



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EFFECTOS DE LOS METALES PESADOS DERIVADOS DE LA ACTIVIDAD  
MINERA SOBRE LOS MICROORGANISMOS EDÁFICOS UNA REVISIÓN

AUTOR

Rubén Darío Estupiñán León

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EFFECTOS DE LOS METALES PESADOS DERIVADOS DE LA ACTIVIDAD  
MINERA SOBRE LOS MICROORGANISMOS EDÁFICOS UNA REVISIÓN

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos  
para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación.

Profesor Guía

MSc. Miguel Ángel Gualoto Oñate

Autor

Rubén Darío Estupiñán León

Año 2020

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, "Efectos de los metales pesados derivados de la actividad minera sobre los microorganismos edáficos una revisión", a través de reuniones periódicas con el estudiante Rubén Darío Estupiñán León, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"



---

Miguel Ángel Gualoto Oñate

Master of Science en Biología

C.I.: 170742935-1

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR**

"Declaro haber revisado este trabajo, "Efectos de los metales pesados derivados de la actividad minera sobre los microorganismos edáficos una revisión", del estudiante Rubén Darío Estupiñán León, en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



---

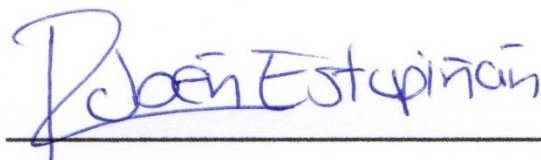
Viviana Pavlova Sigcha Terán

Master of Science en Gestión Integral del Agua

C.I.: 172221616-3

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”



Rubén Darío Estupiñán León

C.I.: 1725278996

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y mis padres por su amor, por su guía y apoyo continuo. A mis amigos y compañeros de carrera por estar siempre presentes durante estos años de carrera y compartir varios momentos.

A mis docentes Miguel Gualoto, Yasser González y Pavlova Sigcha por todo su apoyo, guía y consejos en lo que respecta mi vida profesional.

## **DEDICATORIA**

A mi familia que ha forma parte importante en mi toma de decisiones con su ejemplo, lucha, perseverancia y dedicación.

## RESUMEN

La minería es una de las actividades antropogénicas que se ha mostrado como un motor importante de la economía de diferentes países contribuyendo en su PIB nacional y a la generación de puestos de trabajo (Banco Mundial, 2013); sin embargo, también es catalogada como una actividad de alta afectación hacia el ambiente por los diferentes contaminantes que genera, adicionalmente crea problemas de carácter político y social (Ayala et al., 2019). Una de las mayores preocupaciones es la contaminación provocada por metales pesados liberados por esta actividad. El objetivo de esta revisión bibliográfica es conocer los efectos de los metales pesados derivados de la minería sobre los microorganismos edáficos.

El estudio se centró en la recopilación, lectura, selección y discriminación de varios recursos bibliográficos como: artículos científicos, libros, documentos, noticias, entre otros; con el fin de analizar la gama de contaminantes derivados de actividades mineras, en especial metales pesados, comprender sus efectos ambientales y sobre la dinámica de la biodiversidad edáfica.

En conformidad con el análisis de la información bibliográfica podemos concluir que, los metales pesados derivados de la minería, ejercen efectos sobre los microorganismos en su dinámica poblacional, biodiversidad y estructura, que puede presentarse como: alteraciones en las interacciones microbianas con los metales pesados que llevan a la transformación del contaminante, procesos de bioacumulación, biomagnificación, así como el desarrollo de mecanismos de resistencia y tolerancias, que constituyen cualidades importantes para su empleo en el tratamiento biológico de las matrices ambientales contaminadas.

**Palabras clave:** metales pesados, efectos, microorganismos, dinámica, biodiversidad, biorremediación.



## ABSTRACT

Mining is one of the anthropogenic activities that has been shown to be an important engine of the economy of different countries, contributing to its national GDP (Gross Domestic Product) and the generation of jobs (Banco Mundial, 2013); however, it is also classified as an activity with high impact on the environment by the different pollutants it generates towards the environment, additionally creating political and social problems. (Ayala et al., 2019) One of the biggest concerns is the contamination caused by heavy metals released by this activity. The objective of this bibliographic review is to know the effects of heavy metals derived from mining on soil microorganisms.

The study focused on the compilation, reading, selection and discrimination of various bibliographic resources such as: scientific articles, books, documents, news, among others; in order to analyze the range of pollutants derived from mining activities, especially heavy metals, understand their environmental effects and on the dynamics of edaphic biodiversity.

In accordance with the analysis of bibliographic information, we can conclude that heavy metals derived from mining exert effects on microorganisms in its population dynamics, biodiversity and structure, which can be presented as: alterations in microbial interactions with heavy metals that lead to transformation of the pollutant, bioaccumulation processes, biomagnification, as well as the development of resistance and tolerance mechanisms, which constitute qualities important for its use in the biological treatment of contaminated environmental matrixes.

