



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA BIOLÓGICA Y BIOMÉDICA

INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL

TRABAJO DE TITULACIÓN

Diseño de un sistema de Biorremediación para la recuperación de la relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS ubicada en el cantón Zaruma provincia de El Oro

Autor : Cumbicus Herrera, Pablo Andrés

Directora: Aguirre Chamba, Paulina Isabel

LOJA - ECUADOR

2021



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2021

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 15 de marzo del 2021

Doctora

Yadira González Rentería

Coordinadora de la Titulación de Gestión Ambiental

Ciudad. -

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: Diseño de un sistema de Biorremediación para la recuperación de la relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS ubicada en el cantón Zaruma provincia de El Oro realizado por Pablo Andrés Cumbicus Herrera, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación de este. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Firma del director del Trabajo de Titulación

Paulina Isabel Aguirre Chamba

C.I.: 1104265226

Declaración de autoría y cesión de derechos

“Yo, Pablo Andrés Cumbicus Herrera, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor del Trabajo de Titulación denominado: Diseño de un sistema de para la recuperación de La relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS ubicada en el Cantón Zaruma provincia de El Oro, de la Titulación Ingeniería en Gestión Ambiental, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Marco teórico de Biorremediación, Biohidrometalurgia y los Criterios de calidad del suelo, Capítulo 2. Evidencia empírica. Metodología de la investigación, Capítulo 3. Resultados del diseño de biorremediación, Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones, siendo Paulina Isabel Aguirre Chamba, directora del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación con la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:.....

Autor: Pablo Andrés Cumbicus Herrera

C.I.: 1104087372

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación está dedicado a toda mi familia, en especial a el alma de mi querida abuelita Lola Jara Rivera, sin su amor y buenos consejos no podría ser el hombre que soy ahora.

Agradecimiento

Primeramente, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de realizar este trabajo de titulación y el estudiar esta carrera, la cual me ayudará a proteger este planeta que creo con mucho amor para nosotros sus hijos y de la misma manera mi gratitud a mi familia por apoyarme en todo durante la realización de este.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental de la Universidad Técnica Particular de Loja, de manera muy especial a la doctora Paulina Aguirre, que gracias a su guía y apoyo constante pude culminar mi tesis.

Pablo Andrés Cumbicus Herrera

Índice de Contenido

Carátula.....	I
Aprobación del director del Trabajo de Titulación.....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento	V
Índice de Contenido	VI
Índice de Tablas.....	VIII
Índice de Figuras	VIII
Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción.....	3
Capítulo uno.....	5
Marco teórico	5
1.1 Biorremediación	5
1.1.1 Tipos de Biorremediación.....	5
1.1.1.1 Biorremediación In situ	5
1.1.1.2 Biorremediación <i>Ex situ</i>	6
1.1.2 Fitorremediación	6
1.1.2.1 <i>Chrysopogon zizanioides</i>	7
1.2 Biohidrometalurgia.....	7
1.2.1 Biolixiviación	7
1.2.1.1 Bacteria <i>Acidithiobacillus ferroxidans</i>	8
1.3 Suelos contaminados con metales pesados	8
1.3.1 Relaves mineros refractarios.....	8
1.3.2 Criterios de calidad del suelo y remediación	8
Capítulo dos.....	11
Materiales y métodos.....	11
2.1 Área de estudio.....	11
2.2 Metodología	11

2.2.2.1 Lixiviación <i>in situ</i> por percolación utilizan la bacteria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	12
2.2.2.2 Fitorremediación con <i>Chrysopogon zizanioides</i>	13
Capítulo tres.....	14
Resultados y discusión	14
3.1 Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los residuos sólidos mineros de los relaves presentes en la zona minera del cantón Zaruma.	14
Composición mineralógica del relave mineral.....	15
3.2 Diseño de un sistema de Biorremediación (planta/microorganismo)	15
3.2.1 Diseño de un sistema de biolixiviación de minerales sulfurados, usando microorganismos acidófilos de la especie <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	15
3.2.2 Biolixiviación de minerales sulfurados, usando microorganismos acidófilos de la especie <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	17
3.2.3 Diseño de un sistema de Fitorremediación con la especie vegetal <i>Chrysopogon zizanioides</i>	20
Conclusiones.....	24
Recomendaciones	25
Referencias	26
Apéndice	29

Índice de Tablas

Tabla 1. Criterios de calidad de suelo (valores a fondo)	8
Tabla 2 Factores indicativos de Contaminación	9
Tabla 3 Análisis del pH y metales Pesados en el suelo del relave	14
Tabla 4 Composición mineralógica del yacimiento del relave.....	15
Tabla 5 Análisis de la composición del suelo del relave minero, una vez lixiviados por las bacterias.....	17
Tabla 6 Composición mineralógica y resultados de la lixiviación con la bacteria <i>Acidithiobacillus ferroxidans</i>	18
Tabla 7 Composición mineralógica de los resultados de la fitorremediación del relave minero utilizando la especie.	22
Tabla 8 Análisis de ph y cdel suelo minero, después de 10 meses de fitorremediación con la planta <i>Chrysopogon zizanioides</i>	21

Índice de Figuras

Figura 1. Fotografía de la Mina de la sociedad civil mineraGOLDMINS	11
Figura 2 Esquema de una Operación de biolixiviación en Pila	16
Figura 3 Lixiviación de los minerales Calcosina, Covelina y Bornita.	19
Figura 4 Lixiviación del hierro, en los minerales Limonita, Pirrotita, Pirita y Calcopirita.	20
Figura 5 Relavera de la mina GOLDMINS	29

Resumen

El presente trabajo de titulación “Diseño de un sistema de Biorremediación para la recuperación de la relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS ubicada en el cantón Zaruma provincia de El Oro” aborda el diseño de un sistema de recuperación y remediación del suelo mediante la utilización de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* la cual fue distribuida mediante un sistema de aspersión por toda la pila minera, lixiviando la mayor parte del hierro (93,25%) y cobre (31,15%), y por parte en la fitorremediación se cultivó 12000 colinos de la planta *Chrysopogon zizanioides*, la cual nos permitió elevar el pH del suelo de 4,53 a 7,23 y absorber metales pesados como plomo, mercurio, zinc y cobre, dando como resultado un suelo apto según las normas ecuatorianas de calidad del suelo.

Palabras claves: Biorremediación, Relave, Fitorremediación.

Abstract

This degree work "Design of a Bioremediation system for the recovery of the tailings dam of the mining civil society GOLDMINS located in the Zaruma canton, province of El Oro" deals with the design of a soil recovery and remediation system using the bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, which was distributed through a sprinkling system throughout the mining pile, The phytoremediation was carried out by cultivating 12,000 colinos of the *Chrysopogon zizanioides* plant, which allowed us to raise the pH of the soil from 4.53 to 7.23 and to absorb heavy metals such as lead, mercury, zinc and copper, resulting in a soil suitable according to Ecuadorian soil quality standards.

Key words: Bioremediation, Tailings, Phytoremediation.

Introducción

En América Latina, el impacto que tiene la minería en el medio ambiente y en el tejido social, es desolador (Valderrey Villar & Lemus Delgado, 2019). El impacto que ha generado en países extractivistas como el Ecuador ha ocasionado la contaminación de miles de hectáreas de suelo y recursos hídricos, afectando y perturbando a la flora, fauna y el entorno ambiental (Petro Cardona & Mercado Montero, 2014). Los metales pesados o de baja ley son los principales contaminantes ambientales que presenta la minería, con resultados negativos hacia la salud de las poblaciones aledañas los cuales son altamente tóxicos y se encuentran presentes en todos los comportamientos ambientales (Pérez et al., 2015).

