Pb)* (Tesis de Grado). Universidad de Montería, Córdova - Colombia.
- López, E.I. (2014). *Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras* (Tesis de grado). Corporación Universitaria Lasallista, Caladas - Colombia.
- Loroña, F., Gómez, W., Jaco, E., Reynaga, C., Guiño, M., Gamarra, J., Díaz, F., Huaman, N., Rafael, P., Mayte, J., Moran, M. y Carhuancho, L.C. (2018). Eficiencia de la biorremediación de suelos contaminados con Diesel B5 mediante Microorganismo Eficaces (EM). *Cátedra Villarreal*, 6(2), 189- 209.
<http://dx.doi.org/10.24039/cv201862278>
- Llancari, B.E. (2018). *Recuperación del suelo contaminado con Zn mediante la Electrorremediación de la ex - mina santa rosa de cata de cañete* (Tesis de grado). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa el Salvador- Perú.
- Mauricio, S. S. (2016). *Biorremediación con abono bocashi para la recuperación de los suelos contaminados por plomo (Pb) en la comunidad Vicco-Pasco 2016* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima - Perú.
- Mejía, E., Osorno, L. y Osorio, N.W. (2015). Residuos de la construcción: una opción para la recuperación de suelos. *Revista EIA*, 12(2), 55-60.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149240052005>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A. y Gamarra, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea*

- mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551 – 560. 10.17268/sci.agropecu.2018.04.11
- Nieves, Y., Parra, N., Villanueva, S. y Henríquez, M. (2019). Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(1), 96-104. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70758484010>
- Ogosi, S. (2018). *Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando Brassica campestris L. en la estación experimental El Mantaro-Junín* (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo – Perú.
- Pino, N.J., Carvajal, S., Gallo, A. y Peñuela, G. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel. *Producción + Limpia*, 7(1), 101-108. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552012000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Rodríguez, E. (2005). *Metodología de la Investigación*. México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Romero, A., y Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Diseño y tecnología*, 13 (1), 75 - 82. Disponible en <https://www.redalyc.org/html/816/81619984010/>
- Sarria, M.M., Cortés, L.E. y Peinado, J.M. (2015). Evaluación de la recuperación de suelos contaminados por el vertido de Aznalcóllar. *Acta Agronómica*, 64(2), 156-164. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169933767007>
- Sernaqué, V., Villanueva, E. y Mialhe, E. (2017). Caracterización molecular de Bacillus Spp. productores de proteasas aislados de suelos de la Universidad Nacional Trujillo. *UCV-SCIENTIA*, 29(1), 128 - 131. <http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/UCV-SCIENTIA/article/view/1563>
- Vidal, J.V., Marrugo, J.L., Jaramillo, B. y Pérez, L.M. (2010). Remediación de suelos

contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte*, 27, 113-129.

<https://www.researchgate.net/publication/279504484> Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo *Cecropia peltata*

Zhu, M., Wang, H., Liu, L., Ji, R., & Wang, X. (2017). Preparation and characterization of permeable bricks from gangue and tailings. *Construction and Building Materials*, 148, 484-491. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817309868>

Zúñiga, O., Osorio, J.C., Cuero, R. y Peña, J.A. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 64(1), 5769-5779.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922364003>