**Keywords:** heavy metals, effects, microorganisms, dynamics, biodiversity, bioremediation.

# ÍNDICE

<b>1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	1
<b>1.2. Alcance</b> .....	3
<b>1.3. Justificación</b> .....	3
<b>1.4. Objetivos</b> .....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
<b>2. CAPÍTULO II. METODOLOGÍA</b> .....	5
<b>2.1. Búsqueda Bibliográfica</b> .....	5
<b>2.2. Criterios de selección</b> .....	6
<b>2.3. Recuperación de la información. Fuentes documentales</b> .	8
<b>3. CAPÍTULO III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
<b>3.1. Actividad minera</b> .....	8
3.1.1. Importancia económica, social y política.....	8
3.1.2. La actividad minera en el Ecuador.....	11
3.1.3. Contaminantes derivados de las actividades mineras .....	12
3.1.4. Efectos de la actividad minera .....	14
<b>3.2. Metales pesados derivados de las actividades mineras y sus efectos</b> .....	17
3.2.1. Mercurio .....	18
3.2.2. Plomo .....	19
3.2.3. Cobre.....	21
3.2.4. Arsénico .....	22
3.2.5. Cadmio.....	23
<b>3.3. Biodiversidad edáfica</b> .....	25
3.3.1. Los microorganismos y el suelo.....	25
3.3.2. Diversidad microbiana de los suelos.....	26

3.3.3. Diversidad microbiana de suelos en áreas mineras .....	27
<b>4. CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN .....</b>	<b>28</b>
4.1. Gestión de metales pesados de minería .....	28
4.2. Efectos de la contaminación por metales pesados en comunidades microbianas .....	33
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>43</b>

## 1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Los metales pesados generalmente están presentes en concentraciones sumamente bajas en la corteza terrestre. Por procesos naturales, estos pueden pasar al suelo y por procesos biológicos terminar en las plantas. Cuando estas concentraciones de metales pesados sobrepasan los niveles del medio (límites máximo permisibles) se comprende una contaminación del medio (suelo). Los metales pesados que se presentan en concentraciones altas, mayoritariamente se derivan de actividades humanas como la minería, agricultura, curtiembres, entre otras (Galán & Romero, 2008).

La mayor participación de la minería en cuestión a inversiones se presenta en Canadá con el 16%, continente africano con el 15% y australiano con el 13% (Friess & Brotz, 2011). El nivel o amplitud de la minería en cada país depende netamente de la inversión que estén dispuestos a hacer y, este financiamiento, muchas veces implica riesgos políticos, sociales y reputaciones; principalmente, debido a la legislación ambiental vigente en cada país, así como las garantías de inversión y la estabilidad política. En varios aspectos la minería comprende un motor clave para el desarrollo económico, no obstante, existe el riesgo de que estas actividades puedan ser problemáticas socioeconómicas y medioambientales (Banco Mundial, 2013). Por este motivo es importante que los gobiernos presten atención a cada uno de estos temas y, a la rentabilidad de estas actividades sobre la economía del país versus las posibles consecuencias que podrían causarse (Sánchez & Lardé, 2006).

En Ecuador, en la mesa sectorial de diálogo del Consejo Consultivo Productivo y Tributario, el Subsecretario de Minería Industrial, Henry Troya (2017), mencionó que

los sectores minero e hidrocarburífero son áreas productivas complementarias y ejes fundamentales de la economía del país a largo y mediano plazo. También, se explicó que es necesario contar con normativa que genere su crecimiento, sí como el interés por la inversión extranjera (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016).

Se indicó también que existe disposición por parte de esta industria para generar y regularse con reglamentación ambiental y uso racional del agua, presentando así garantías a las poblaciones e individuos del país. En la Ley de Minería, se establece una inversión directa en las zonas de influencia por actividades mineras en proyectos que contemplen planes de desarrollo social y mejora comunitaria (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016).

La minería es una de las principales industrias y actividades humanas que contribuyen a la contaminación del suelo debido al incremento de las concentraciones de metales pesados y sales en dicho recurso. Al ser microelementos los que se encuentran en el suelo de forma natural y, al existir un aumento en sus concentraciones normales, se produce un efecto negativo en la biota y cualidades naturales del suelo, afectando así en la biodiversidad y actividad de los organismos presentes en el suelo (Puga et al., 2006).

Al incrementar la concentración de metales y conjugarse con diferentes factores en el suelo como: porosidad, humedad, materia orgánica, pH, permeabilidad, entre otros (Forigua et al., 2017), estos metales pueden estar disponibles y afectar negativamente a las actividades biológicas del suelo. Por lo cual es de suma importancia conocer si el medio estaría preparado, a resistir concentraciones elevadas de metales pesados, derivadas de alguna contaminación por las actividades mineras. Es por esto que se pretende establecer el estudio bibliográfico respecto a la tolerancia de la microbiota a la presencia de ciertas concentraciones

de metales pesados en el medio y la posible actividad degradativa de los microorganismos presentes en el suelo (García, et al, 2002).

La cantidad de metales pesados presentes en el medio pueden ser determinantes al momento de generar una presión selectiva capaz de modificar la diversidad de microorganismos. Existen varios procesos que resultan en la adaptabilidad de los organismos y microorganismos que se expresan como mecanismos de tolerancia al contaminante en cuestión, cada microorganismo es capaz de tolerar o resistir una cierta concentración o dosis del contaminante (Moraga et al., 2003).

La caracterización, evaluación y remediación de un suelo contaminado es uno de los principales retos ambientales por abordar en los próximos años. La peligrosidad de los contaminantes en los suelos viene dada no sólo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad (Galán & Romero, 2008; Rodríguez et al., 2019).

## **1.2. Alcance**

El presente estudio se ha limitado a realizar una búsqueda y análisis profundo de información bibliográfica, que recoge estudios de laboratorio y campo sobre los efectos de los metales pesados derivados de la actividad minera sobre la biodiversidad edáfica.