Las extracciones de material minero conllevan el uso y transformación de grandes extensiones y cantidades de tierra. Empezando por la etapa inicial, operacional y tras el abandono, se dan una serie de impactos al medio ambiente. (E. Romero, 2006) En este contexto, en el Ecuador por muchos años la minería artesanal y a pequeña escala no ha sido controlada en temas ambientales y de salud. Durante el proceso de extracción de minerales, se utilizan grandes cantidades de reactivos, los cuales resultan ser muy tóxicos para el ecosistema y sus organismos (Sancher & Acosta, 2012).

La biorremediación surge de la necesidad de disminuir el impacto ambiental negativo de los contaminantes en los diferentes ambientes (agua, aire y suelos) usando microorganismos, plantas o enzimas, de manera estratégica con el fin de restaurar la calidad ambiental, de acuerdo con las necesidades y dimensiones del problema (Castro et al., 2004). Este bioproceso está surgiendo como una prometedora tecnología que presenta varias ventajas potenciales sobre las tecnologías convencionales como: menor costo, son menos intrusivos en el sitio contaminado, más respetuosas del medio ambiente en términos de sus productos finales y requieren de un mínimo o ningún tratamiento posterior (EPA, 2004 citado en Humberto & Rojas, 2011).

De ahí que este proyecto tiene como principal objetivo diseñar un sistema de Biorremediación para el tratamiento de residuos sólidos mineros, con el fin de disminuir la concentración de metales pesados presentes en la misma y llevar a cabo la restauración ambiental del suelo.

a. Objetivo general

- Diseñar un sistema de Biorremediación que permita la recuperación y estabilización de suelos degradados por residuos mineros de relaves provenientes del cantón Zaruma, provincia de El Oro.

b. Objetivos específicos

- Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los residuos sólidos mineros de los relaves presentes en la zona minera del cantón Zaruma.
- Diseñar un sistema de Biorremediación (planta/microorganismo) que permita la mayor remoción teórica de metales pesados para la recuperación de los residuos.

Capítulo uno

Marco teórico

1.1 Biorremediación

La biorremediación es la tecnología que permite la limpieza o descontaminación de terrenos o aguas contaminadas utilizando el potencial metabólico de los microorganismos para transformar los contaminantes en derivados más inocuos, aprovechando de esta manera su capacidad de biodegradación (Watanabe, 2001).

Desde un punto de vista oficial, la Academia Americana de Microbiología define la biorremediación como “la utilización de organismos vivos para reducir o eliminar riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos químicos tóxicos y otros residuos peligrosos” (Gibson & Sayler, 1992 citado en Humberto & Rojas, 2011).

El ámbito de aplicabilidad de la biorremediación es amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia (González-Rojas et al., 2004), por lo tanto es útil para el tratamiento de sólidos (lodos, suelos, residuos), líquidos (aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales) y gases (emisiones).

1.1.1 Tipos de Biorremediación

La biorremediación, puede llevarse a cabo en el lugar contaminado, proceso conocido *in situ*, o bien en un lugar especialmente preparado en un proceso conocido *ex situ*. En este último la matriz contaminada se transfiere a otro lugar (Dzionic et al., 2016).

1.1.1.1 Biorremediación In situ

Existen básicamente cuatro métodos de biorremediación *in situ*: atenuación natural, bioventeo, bioestimulación y bioaumentación (Ruiz et al., 2019). A continuación, se describen cada una de ellas:

El proceso de atenuación natural se refiere al proceso interno de biorremediación, el cual depende de diversos factores físicos, químicos y biológicos que, existiendo condiciones favorables, actúan sin la intervención del ser humano para reducir la masa, volumen, toxicidad o concentración de los contaminantes (Srivastava, 2015).

El bioventeo es la técnica de biorremediación *in situ* que consiste en suministrar viento mediante la adecuación de una red de tubos al área contaminada, de esta manera se provee de tasas “moderadas” de aire que buscan estimular el metabolismo aerobio de los microorganismos presentes y al mismo tiempo promover la oxidación de los compuestos contaminantes, minimizando la volatilización de los contaminantes al medio (Gonzales Rojas, 2011).

La bioestimulación es una estrategia muy similar al bioventeo, esta se basa en la aumentación de la actividad de las bacterias endógenas de suelos contaminados al

proveerles nutrientes, oxígeno, surfactantes y agua (Gallego et al., 2007). Sin embargo, el proceso de bioestimulación tiene sus limitaciones debido a que en ocasiones los suelos no cuentan con los microorganismos adecuados para degradar los contaminantes o la concentración de estos últimos es elevada (Gonzales Rojas, 2011).

Finalmente, la bioaumentación consiste en la adición de microorganismos especializados y exógenos al medio con el fin de optimizar la recuperación del lugar a tratar (Atlas & Unterman, 1999).

1.1.1.2 Biorremediación *Ex situ*

Dentro de los métodos de biorremediación *ex situ* se encuentran la técnica de tratamiento de suelos comúnmente denominado “landfarming”, el composteo, las biopilas y los biorreactores (Gallego et al., 2005).

El procedimiento llamado “landfarming” consiste en la remoción y colocación del suelo contaminado el cual será luego colocado sobre una cama previamente preparada en cuyo fondo se encuentre una geomembrana (la cual tiene como función prevenir las filtraciones de lixiviados al subsuelo) (Gonzales Rojas, 2011). En general, las superficies de suelo excavadas oscilan los 10-35 cm. Una vez que el suelo se ha vaciado en la cama, se estimulan los consorcios microbianos para que inicien con la degradación de los contaminantes (Villegas et al., 2014).

Por otra parte, el composteo es un proceso de degradación de residuos orgánicos basado en el metabolismo microbiano anaerobio, típicamente se lleva a cabo a temperaturas entre 55 – 65 °C. Las temperaturas elevadas son producto de la intensa actividad biológica y obligan al permanente volteo de las pilas de compostaje para evitar la calcinación del material orgánico en las zonas centrales internas (Gómez, 2006)

1.1.2 Fitorremediación

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por plantas y los microorganismos asociados a ellas (Delgadillo et al., 2011). Los que son capaces de contener, extraer, acumular, degradar, inmovilizar o eliminar diversos contaminantes tales como: pesticidas, metales, solventes, explosivos, petróleo y sus derivados, desde los diferentes medios que los contienen (p. ej. suelos, lodos, sedimentos, aguas residuales, aguas subterráneas) (Ingle et al., 2014). Esta tecnología se hace más efectiva a través de la manipulación genética, lo que mejora la capacidad de remediación de las plantas (Cherian & Oliveira, 2005).

1.1.2.1 *Chrysopogon zizanioides*

Chrysopogon zizanioides (Vetiver) es una planta fitorremediadora (Wildschut, 2013), su bajo costo, su simplicidad y efectividad la convierten en una gran herramienta en el tratamiento de aguas, así como en la rehabilitación y fitorremediación de suelos (Truong & Thai Danh, 2015).

Esta especie se caracteriza por contener un fuerte sistema radicular que se extiende a 0,5 m alrededor de la planta, las cuales son raíces muy fuertes, rígidas, largas, verticales y de grosor uniforme, similares a alambres que forman una masa esponjosa, y muy ramificada, llegando a alcanzar los 4 m de profundidad, siendo 2 a 3 m el promedio común (Wildschut, 2013).