## **1.3. Justificación**

Si bien es cierto que se conocen la mayoría de los efectos de los metales pesados sobre la biodiversidad microbiana edáfica, también es cierto, que no se disponen de

mecanismos que contrarresten esos efectos negativos, que además sean eficientes, de bajo costo y ambientalmente sustentables.

Sabemos que la minería es una de las actividades industriales que genera mayor contaminación, los suelos generalmente quedan inutilizados y la biota se ve afectada por las altas concentraciones de metales pesados. Se ha visto la constante necesidad de presentar métodos para reducir el efecto de esta contaminación, es por esto que, se ha estudiado el posible uso de biorremediación como una metodología alternativa. Para este tipo de procesos es de suma importancia reconocer los organismos autóctonos de la zona, como se puede observar en el Código Orgánico del Ambiente (CODA, 2018) se busca proteger el patrimonio genético del Ecuador, es por esto que se necesita reconocer los microorganismos presentes en el suelo, hacer pruebas de tolerancia a diferentes concentraciones de estos metales pesados y, establecer si existe la posibilidad de generar biorremediación o algún tratamiento con el uso de estos microorganismos autóctonos de la zona de estudio, para reducir la concentración de los metales pesados estudiados.

Socialmente, se justifica debido a la situación actual del país en la cual la población no quiere estar cerca de las zonas en las cuales se desarrolla esta actividad debido a la contaminación, el arrastre de contaminantes y la inutilización del suelo después de la actividad. El hecho de no poder generar cultivos saludables, que estos estén contaminados, contaminación de cuerpos de agua, entre otros, son varias de las preocupaciones que se pueden producir en torno a este tema.

Económicamente, se justifica debido a que, la biorremediación, al ser un método alternativo para recuperación de suelos contaminados, pretende hacer uso de los

microorganismos autóctonos tolerantes a altas concentraciones de metales pesados para que ellos puedan actuar y biorremediar el suelo.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Conocer los efectos de los metales pesados derivados de la actividad minera sobre los microorganismos edáficos.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

Identificar los principales metales pesados asociados a las actividades mineras.

Discutir las aproximaciones teóricas relacionadas a los efectos de los metales pesados sobre la dinámica de la biodiversidad edáfica.

## **2. CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

### **2.1. Búsqueda Bibliográfica**

Durante 1 mes y medio se realizó la búsqueda y selección de fuentes primarias (estudios certificados y artículos indexados en revistas científicas) para la obtención de información relevante respecto a la temática de estudio. Posterior a esto, se recurrió a fuentes secundarias (resúmenes de revistas y compilados de información nacionales) y terciarias (libros, artículos de revisión y sitios web) con el objetivo de reforzar la idea principal y obtener la mayor cantidad de recursos bibliográficos para una correcta descripción y análisis del tema.



## 2.2. Criterios de selección

La información encontrada fue muy variada, con diferentes objetivos y contenido especializado, razón por la cual se establecieron cuatro criterios de selección para el uso de información; los parámetros de selección fueron los siguientes.

- **Tiempo:** Se utilizaron únicamente recursos bibliográficos del año 2000 en adelante, para asegurar la investigación de información actualizada.
- **Relevancia:** Se utilizaron documentos verificados y publicados como artículos científicos, libros, documentos oficiales, páginas gubernamentales y medios de comunicación (noticias). Dentro de este parámetro también se utilizó información correspondiente a trabajos finales de pregrado y postgrado.
- **Localización:** Se buscó estudios realizados en Ecuador y Latinoamérica (México, Perú y Chile).
- **Contenido:** La información utilizada corresponde a estudios, noticias y documentación respecto a actividades mineras, efectos de la actividad minera, contaminación por metales pesados, biodiversidad de microorganismos edáficos, relación microorganismos edáficos con contaminantes y relación microorganismos edáficos con metales pesados.

A continuación, se inserta la Tabla 1, donde se recopilan las principales fuentes bibliográficas revisadas en función a los criterios de selección antes mencionados:

Tabla 1.  
*Principales fuentes bibliográficas.*

Fuente bibliográfica	Autores	Año	País	Resumen
<b>Fuentes primarias</b>				
Metal toxicity affects fungal and bacterial activities in soil differently	Rajapaksha R., Tobor-Kaplon M. y Baath E.	2004	Países Bajos	El artículo describe los efectos que tienen los metales pesados sobre las actividades de

				bacterias y hongos en el suelo como tasa de respiración, tasa de incorporación de timidina y tasa de incorporación de acetato en ergosterol.
Heavy metals tolerant microorganisms from mine tailing wastelands Santa Rosa, Jangas (Peru)	Muñoz L., Olivera P., Santillán M. y Tamariz C.	2019	Perú	El artículo realiza un análisis de la tolerancia de diferentes microorganismos frente a metales pesados, como: plomo, cobre, níquel, zinc, plata, plomo y cadmio.
Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry	Puga S., Sosa M., Lebgue T., Quintana C. y Campos A.	2006	Perú	El artículo se centra en los efectos del suelo, provocados por la exposición a altas concentraciones de metales pesados.
Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera	Barcos M., Moína E., Naranjo J. y Oviedo R.	2017	Ecuador	Este estudio recopila los efectos de la actividad minera en el Ecuador.
<b>Fuentes secundarias</b>				
Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros	Alianza Mundial de Derecho Ambiental	2010	Estados Unidos	Esta guía define a la actividad minera y a sus impactos en el contexto político, social y ambiental.
Sentencia T 445 de agosto de 2016	Ayala H., Diaz L., Gómez S., entre otros.	2019	Colombia	Este documento evalúa los impactos, a nivel científico y social, de la minería en territorio colombiano.
<b>Fuentes terciarias</b>				
Política minera y sociedad civil en América Latina	Cisneros P.	2016	Ecuador	Este libro habla sobre la afección que puede provocar la actividad minera sobre las

				aristas políticas y sociales.
Conflictos mineros en América Latina. Extracción, saqueo y agresión	Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina	2015	América Latina	Este documento hace un compilado de diferentes conflictos que varios proyectos mineros han generado en países como: Perú, Ecuador, Bolivia, entre otros.

### 2.3. Recuperación de la información. Fuentes documentales

Se utilizó buscadores como Google, Google Scholar, Biblioteca Virtual de la Universidad De Las Américas, entre otros. La mayoría de las fuentes bibliográficas fueron fuentes de libre acceso, razón por la cual no se recurrió a la compra de documentos.

Al realizar la recolección y lectura de los diferentes documentos se pudo constatar que existe una limitante en información sobre los efectos de los metales pesados dentro de los procesos naturales del medio, contaminación por metales pesados en el Ecuador, efectos sobre la minería, entre otras temáticas; es por esto que, se decidió realizar la búsqueda de información en trabajos finales de pregrado y postgrados debido a la extensión y explicación detallada de diferentes aspectos necesarios para este trabajo.

## 3. CAPÍTULO III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Actividad minera

#### 3.1.1. Importancia económica, social y política

Durante muchos años la minería ha sido un motor importante de la economía de algunos países por cuanto contribuye al PIB (Producto Interno Bruto) nacional y

genera numerosas plazas de trabajo. En general, el monto de la inversión define la capacidad de generar plazas de trabajo, así como también los posibles impactos de carácter social, político y ambiental. En virtud de que la minería se ha convertido en un vital foco de desarrollo, para su regulación ha sido necesaria la creación de un marco legal que contemple las condiciones de su actividad, en especial en relación con sus emisiones y medidas de protección ambiental (Banco Mundial, 2013).

La ex Viceministra de Minería de Ecuador, Rebeca Illescas (Agencia de Regulación y Control Minero, 2017), en el foro “Perspectivas y Desafíos” se refirió a la minería como un factor clave para el desarrollo económico del Ecuador, así como el enfoque que tendría para el aumento del PIB del país, ya que a partir de 260 concesiones mineras hasta el año 2021, se espera recibir cerca de \$8.000 millones de dólares americanos como inversión.

Para el 2018 las inversiones mineras fueron de \$4.500 millones, de los cuales el 33,33% fue transferido al Estado a cuenta de regalías (Banco Central del Ecuador, 2018); se espera que hasta el año 2021 se generen más de 25.000 plazas de trabajo. No obstante, es imperante diferenciar la minería artesanal frecuentemente ilegal y la minería a gran escala, debido a los conflictos de carácter social, económico y ambiental que estas actividades producen. Según el Ministerio de Economía y Finanzas (2019), las ventas del sector minero generarían un ingreso de \$3.800 millones y contribuirían con un aporte al PIB del 4% hasta el 2021 en comparación al 1,6% que representaba en 2017 (Ministerio de Economía y Finanzas, 2019).

En el aspecto social la minería no solo contribuye con la generación de empleo, sino también a estimular las economías de los centros poblados vecinos a las zonas de explotación. Así, por ejemplo, contribuye al desarrollo de toda una cadena

productiva que involucra a actividades como: hotelería, alimentación, transporte, recreación, abastecimiento de materiales, alimentos y cobertura de servicios de comunicación y enlace. Sin embargo, a los beneficios sociales, también deben sumarse otros efectos negativos de la minería sobre la sociedad tales como: la violencia social, delincuencia, prostitución (casas de cita), alcoholismo y sobreexplotación laboral (OCMAL, 2015).

Helcias Ayala (2019), en el libro “Sentencia T 445 de agosto 2016” habla sobre varios de los impactos sociales que conlleva la minería. Entre estos se habla sobre: desplazamiento de la población, conflictos intrafamiliares, interferencia con el patrimonio y la identidad cultural, prácticas violentas de resolución de conflictos (amenazas, asesinatos, etc.), aumento en índices de deserción escolar, dependencia ocupacional de proyectos mineros, entre varios otros. Esto también se ve apoyado por la “Guía para evaluar EIAs de Proyectos Mineros” realizado por la Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW, 2010), que también menciona problemas por migración de personas, pérdida de acceso a servicios públicos (especialmente agua limpia) y un gran impacto sobre los recursos culturales y estéticos (ELAW, 2010).

En “Política minera y sociedad civil en América Latina” de Cisneros (2016), se puede ver que existen varios impactos a nivel político por parte de las actividades tanto de forma directa como indirecta. Se habla sobre Guatemala y las prácticas del Estado en las cuales violentaban normas jurídicas nacionales, acción contra la voluntad de la ciudadanía, entrega de territorio a empresas transnacionales y posibles violaciones de los derechos humanos, el hecho de como el Estado se vuelve un defensor de las empresas, a la vez, se encontraron problemas referentes a corrupción, tráfico de influencias entre la institución ambiental y el sistema de justicia y se presenta una tabla referente a los proyectos mineros y su criminalización,

haciendo énfasis a asesinatos, presos políticos, militarización de la zona, desalojos violentos, entre otros.