1.2 Biohidrometalurgia

Se denomina biohidrometalurgia al tratamiento de recuperación de metales con interés económico-comercial a partir de minerales sulfurados utilizando microorganismos. Esta tecnología ha cobrado mayor importancia en las últimas décadas, tanto desde el punto de vista científico como tecnológico por sus aplicaciones actuales y mayores oportunidades futuras (Saavedra & Cortón, 2014).

1.2.1 Biolixiviación

La biolixiviación constituye una tecnología global (Johnson, 2014; Harrison, 2016 citados en Eyzaguirre Liendo & Castillo Cotrina, 2019), que en términos generales consiste en la solubilización de metales a partir de minerales bajo la acción de bacterias, se constituye como un método ampliamente aceptado para la recuperación posterior de metales (Bosecker, 1997; Saavedra & Cortón, 2014). Es una alternativa económica para la recuperación de metales a partir de sulfuros, especialmente en depósitos de baja ley (Porro, J, & Tedesco, 1988 citados en Delgado & Castillo, 2019).

La biolixiviación se la considera una opción de costo medio a bajo, siendo un método ideal para procesar los desechos generados por las actividades mineras, cuyo contenido es demasiado bajo para ingresar al ciclo de producción tradicional (Rodrigues et al., 2018). Las ventajas adicionales del proceso de biolixiviación son la no producción de dióxido de azufre o cualquier otro gas contaminante y la baja demanda de energía (Rawlings, 2002).

La existencia de importantes recursos de baja ley, remanentes de la explotación de minerales, sumado a los primeros indicios de agotamiento de las reservas minerales, ha impulsado a los investigadores a buscar técnicas rentables y eficientes para la recuperación de metales (Rodrigues et al., 2018). Entre estas técnicas, la biolixiviación, un proceso natural de disoluciones, resulta de la acción de bacterias específicas para extraer metales de los

minerales. El producto que origina es una solución ácida en donde está el metal en su forma soluble (Agudelo López et al., 2002).

1.2.1.1 Bacteria *Acidithiobacillus ferroxidans*

El *Acidithiobacillus ferroxidans* es una bacteria quimiolitotrofa aerobia con capacidades oxidantes de hierro y/o azufre (López-Archilla et al., 2001). Es un microorganismo que su medio de crecimiento debe de ser de una temperatura promedio 30° C, agua acidifica con un rango de 1,8-2,5 pH y una agitación de (100 rpm) (Borrego et al., 2020).

1.3 Suelos contaminados con metales pesados

La presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos y/o compuestos químicos se denomina contaminación (Galan & Romero, 2008). La acumulación de metales en el suelo puede ser permanente y, aun cuando la contaminación sea moderada, representa un peligro para la salud pública (Kabata-Pendias, 1995).

1.3.1 Relaves mineros refractarios

Los residuos “no valiosos” provenientes de la minería y el procesamiento de mineral, como el material es mayormente fino y húmedo, debe ser almacenado en botaderos de residuos industriales denominados relaves (A. Romero & Flores, 2010).

1.3.2 Criterios de calidad del suelo y remediación

Los criterios de calidad del suelo son valores de fondo aproximados o límites analíticos de detección para un contaminante del suelo. En la Tabla 1 se muestran los valores de fondo luego de procesos de remediación ambiental.

Tabla 1.

Criterios de calidad de suelo (valores a fondo)

Sustancia	Unidades (Concentración en Peso Seco)	Suelo
Parámetros Generales		
pH		6 a 8
Conductividad	mmhos/cm	2
Relación de Adsorción de Sodio (Índice SAR)		4
Parámetros Inorgánicos		
Arsénico (inorgánico)	mg/kg	5

Azufre (elemental)	mg/kg	250
Bario	mg/kg	200
Cobre	mg/kg	30
Cianuro (libre)	mg/kg	0.25
Mercurio	mg/kg	0.1
Plomo	mg/kg	25
Zinc	mg/kg	60
Parámetros Orgánicos		
Benceno	mg/kg	0.05
Clorobenceno	mg/kg	0.1
Etilbenceno	mg/kg	0.1
Estireno	mg/kg	0.1
Hexaclorobenceno	mg/kg	0.1
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	mg/kg	0.1

Nota: Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, LIBRO VI ANEXO 2.

Como está escrito en la “Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, libro VI anexo 2” el límite máximo de contaminantes no se debe encontrar tres veces mayor que los valores de fondo, como se muestra en la Tabla 2, la cual indica los factores indicativos de contaminación.

Tabla 2.
Factores indicativos de Contaminación

Factor de contaminación (Concentración presente/ valor de fondo)	Grado de perturbación	Denominación
< 1.5	0	Cero perturbaciones insignificantes
1.5-3.0	1	Perturbación evidente
3.0-10.0	2	Perturbación severa
>10.0	3	Perturbación muy severa

Nota: Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, LIBRO VI ANEXO 2

Por otro lado, el contenido de metales pesado y su solubilidad está asociada con el valor de pH en el suelo, así gran parte de metales pesados se encuentra en suelos cuyo pH es ácido, con pequeñas excepciones como el cromo, el molibdeno y el arsénico, que se los encuentra en pH alcalinos (Bustamante et al., 2008).

En la Tabla 3 nos da a conocer la reacción acides-alcalinidad, la cual se encuentra establecida en la norma ecuatoriana de calidad ambiental y nos da a conocer los diferentes rangos que existen de pH del recurso suelo.

Tabla 3

Reacción acides-alcalinidad en función a las diferentes secuencias de pH según la Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo

pH	Rango
Muy fuertemente ácido	Menor a 4.5
Fuertemente ácido	4.6 a 5.5
Medianamente ácido	5.6 a 6
Ligeramente ácido	6.1 a 6.5
Neutro	6.6 a 7.3
Ligeramente alcalino	7.4 a 7.8
Moderadamente alcalino	7.9 a 8.4
Fuertemente alcalino	8.5 a 9
Muy fuertemente alcalino	Mayor a 9.1

Nota: Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, LIBRO VI ANEXO 2

Capítulo dos

Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS (Figura 1), se encuentra ubicada en el sector “El Portete” cantón Zaruma provincia de El Oro-Ecuador. Cuenta con 45 m de longitud, 17 m de profundidad y 30 m de ancho, la cual contiene 20250 m³ de relaves mineros. Se encuentra a 1134 msnm entre las coordenadas S 3°40'10"; O 79°37'29”.

El cantón Zaruma se encuentra localizado al suroriente de la provincia de El Oro limitando al sur con el cantón Piñas, al norte con la provincia del Azuay, al este con el cantón Portovelo y al oeste con el cantón Chillas. Tiene un clima que corresponde al bosque húmedo premontano y se caracteriza por ser subtropical con un promedio de temperatura de 22°C.

Figura 1.

Fotografía de la Mina de la sociedad civil minera GOLDMINS



Nota: Autor

2.2 Metodología

2.2.1 Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los residuos sólidos mineras del cantón Zaruma.

Se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg de relaves *in situ* de la relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS y se realizó la determinación de parámetros físicos como: pH y potencial redox en el laboratorio, posteriormente se realizaron análisis de fluorescencia o absorción atómica para determinar los elementos presentes en la muestra mineral, así mismo se llevó a cabo un análisis de Difracción de Rayos X (DRX), para determinar el contenido mineralógico de la misma muestra.