### 3.1.2. La actividad minera en el Ecuador

A finales de 2017 en el Ecuador se concesionaron un total de 275 proyectos para explotación minera. Para el 2019 se suspendieron la entrega de concesiones mineras, generando pérdidas de hasta \$700 millones por el cierre del catastro minero. Gracias al apoyo del BID (Banco Interamericano de Desarrollo) se ha generado un nuevo catastro minero, que permite manejar de mejor forma las concesiones mineras, mismas que son entregadas a empresas públicas y privadas para el aprovechamiento de los recursos. Estas concesiones han aumentado drásticamente el área que existía para explotación minera. Para inicios de 2017 se estimaba un área de 790.000 hectáreas de tierra (3% de tierra de todo el país) que estaban disponibles para esta actividad, después de las concesiones mineras anunciadas a mediados del año 2017 esta área aumentó a más de 3.693.000 hectáreas, que refleja en más del 13% del territorio ecuatoriano ocupado por esta actividad (Agencia de Regulación y Control Minero, 2017).

Según el reporte del Banco Central del Ecuador (2017), los principales proyectos estratégicos de la actividad minera son:

Tabla 2.  
*Proyectos mineros estratégicos en Ecuador.*

<b>Proyecto</b>	<b>Mirador</b>	<b>Fruta del Norte</b>	<b>Loma Larga</b>	<b>San Carlos Panantza</b>	<b>Río Blanco</b>
<b>Ubicación</b>	Zamora Chinchipe	Zamora Chinchipe	Azuay	Morona Santiago	Azuay

<b>Mineral</b>	Cobre, Plata y Oro	Plata y Oro	Cobre, Plata y Oro	Cobre	Plata y Oro
<b>Tipo de minería</b>	Cielo abierto y gran escala	Minería subterránea y gran escala	Minería subterránea y gran escala	Minería a cielo abierto y gran escala	Minería subterránea y gran escala
<b>Tiempo de vida</b>	27 años de vida desde inicio de producción	13 años de vida desde inicio de producción	27 años de vida desde inicio de producción	25 años de vida desde inicio de producción	11 años de vida desde inicio de producción

Adaptado de (Banco Central del Ecuador, 2017).

### 3.1.3. Contaminantes derivados de las actividades mineras

Las actividades mineras generan una amplia variedad de residuos, de naturaleza química variada y en volúmenes variables que dependen del tipo de minería (Piña & Silva, 2016). Entre los residuos más comunes podemos mencionar a:

**Drenajes mineros:** Durante los procesos mineros se produce la exposición de minerales sulfatados, los cuales entran en contacto con aire y agua. Estos factores en conjunto con actividad microbiana, producen procesos de oxidación dejando libre ciertos elementos que se encontraban en los minerales (como sulfuros y el hierro) generando la creación de condiciones de acidez en el agua; estas actividades se ven incrementadas por el alto contacto con el aire (Chaparro, 2015).

Estos drenajes son altamente tóxicos para el medio y poseen un elevado contenido de metales disueltos y contaminantes orgánicos, razón por la cual pueden presentar varias características particulares como: pH, oxígeno disuelto, potencial redox,

cantidad de Fe, entre otros parámetros (Forigua et al., 2017). Los drenajes mineros se dividen en 2 subgrupos: drenajes ácidos y drenajes alcalinos. Los drenajes ácidos influyen en gran parte en la degradación de hábitats debido a la creación de ambientes extremos para las especies, aumentando la acidez del medio, así como la carga contaminante de metales pesados que poseen (por ejemplo: Fe, Mn, Ca, Na, entre otros); mientras que, los drenajes mineros alcalinos se forman al entrar en contacto con carbonato cálcico y  $\text{CO}_2$  (Aduvire, 2006).

**Metales pesados:** los metales pesados, se encuentran presentes en bajas concentraciones en la corteza terrestre; pero en la actividad minera incrementan su concentración, generando un apreciable aumento de su cantidad en el medio. Entre los metales pesados, más comunes podemos encontrar al Pb, Cr, As, Hg, Cd, Zn, etc. (Higueras, Oyarzun, & Maturana, s.f.). Muchos de estos metales, mediante lixiviación y arrastre por agua, contaminan zonas aledañas a los sitios de explotación minera, afectando a los componentes del medio físico y biótico (Barcos et al., 2017).

**Residuos químicos:** El uso de agentes químicos como el ácido sulfúrico, cianuro, mercurio y disolventes son necesarios para la separación del material a ser extraído. El cianuro puede causar desde bocio hasta la muerte del individuo expuesto dependiendo la dosis, generalmente se refiere al cianuro como inofensivo una vez que llega a las lagunas de desechos; sin embargo, si logra filtrarse puede llegar a causar mucha afección en el medio.

El ácido sulfúrico puede ser usado directamente para la extracción de cobre o puede surgir como un subproducto, mismo que en contacto con el agua y metales pesados puede derivar al drenaje ácido de la mina. Su gestión deficiente y derrames generan



riesgos de toxicidad para el ambiente y las personas que lo manipulan (Revilla, 2018).

**Residuos de hidrocarburos:** Estos se producen generalmente en mantenimientos de las máquinas y equipos utilizados en los procesos, así como, en los medios de transporte. Generalmente son: aceite quemado y lodos residuales (Soria, 2016).

**Residuos domésticos:** Este tipo de residuos se presentan como: aguas servidas (limpieza general y deposiciones), basura orgánica (restos de alimentos, papeles, residuos de poda de plantas, etc.), basura inorgánica (latas, botellas de vidrio, bolsas de plástico, baterías, etc.). Todo lo anterior se presenta específicamente dentro de los campamentos (Soria, 2016).

#### **3.1.4. Efectos de la actividad minera**

Los efectos de la actividad minera sobre los componentes ambientales son diversos y dependen del tipo de emisión del contaminante, concentración y el medio afectado. Si bien existen procesos comunes, sus efectos sobre los componentes son variados y dependen adicionalmente de la biodiversidad del medio afectado (ELAW, 2010).

#### **Afectaciones al medio físico**

**Agua:** El agua es afectada principalmente por movimientos de tierra, ingreso de sedimentos, procedentes de las actividades mineras, por drenajes ácidos, por arrastre y lixiviación de agentes químicos y metales pesados (Soria, 2016). Entre los cambios producidos por los residuos mineros en el agua, podemos resaltar la modificación de las condiciones fisicoquímicas del agua tales como: cambios en el

pH, salinidad, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, dureza y sólidos totales (Lillo, 2008). Asimismo, en los cuerpos de agua dulce como ríos, lagos, esteros, se producen cambios en el perfil, aumento de lecho por sedimentación y trazado de la corriente (Ordoñez, 2014) y, la variación en el nivel de pérdida de agua por consumo y cambio de la dinámica y cambios en régimen hidrogeológico (nivel freático, drenaje, recarga, etc.) (Hernandez, 2011).

**Suelo:** Los trabajos previos a la actividad minera, como son la prospección sísmica, construcción de vías de acceso, deforestación o modificación del relieve (Higueras & Oyarzun, s.f.), generan daños a la corteza del suelo. Posteriormente, las actividades de extracción de la mena, con el uso de maquinaria pesada y excavaciones, generan problemas de erosión (Lillo, 2008), sedimentación y derrumbes. Adicionalmente, la construcción de escombreras y piscinas ácidas, que alteran radicalmente la topografía de las zonas mineras (González et al., 2008). Entre los cambios fisicoquímicos que se producen en el suelo, con frecuencia se evidencia la variación en textura (porosidad, permeabilidad, compactación, mezcla de horizontes, etc.), cambios en el pH, salinidad y contaminación por metales pesados (González et al., 2008).

**Aire:** Las afectaciones a la calidad del aire se generan por emisiones que se dan como partículas sólidas (polvo) y gaseosas (productos de combustión de procesos metalúrgicos) (Asociación Geoinnova, 2016). Gases como: COx, NOx, SOx y NH<sub>4</sub> se incrementan sensiblemente, produciendo un riesgo elevado para la población; en muchos casos son causa de la caída lluvias ácidas, que afectan a la flora y fauna de las zonas aledañas (La Rotta & Torres, 2017).

**Medio biótico:** Las afectaciones al medio biótico son consecuencia lógica de las afectaciones de los metales pesados a los componentes del medio abiótico. Entre

los principales efectos se puede mencionar a la eliminación de la cobertura vegetal, pérdida de la fertilidad del suelo, cambios en las cadenas tróficas y en la dinámica de poblaciones (movimiento de especies, destrucción o fragmentación de hábitats) (Galán & Romero, 2008), muerte y generación de resistencia y/o tolerancia de ciertas especies (por toxicidad en el medio sea agua, suelo o aire) (Giraldo, 2017), cambio a nivel morfológico de tejidos, cambio en bioquímica de los organismos, problemas a nivel reproductivo (infertilidad, mutaciones, etc.) y sobre todo la bioacumulación de metales pesados y diferentes compuestos (Hernández et al., 2014).

**Medio social:** La minería en el aspecto social tiene efectos positivos y negativos. Entre los positivos que contribuyen al incremento de calidad de vida de las comunidades aledañas a los sitios de explotación minera, tenemos a la creación de puestos de trabajo de forma directa e indirecta, aumento de acceso a servicios básicos y salud, aparición de nuevas actividades económicas (tiendas, supermercados, transporte, locales comerciales, centros de entretenimiento, etc.) (Hazin, 2013).

Entre los negativos podemos citar a: la generación de ruido y vibraciones, migración descontrolada, violencia social, desintegración familiar, cambios culturales, apropiación de tierras comunitarias, desplazamientos humanos, alcoholismo, deserción escolar y prostitución (Arcos, et al., 2018). Un fenómeno extremo que se ha observado en los últimos años ligados a la actividad minera, son las prácticas violentas de resolución de conflictos como sicariato y asesinatos (Hazin, 2013). Otro efecto negativo de la minería es la corrupción a nivel de funcionarios públicos y privados que exigen coimas o prebendas para la obtención de permisos de explotación o de funcionamiento de negocios asociados a la actividad minera (Cano, 2018; Sánchez et al., 2016). Finalmente, uno de los factores que más afectan a la

cohesión social, es la exposición de los trabajadores y la comunidad a materiales peligrosos particulados y suspendidos de mercurio, radón, arsénico, e hidrocarburos (Cano, 2018; Cisneros, 2016).