2.2.2 Diseño de un sistema de Biorremediación (planta/microorganismo)

Con los resultados de la caracterización físico-química y mineralógica de los residuos sólidos se diseñó un sistema que permita la remoción de los elementos metálicos contenidos principalmente en los sulfuros como la pirita que puedan estar en mayor abundancia en los relaves mediante la aplicación de plantas y microorganismos, para lo cual se procedió a analizar la mejor configuración tomando en cuenta la normativa “Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados” y los mejores métodos de remoción de metales, usando posiblemente microorganismos lixiviantes y plantas acumuladoras.

Se realizó una base de datos de la cual se obtuvo información de portales web (Scopus, Scielo, Google Académico, Web of Science), revistas científicas, libros e informes mineros para realizar un diseño de un sistema de biolixiviación y fitorremediación acorde a los datos obtenidos.

2.2.2.1 Lixiviación *in situ* por percolación utilizan la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Para llevar a cabo una lixiviación *in situ* usando microorganismos de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se procedió a calcular y dimensionar una pila de biolixiviación, así como también una piscina de lixiviados. Así mismo, se determinó las características de un tanque de acondicionamiento para el crecimiento del microorganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans* en función de la cantidad de residuos sólidos presentes en la relavera de la empresa minera GOLDMINS, considerando un inóculo de la pila de 10% v/v.

Para el diseño del sistema de biolixiviación se consideró también factores como la aireación de la pila, para lo cual, se procedió a calcular la ubicación de un sistema de tuberías que permita suministrar los requerimientos de oxígeno de los microorganismos mediante el suministro continuo a través de un dispositivo de aire comprimido. Así mismo, se estableció el período en que el material lixivie la mayor cantidad de elementos metálicos a partir de los sulfuros.

Para llevar a cabo el proceso de biolixiviación usando microorganismos de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, es necesario realizar un crecimiento previo del microorganismo. Esto se realizó en un medio de cultivo denominado 9K a pH 2 (Silverman & Lundgren, 1959), suplementado con $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Para el dimensionamiento del sistema de biorremediación (biolixiviación/ fitorremediación) se consideró una base de cálculo de material a tratar de 1620 m³. Posteriormente se realizaron análisis fisicoquímicos y mineralógicos como: pH, potencial redox, análisis de metales pesados y DRX a partir de una muestra de 1 Kg de mineral tratado

2.2.2.2 Fitorremediación con *Chrysopogon zizanioides*

Se tomó una muestra de 1 kg para el análisis fisicoquímico y mineralógico, examinando los metales pesados solubilizados a partir de los sulfuros minerales de la pila y el nivel en el que se encuentra el pH.

Fue necesario realizar un proceso de lavado del material con agua pura con la finalidad de subir el pH de los minerales hasta un valor de 4. Esto se determinó mediante cálculos matemáticos, considerando que por cada lavada del material sube en un punto el valor de pH. Así mismo se pudo determinar la cantidad de agua a utilizar para una base de cálculo de 1620 m³ de material mineral.

Para una pila de 1620m³ de volumen de mineral fue necesario realizar el cálculo del número de plántulas que se sembrarían en las misma y el tiempo que se dejó crecer para que permitiera la acumulación de metales remanentes en la pila. Posteriormente se realizaron análisis fisicoquímicos y mineralógicos como: pH, potencial redox, análisis de metales pesados y DRX a partir de una muestra de 1 Kg de mineral tratado

Una vez culminado el proceso, se determinó el porcentaje de remoción de metales pesados posterior al proceso de biolixiviación y fitorremediación diseñado.

Capítulo tres

Resultados y discusión

3.1 Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los residuos sólidos mineros de los relaves presentes en la zona minera del cantón Zaruma.

Con la finalidad de llevar a cabo el diseño y dimensionamiento del sistema de biorremediación del residuo sólido mineral presente en la relavera de la empresa minera GOLDMINS, fue necesario realizar análisis fisicoquímicos que nos permitan evaluar las características mineralógicas, así como conocer el contenido de metales pesados presentes en el relave, como lo indica la Tabla 4.

Tabla 4.

Análisis del pH y metales Pesados en el suelo del relave

Parámetro	Resultado	Valor en norma	Unidades
pH	4.53		
Azufre	100		mg/Kg
Metales			
Cobre	128.45	30	mg/Kg
Zinc	130.42	60	mg/Kg
Hierro	25290,19	-	mg/Kg
Plata	<0,09	-	mg/Kg
Mercurio	0.087	10	mg/Kg

Los datos obtenidos del análisis químico de la muestra colectada en la relavera de la mina de GOLDMINS nos dan a conocer que el relave mineral tiene un pH de 4,53 el cual según la normativa de calidad del suelo del Ecuador se encuentra en un rango de "Fuertemente ácido". Por otro lado, de acuerdo con el criterio establecido para remediación ambiental en una zona minera, indica que los metales pesados como (bario, cadmio, cromo, níquel, plomo, arsénico, mercurio, zinc) deben tener un límite máximo permisible. Para el caso de los relaves mineros, esto se encuentran por sobre la normativa de calidad ambiental.

En la Tabla 5 se observa la composición mineralógica del relave mineral, en donde se puede verificar que existe una alta presencia de sulfuros de hierro, cobre, entre otros. Siendo el contenido de azufre, cobre y hierro los elementos mayoritarios en el residuo mineral.

Tabla 5.

Composición mineralógica del relave mineral.

Minerales	% Peso	% Vol.	% S	% Cu	% Fe	% As	% Zn	% Pb
Calcopirita	1.88	1.85	0.66	0.649	0.57			
Calcosina	0.01	0.01	0.00	0.012				
Covelina	0.06	0.05	0.02	0.039				
Bornita	0.01	0.01	0.00	0.008	0.00			
Cu G Tenantita	1.10	0.99	0.29	0.581		0.22		
Pirita	66.63	55.04	35.58		31.05			
Pirrotita	0.59	0.53	0.22		0.38			
Galena	0.71	0.39	0.09					0.61
Esfalerita	4.77	4.91	1.57				3.20	
Limonita	1.96	2.13			1.23			
Ganga	22.28	34.08						
Total	100.00	100.00	38.44	1.290	33.23	0.22	3.20	0.61
Cu Sol				0.020				
Cu Tot.				1.310				

Los datos obtenidos del análisis mineralógico de la muestra obtenida de la relavera GOLDMINS nos a conocer que estas contienen un alto grado de Pirita, el cual ocupa el 55.04 % de la composición.

Con esta información, es necesario establecer un sistema de remoción de elementos contaminantes tales como: hierro, plomo, azufre, cobre, entre otros, con la finalidad de obtener un residuo mineral que pueda permanecer en el ambiente sin generar daños al ecosistema. De ahí que establecer un sistema de biolixiviación permitirá la remoción principalmente de los sulfuros metálicos, solubilizándolos para posteriormente evaluar el desarrollo de un sistema de fitorremediación para eliminar algunos contaminantes que alcancen los límites permisibles en la norma.