### **3.2. Metales pesados derivados de las actividades mineras y sus efectos**

Los metales pesados se encuentran de forma natural en la corteza terrestre en concentraciones muy bajas. La minería extrae a los metales de los minerales empleando diferentes mecanismos de extracción química con ayuda de procesamientos físicos que involucran explosiones, tamizados y molienda (Alcalá et al., 2012). Como resultado de estas operaciones las concentraciones de metales, en especial de los metales pesados, en los componentes del medio abiótico incrementan sustancialmente. El aumento de la concentración de estos metales genera toxicidad que afecta negativamente a la calidad del suelo, agua y aire, así como también a los organismos que habitan en estos medios (Galán & Romero, 2008).

Muchos de estos metales como resultado de los procesos extractivos se hallan en solución, en consecuencia se encuentran biodisponibles; razón por la cual, son fácilmente asimilados por las plantas y microorganismos, que los incorporan en las cadenas tróficas y los conduce a procesos de bioacumulación y biomagnificación (Galán & Romero, 2008).

De acuerdo a lo establecido por Grassi (2015), entre los metales pesados derivados de las actividades mineras y, que con mayor frecuencia se liberan al medio natural representando un alto riesgo para la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas, se encuentran el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cobre (Cu), el arsénico (As) y el cadmio (Cd).

### 3.2.1. Mercurio

Las fuentes de origen del mercurio en el ambiente generalmente provienen de la extracción de la mena para su empleo en diferentes actividades productivas. La forma natural del mercurio que se haya en las menas es como cinabrio o de corderoita y calomelano, entre otras formas (Gaona, 2004).

La fuente de mayor producción de mercurio y causa de su eliminación al ambiente es el empleo del mercurio en la extracción de oro y plata (amalgama) (Lominchar et al., 2010). El mercurio en estado elemental es líquido a temperatura ambiente, fácilmente volátil cuando se expone a la fluctuación de la temperatura ambiental factor que incrementa el riesgo de generación de enfermedades en mineros y población cercana a las minas producto de la inhalación del mercurio volátil (Lominchar et al., 2010). Una vez en la atmósfera, el mercurio en estado gaseoso puede reaccionar con ozono atmosférico aumentando su toxicidad, volviéndose en mercurio metálico iónico. Este mercurio metálico iónico puede quedarse en la atmosfera y combinarse con el vapor de agua o partículas suspendidas en el aire y ser depositado en el suelo. Una vez en el suelo puede producirse reacciones foto líticas tornando el mercurio metálico en mercurio gaseoso debido a foto reducción. A la vez puede producirse ciertas reacciones debido a la actividad bacteriana transformando el mercurio metálico en metilmercurio (Gaona, 2004; Lominchar et al., 2010).

El mercurio en estado gaseoso puede ingresar en los seres vivos mediante el sistema respiratorio dando como resultado “Hidrargirismo” una enfermedad asociada a la neurodegeneración. El metilmercurio es una de las especies del mercurio que surge en el suelo debido a la actividad bacteriana. Presenta una alta solubilidad por lo cual, con acción de la lluvia y lixiviación, puede llegar a los cuerpos de agua. Una

vez se encuentre en el cuerpo de agua este puede ingresar en la cadena trófica mediante absorción por especies acuáticas llegando así a altos niveles de la cadena trófica (Ferrer, 2003). La enfermedad derivada de este se la conoce como “enfermedad de Minamata” la cual afecta al sistema inmunológico y nervioso, genera cambios en sistemas enzimáticos y teratogénesis (Londoño et al., 2016).

El metilmercurio se bioacumula con facilidad en el tejido de los peces. La forma de bioacumulación es formando enlaces covalentes en los grupos sulfhidrilo proteínico impidiendo su rápida eliminación y el paso del metilmercurio a las cadenas tróficas y su biomagnificación (González et al., 2014). Como se presenta en el estudio de Jack Weinberg (2005), la concentración de mercurio presentes en peces puede superar 106 veces a la concentración presente en el agua. Los diferentes compuestos tienen una diferente absorción en el organismo, por ejemplo, los compuestos orgánicos de mercurio tienen una capacidad de ser absorbidos por vía respiratoria con una eficiencia del 95%, a diferencia de los compuestos inorgánicos de mercurio con una eficiencia entre el 2 y 15% (Ramirez, 2008).

### **3.2.2. Plomo**

El plomo naturalmente se lo encuentra en conjunto con el cobre o la plata, luego de la extracción de estos últimos el plomo queda libre. Sus formas más comunes son el sulfuro de plomo, la cerusita y la anglesita (García, 2006).

Durante la extracción del cobre y la plata mediante fundiciones, el Pb se elimina en forma de material particulado de pocas micras de tamaño y en esta forma ingresa al organismo a través del sistema respiratorio o puede adherirse a la piel (Rábago, 2011). Además, este material particulado de plomo puede llegar a la atmósfera, al suelo y al agua (Ferrer, 2003).

El Pb es un metal pesado altamente tóxico que tiende al igual que el mercurio a bioacumularse y a biomagnificarse en los ecosistemas (Reyes et al., 2016). En la atmósfera, se encuentra como material particulado de plomo que puede llegar a ingresar por la vía respiratoria, integrarse al organismo o adherirse a la piel. En el suelo, el plomo en altas concentraciones llega a limitar la síntesis de clorofila en las plantas, así como su crecimiento y desarrollo de estructuras. Las plantas llegan a absorber y asimilar el plomo y de esta forma, ingresa en las cadenas tróficas al ser consumidas (García, 2006).