3.2 Diseño de un sistema de Biorremediación (planta/microorganismo)

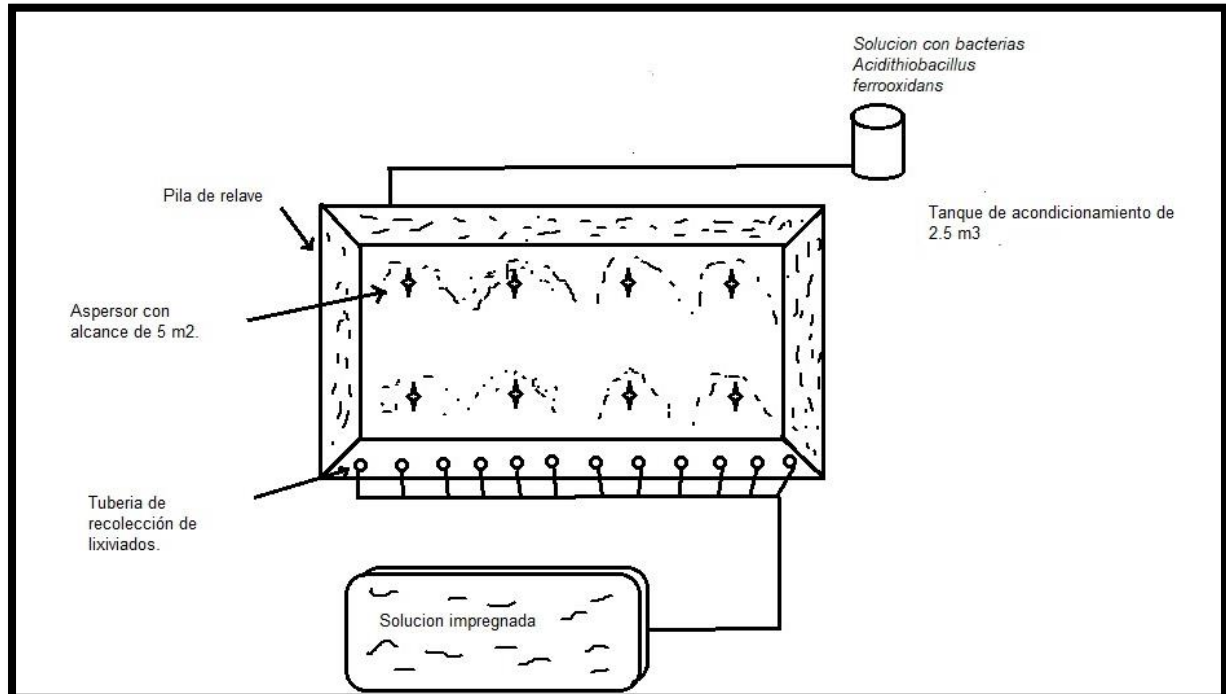
3.2.1 Diseño de un sistema de biolixiviación de minerales sulfurados, usando microorganismos acidófilos de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Como base de cálculo se consideró una cantidad de residuo mineral a tratar de 1620 m³. Para lo cual se dimensionó una pila de biolixiviación que tiene las siguientes dimensiones: 1.35 m de profundidad, 40 m de longitud y 30 m de ancho, lo que resulta en un área de 1200 m², se colocó como base una geomembrana de 1307.25 m² la cual impide que los lixiviados contaminen el agua del subsuelo. Se usó gravilla de 2,54 cm de diámetro para ser impregnada con el material mineral y que la pila no se obstruya.

Seguidamente se dimensionó un tanque de acondicionamiento para el crecimiento del microorganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans*, el cual además de contener la especie bacteriana tiene medio de cultivo 9K a un pH de 2. En 5 tanques de 2.5 metros cúbicos que pueden contener un volumen de 2500 L cada uno, y están acoplados a una tubería de 15 metros de largo que se conecta a un sistema de riego por aspersión de 80 metros con 8 aspersores localizados a 10 metros de cada uno para que exista un rango de distribución de inóculo de 5 metros cuadrados a la redonda como se lo puede apreciar en la (Figura 2).

Figura 2

Esquema de una Operación de biolixiviación en Pila



Con el fin de proporcionar una buena oxigenación y filtrar los lixiviados se instaló un sistema de aireación que consta de 7 tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro, distanciadas

a 18 pies (Misari Chuquipoma, 2016, capítulo 3, pp 155) y colocados en la base de la pila a unos 1.35 metros de profundidad.

De acuerdo con estudios realizados de sistemas en pila (Misari Chuquipoma, 2016) se verificó que el tiempo de mayor lixiviación de material es alrededor de 17 a 21 días, recuperando el 90% aproximadamente del material por medio de la lixiviación, dándonos un resultado de 4.26% de recolección diaria de metales pesados. Para obtener estos resultados es necesario evaluar controles permanentes del contenido de metales pesados tanto en el relave como en la solución.

La solución rica en metales pesado-disueltos (solución impregnada) provenientes de la pila fue colectada en los canales situados alrededor de la pila. Esta solución es retenida en un pequeño pozo para efectuar una sedimentación preliminar. Las soluciones de rebose se condujeron al tanque de sedimentación por gravedad, este tanque es de dimensiones similares a las consideradas en el tanque de acondicionamiento.

3.2.2 Biolixiviación de minerales sulfurados, usando microorganismos acidófilos de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Con el fin de evaluar el desarrollo y efectividad del sistema de biolixiviación, se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg de relaves in situ de la pila de biolixiviación para realizar un análisis de parámetros fisicoquímicos y mineralógicos. En las Tabla 6 y Tabla 7 se pudo notar cambios significativos en el Cobre y Hierro.

Tabla 6

Análisis de la composición del suelo del relave minero, una vez lixiviados por las bacterias de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Inorgánicos	no	Resultado	Unidades
metales			
pH		3,82	
Azufre		100	mg/Kg
Metales			
Cobre		88.43	mg/Kg
Zinc		13.04	mg/Kg

Hierro	17.07	mg/Kg
Plata	<0,09	mg/Kg
Mercurio	0,087	mg/Kg

Tabla 7

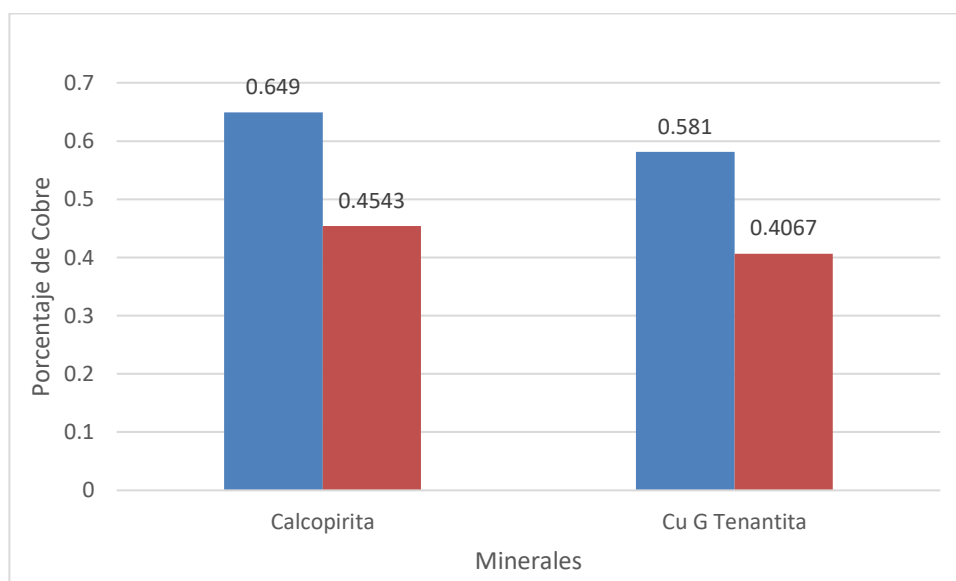
Composición mineralógica y resultados de la lixiviación con la bacteria *Acidithiobacillus ferroxidans*

Minerales	% Peso	% Vol.	% S	% Cu	% Fe	% As	% Zn	% Pb
Calcopirita	1.88	1.85	0.66	0.4543	0.0684			
Calcosina	0.01	0.01	0.00	0.0084				
Covelina	0.06	0.05	0.02	0.0273				
Bornita	0.01	0.01	0	0.0056	0			
Cu G Tenantita	1.1	0.99	0.29	0.4067		0.22		
Pirita	66.63	55.04	35.58		1.5525			
Pirrotita	0.59	0.53	0.22		0.019			
Galena	0.71	0.39	0.09					0.61
Esfalerita	4.77	4.91	1.57				3.20	
Limonita	1.96	2.13			0.0615			
Ganga	22.28	34.08						
Total	100	100	38.44	0.9023	1.7014	0.22	3.20	0.61
Cu Sol				0.020				
Cu Tot.				0.9223				

Así mismo, en la Figura 3 se puede verificar que el contenido de cobre disminuyó un 30 % principalmente en los sulfuros como calcopirita y tenantita, bajando la concentración de cobre en la calcopirita su concentración de 0.649% a 0.4543% y la Tenantita se redujo de 0.581% a 0.4067%. Los minerales como calcopirita y tenantita se los conoce como sulfuros secundarios y por lo tanto son altamente recalcitrantes, por lo que se dificulta aún más la recuperación de cobre a partir de estos elementos (Bustamante et al., 2008).

Figura 3

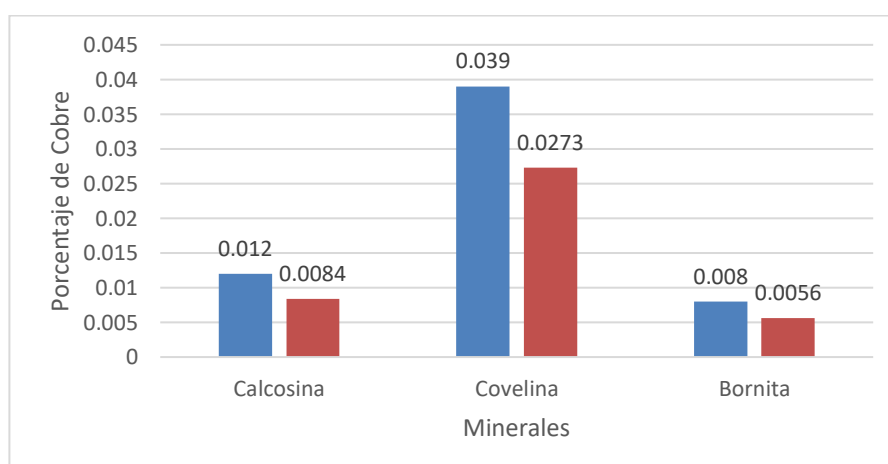
Biolixiviación de calcopirita y Tenantita



En la Figura 4 se puede verificar como disminuyo el cobre un 30 % en los minerales, bajando el contenido de este metal en la Calcosina de 0.012% a 0.0084% aproximadamente, la Covelina de 0.039% a 0.0273% y la Bornita de 0,008% a 0,0056%. Dando un promedio del 30% de reducción del cobre en el relave minero.

Figura 4

Lixiviación de los minerales Calcosina, Covelina y Bornita.

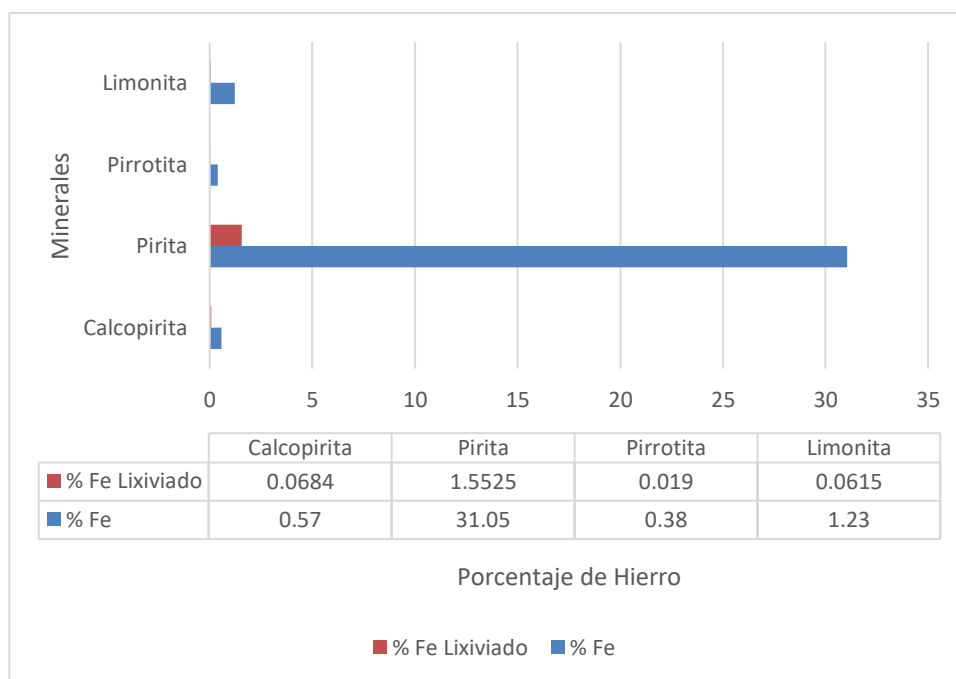


Por otra parte, la biolixiviación usando la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* fue una gran aliada para el descenso de un promedio del 93.25% de hierro en los minerales de la relavera como se puede observar en la Figura 6, donde se verifica que minerales con alto

contenido de hierro tales como: la Limonita disminuyo su concentración de 1.23% a 0.0615%, la Pirrotita bajo de 0.38 a 0.019%, la Calcopirita bajo de 0.57% a 0.0684% y la Pirita de 32.05% a 1,5525%.

Figura 5

Lixiviación del hierro, en los minerales Limonita, Pirrotita, Pirita y Calcopirita.



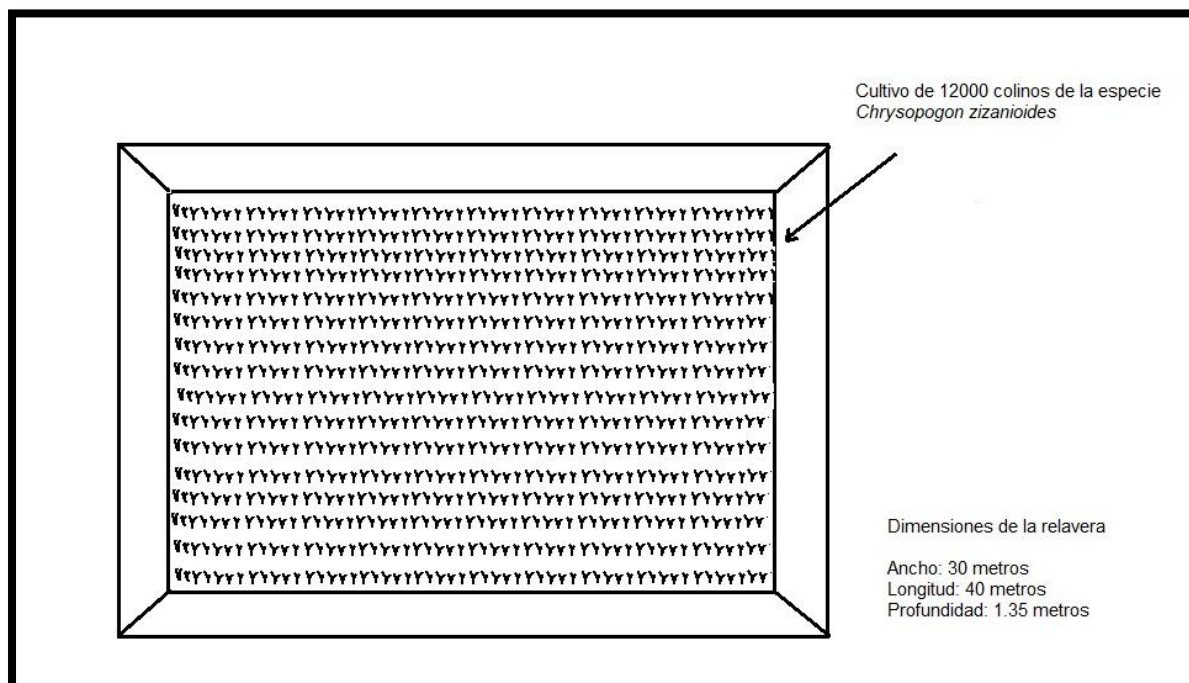
3.2.3 Diseño de un sistema de Fitorremediación con la especie vegetal *Chrysopogon zizanioides*

Con la finalidad de absorber el remanente de metales pesados, luego del proceso de biolixiviación con la especie bacteriana *Acidithiobacillus ferrooxidans* se diseñó un sistema de fitorremediación usando la especie vegetal *Chrysopogon zizanioides*. Para lo cual fue necesario realizar dos lavados de la pila de lixiviación para subir el pH del mineral de un valor de 2 hasta un valor de 4. Se labró en el suelo de la pila y se mezcló con materia orgánica para sembrar la planta bioacumuladora de metales pesados.

Posteriormente se procedió al cultivo de 12000 colinos de la especie *Chrysopogon zizanioides* (Figura 7), las cuales se las dejó crecer por un lapso de 10 meses, siendo plantados estratégicamente dejando un espacio de 20 cm de mata a mata, y de 50 cm de distancia de columna a columna, cubriendo la mayor parte del terreno de la pila minera.

Figura 6

Esquema de la plantación de 12000 colinos en la relavera de la de la sociedad civil minera GOLDMINS



Se tomó una última muestra para el análisis de la tierra de aproximadamente 1 kg de relaves in situ de la pila y se realizó la determinación de parámetros físicos y mineralógicos para determinar la capacidad de fitorremediación de la especie vegetal *Chrysopogon zizanioides* la cual mostró un aumento del pH del suelo de 4 hasta 7.23 luego de 10 meses de operación (Tabla 8), lo cual según la “Norma ecuatoriana de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, libro VI” (Tabla 3) lo hace un suelo neutro.

Tabla 8

Análisis de pH y del suelo minero, después de 10 meses de fitorremediación con la planta *Chrysopogon zizanioides*

Inorgánicos	no	Resultado	Unidades
metales			
pH		7,23	
Azufre	0		mg/Kg
Metales			
Cofre	0		mg/Kg
Zinc	0		mg/Kg

Hierro	0	mg/Kg
Plata	<0,09	mg/Kg
Mercurio	0	mg/Kg

La Tabla 9 muestra la composición mineralógica del relave después del proceso de fitorremediación. En comparación con la caracterización inicial (Tabla 5), se obtuvo que el cobre (Cu) presente de los minerales Calcopirita, Calcosina, Bornita y Covelina se redujo a 0. De la misma forma el hierro (Fe) presente en los minerales: Calcopirita, Bornita, Pirita, Pirrotita y Limonita fue absorbido por la planta. El Zinc (Zn) se redujo a 0 en la Esfalerita y en forma similar el Plomo cayó a 0 en la Galena.

De la misma manera los metales pesados tales como el Cobre pasaron de 128.44 mg/Kg a 0, el Mercurio de 0,087 mg/kg, el Plomo de 0,43 mg/kg a 0 y el Zinc de 130.42 mg/Kg a 0.

Tabla 9

Composición mineralógica de los resultados de la fitorremediación del relave minero utilizando la especie.

Minerales	% Peso	% Vol.	% S	% Cu	% Fe	% As	% Zn	% Pb
Calcopirita	1.88	1.85	0.66	0	0			
Calcosina	0.01	0.01	0	0				
Covelina	0.06	0.05	0.02	0				
Bornita	0.01	0.01	0	0	0			
Cu G Tenantita	1.1	0.99	0.29	0		0		
Pirita	66.63	55.04	35.58		0			
Pirrotita	0.59	0.53	0.22		0			
Galena	0.71	0.39	0.09					0
Esfalerita	4.77	4.91	1.57				0	
Limonita	1.96	2.13			0			
Ganga	22.28	34.08						
Total	100	100	38.44	0	0	0	0	0
Cu Sol				0				

Cu Tot.				0				
----------------	--	--	--	----------	--	--	--	--

Los resultados obtenidos por la fitorremediación fueron comparados con el estudio realizado por De La Cruz (2018) en “Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en *Chrysopogon zizanioides* creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario”, en donde se muestra un claro aumento del pH del suelo, llegando a subir a 5,7 (moderadamente ácido) a 8,5 el cual es calificado como aceptable. En el presente estudio se registró un aumento del pH de 3,82 (Fuertemente ácido) a un pH neutro de 7,32. Los datos sobre los metales pesados en el suelo de Plomo, Vanadio, Arsénico y Talio disminuyeron sus concentraciones notablemente en el suelo, siendo el Plomo el metal más movilizado hacia la planta.

Conclusiones

Finalmente realizada la investigación, análisis y biorremediación del suelo de la relavera de la sociedad civil minera GOLDMINS ubicada en el sector “El Portete” en Zaruma se concluye lo siguiente:

Una vez analizada la muestra de la pila de relave minero, y comparada con los valores de fondo en la norma ecuatoriana de calidad ambiental se da a conocer que cumple con los parámetros necesarios de la misma haciendo de ella un suelo sano y no peligroso.

Los metales pesados encontrados en el relave como cobre, hierro, plomo y mercurio no exceden los valores de la norma de calidad de suelo.

El pH del suelo en la lixiviación se lo bajo a 2.17 volviendo más ácido para una correcta implementación de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, mediante un proceso de lavado del material con agua pura subió su pH a 4 y finalmente con el cultivo de la planta *Chrysopogon zizanioides* este subió a 7.23 haciendo que la tierra sea vuelva alcalina.

En la lixiviación de los metales, se pudo obtener un promedio del 93.25% de Hierro y un 31.15% de Cobre.

Recomendaciones

Una vez concluida la presente investigación se recomienda para futuros trabajos semejantes al actual:

Al realizar el diseño de biorremediación primero se confía en hacerlo a tamaño laboratorio y posteriormente realizarlo a gran escala.

Se puede considerar un crecimiento previo de la planta fitorremediadora Vetiver y posterior cultivo de la pila.

Referencias

- Agudelo López, J. H., Betancur Urán, J., Martínez Nieto, W., Castañeda Peña, C. M., Castaño Galvis, M., & Largo Mejía, R. F. (2002). Biolixiviación de minerales sulfurosos. In *Revista Facultad de Ingeniería Redin: Vol. I* (Issue 27, pp. 110–122). <https://bit.ly/3hKf95k>
- Atlas, R. M., & Unterman, R. (1999). Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology. *Bioremediation. En: Demain AL & Davies JE (Eds), 2*(Bagi), 666–681.
- Borrego, P., Bacedoni, M., Moreno-Ventas Bravo, I., & Córdoba, F. (2020). Biometalurgia: biolixiviación parcial de cobre de escorias pirometalúrgicas mediante un consorcio local de bacterias quimiolitotrofas hiperacidófilas. *Comunicações Geológicas, 107*, 167–171. https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2020/05/Volume_107_CIG.pdf
- Bustamante, M., Gaviria, A., & O, R. (2008). Análisis De La Prefactibilidad Técnica Y Económica De Una Planta De Espesamiento De Relaves Para Su Posterior Disposición Utilizando El Método Ttd Proyecto. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials, 17*(34), 39–46.
- Castro, J., Rojas, M., & Mesa, J. (2004). Efecto de la adición de fertilizantes inorganicos compuestos de la degradacion de hidrocarburos en suelos contaminados con Petroleo. *Nova 2*, 40–49.
- Cherian, S., & Oliveira, M. (2005). Plantas transgénicas en fitorremediación: avances recientes y nuevas posibilidades. *Environmental Science & Technology, 39*, 9377–9390.
- De la Cruz López, C. A., Ramos Arcos, S. A., & López Martínez, S. (2018). Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en *Chrysopogon zizanioides* creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario. *Nova Scientia, 10*(21), 403–422. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1582>
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: Una alternaiva para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 597–612*.
- Delgado, S., & Castillo, D. (2019). Influencia De La Temperatura En El Crecimiento De Un Consorcio Microbiano Y Su Capacidad Bioxidativa Sobre El Hierro De La Calcopirita Influence of Temperature on the Growth of a Microbial Consortium and Its Bioxidative Capacity on the Iron of Calcopirita. *Ecología Aplicada, 18*(1). <https://doi.org/10.21704/rea.v18i1.1310>
- Dzionic, A., Wojcieszynska, D., & Guzik, U. (2016). Portadores naturales en

- biorremediación. *Revista Electrónica de Biotecnología*, 23, 28–36.
- Eyzaguirre Liendo, P. del R., & Castillo Cotrina, D. M. (2019). Biolixiviación indicativa del sulfato de cobre por crecimiento microbiano ante el drenaje minero. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 21(1), 49–56. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.444>
- Galan, E., & Romero, A. (2008). *Contaminación de Suelos por Metales Pesados*. 10, 48–60. <https://bit.ly/2EJu2q5>
- Gallego, J. R., Fernández, J. R., Díez-Sanz, F., Ordoñez, S., Sastre, H., González-Rojas, E., Peláez, A. I., & Sánchez, J. (2007). Biorremediación para la limpieza de la costa: tratamientos in situ frente a tratamientos ex situ. *Environmental Engineering Science*, 24, 493–524.
- Gallego, J. R., Menéndez-Vega, D., González-Rojas, E., Sánchez, J., García-Martínez, M. J., & Llamas, J. F. (2005). Oleophylic fertilizers and bioremediation: a new perspective. Book of abstracts, . Badajoz (Spain),. *Biomicroworld., 1st Conference on Environmental, Industrial and Applied Micro-biology*, 714–715.
- Gómez, R. B. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos...*
- Gonzales Rojas, E. H. (2011). *Concepto y estrategias de biorremediación*. 20–29.
- González-Rojas, E., Peláez, A. I., Sánchez Martín, J., García, M. ., Llamas, J. ., Fernández Berceruelo, I., Álvarez García, R., & Rodríguez Gallego, J. L. (2004). Avances en biorremediación de vertidos marinos de hidrocarburos. El caso del Prestige. *BIOTEC*.
- Ingle, A., Seabra, A., Duran, N., & Rai, M. (2014). Nanorremediación: una tecnología nueva y emergente para la eliminación de contaminantes tóxicos del medio ambiente. *Microbial Biodegradation and Bioremediation*.
- Kabata-Pendias, A. (1995). Problemas agrícolas relacionados con el contenido excesivo de metales traza en los suelos. *Heavy Metals, Table 1*, 3–18. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79316-5_1
- López-Archilla, A., Marín, I., & Amils, R. (2001). Composición de la comunidad microbiana y ecológica de un medio acuático ácido. *Microbial*, 41, 20–35.
- Misari Chuquipoma, F. (2016). Tecnología De La Lixiviación Bacteriana De Minerales. In *Elsevier Science* (Vol. 2). https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf
- Pérez, A., Arroyo, E., & Chamorro, L. (2015). Resistencia a níquel en bacterias endófitas aisladas a partir de Orizativa en Colombia. *RSVM*, 20–25.
- Petro Cardona, P. H., & Mercado Montero, G. D. C. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia*. <https://bit.ly/3jWb8w0>

- Rawlings, D. (2002). Minería de metales pesados utilizando microbios. *Revisiones Anuales En Microbiología*, 56, 65–91. <https://bit.ly/3fiilmH>
- Rodrigues, I. B., Silva, L. A. M., Azevedo, R. D., Cota, R. G. S., & Leão, V. A. (2018). Identificando microorganismos relacionados con la biolixiviación del cobre a 35 y 50 °C. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(6), 1061–1066. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018093582>
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de La Facultad de Ingeniería Industrial*, 13, 75–82.
- Romero, E. (2006). Residuos Mineros. *Chest*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.1590/s1809-98232013000400007>
- Ruiz, K. C., Rios, M. D., & Martinez-martinez, A. (2019). *BIORREMEDIACIÓN: ACTUALIDAD DE CONCEPTOS Y APLICACIONES*. January.
- Saavedra, A., & Cortón, E. (2014). Biotecnología microbiana aplicada a la minería. *Química Viva*, 13(3), 148–163.
- Sancher, W., & Acosta, A. (2012). La minería a gran escala en Ecuador. *Ediciones Abya-Yala* 68, 1, 13–38. <https://doi.org/978-9942-09-055-3>
- Silverman, M., & Lundgren, D. (1959). Estudios sobre la bacteria del hierro quimioautotrófica *Ferrobacillus ferrooxidans*: un medio mejorado y un procedimiento de recolección para asegurar altos rendimientos celulares. *Bacteriology*, 77, 642–647.
- Truong, P., & Thai Danh, L. (2015). *El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua: prevención y tratamiento de aguas y suelos contaminados*. 1.
- Valderrey Villar, F. J., & Lemus Delgado, D. (2019). *Minería, movimientos sociales y la expansión de China en América Latina*. 31(Desafíos), 375–410. <https://doi.org/10.12804>
- Watanabe, K. (2001). *Microorganismos relevantes para la biorremediación*. 12, 237–241.
- Wildschut, L. (2013). *Mercados Potenciales De Tecnologías De Biorremediación Con Vetiver*. 1–162.

Apéndice

Cálculos del diseño de biorremediación.

La pila de material minero que se procedió a su remediación conto con unas dimensiones de:

$$40 \text{ m} * 30 \text{ m} * 1,35 \text{ m} = 1620 \text{ m}^3$$

Para el cultivo de la planta *Chrysopogon zizanioides* se tomó en cuenta el área de la pila

$$\text{Área} = 40 \text{ m} * 30 \text{ m} = 1200 \text{ m}^2$$

En 1m² entran 10 colinos:

$$10 * 1200 = 12000 \text{ colinos de la planta}$$

Para el sistema de riego de 8 aspersores, cada uno de ellos estaba conectado a una distancia de 10 metros.

$$8 * 10 = 80 \text{ m de tubería}$$

Captación de lixiviados por 7 tubos PVC

$$18 \text{ pies} = 5.49 \text{ metros de distancia}$$

40 metros de longitud de terreno

$$40 / 5.49 = 7.29 \text{ tubos}$$

Figura 5

Relavera de la mina GOLDMINS