El plomo al quedar expuesto a aire húmedo puede llegar a oxidarse generando óxido de plomo y, al estar en contacto con agua llega a reaccionar en hidróxido de plomo. Dentro del agua el plomo entra en contacto con sulfuros y fosfatos, al reaccionar con estos se encuentra como un compuesto insoluble e inmóvil. Además de esto, este metal se precipita rápidamente como sulfato o carbonato, en donde la problemática se encuentra en los sedimentos de diferentes cuerpos de agua. Uno de los efectos del Pb en el metabolismo del fitoplancton es la reducción de la producción de oxígeno.

En un estudio presentado por Cordero y otros (2005), se puede observar el mayor efecto que puede ejercer el plomo sobre estas poblaciones, en donde se localizó la dosis letal 50 para micro algas en una concentración de plomo igual a 0.40 mg/l, que resultó ser 3 veces menor a la concentración de mercurio (1,14 mg/l) y 13 veces menor que la de cadmio (5,44 mg/l), dando como resultado una mayor toxicidad causada por el plomo. Luego de esto, las plantas acuáticas pueden llegar a bioacumular el metal en sus estructuras y estas al ser consumidas por especies acuáticas biomagnifican el plomo en sus tejidos. A la vez presentan perturbación en las actividades del fitoplancton reduciendo su reproducción y baja producción de oxígeno (Rábago, 2011).

El plomo no es considerado un elemento esencial en los seres vivos razón por la cual en los organismos se presenta como un elemento tóxico. La toxicidad de este elemento puede presentarse como efectos agudos y crónicos; los efectos agudos se presentan mayoritariamente en niños produciendo “encefalopatías agudas” que pueden llegar a ser letal (Reyes et al., 2016). Mientras que, en el caso de efectos crónicos se puede producir una interacción del Pb con otros elementos, iones elementales o con valor biológico (Ca, Fe, Zn, entre otros) que se manifiestan en procesos biológicos al ingresar en la sangre y llegar a bioacumularse especialmente en huesos y tejidos. Dentro de las enfermedades más conocidas están: nefrotoxicidad, neurotoxicidad, hipertensión, daño durante el desarrollo del feto, afecciones en el sistema nervioso, entre otros (Ferrer, 2003; Londoño et al., 2016).

En los seres humanos existe una fracción del 20% de Plomo ingerido que puede ser absorbido por el organismo. El plomo que no llega a ser eliminado puede encontrarse en sangre y huesos (incluyendo los dientes), los huesos pueden llegar a alojar el 74% y 95% de plomo, en niños y adultos respectivamente (Poma, 2008).

### **3.2.3. Cobre**

El cobre, en la naturaleza se encuentra en forma de calcocita, covelita, bornita, entre otros. Este metal al igual que el plomo se expone en el proceso de fundición en forma de material particulado que se deposita en distintos componentes del ambiente (Tábora, 2017).

El cobre presente en el agua, mayormente, tiende a precipitarse y acumularse como sedimento. Aquí puede ser consumido por organismos que actúan como filtrantes como son las ostras y luego ingresar en las diferentes cadenas tróficas. Además, este sedimento al estar en contacto con diferentes microorganismos llega a estar



disponible para ser adsorbido por plantas acumulándose en sus estructuras. En altas concentraciones llega a producir lesiones en raíces y también reduce el crecimiento de estas y produce clorosis. En el estudio de Barcelo y otros (2006), se pudo concluir la toxicidad del cobre en altas concentraciones reduciendo el crecimiento de estructuras bajo una concentración de 200 mg/kg. En el caso de algas y hongos reduce la producción de esporas.

La exposición a material particulado de cobre puede causar irritación en el sistema respiratorio, dolores de cabeza, mareo, náuseas, entre otros. En altas dosis puede causar daños en hígado y riñones, hasta alcanzar la muerte (Londoño et al., 2016).

#### **3.2.4. Arsénico**

El arsénico es un elemento no metálico altamente tóxico que se lo encuentra en conjunto con el oro, cobre y zinc. Las principales especies de minerales en las que se encuentra el As, son la arsenopirita, enargita y la tennantita (Londoño et al., 2016). El As queda disponible posterior a la fundición de enargita en la extracción de cobre. Este metal pesado escapa como gas, que puede afectar al sistema respiratorio si es inhalado o puede terminar depositándose en los suelos.

El principal foco de afección es hacia la atmósfera debido a la fundición del mineral, el cual da como resultado material particulado y gas que contiene trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ , altamente tóxico). Una vez en la atmósfera, puede concurrir en deposición seca o húmeda dependiendo de las condiciones ambientales. En cambio en el suelo, puede solubilizarse y ser fácilmente absorbido o adsorbido por materia orgánica y las arcillas (Ara & Choque, 2007). Posteriormente, por acción microbiana ocurre la síntesis biológica de compuestos de arsénico,  $\text{CH}_3\text{-AS}$  (forma orgánica), y sales inorgánicas de arsenitos y arsenatos, entre otros procesos (Fernández, 2012).

Los arsenitos se fijan en las proteínas de los organismos presentes en el medio afectado causando afectaciones en el Ciclo de Krebs (a nivel de fosforilización oxidativa). Por otro lado, también se puede encontrar en algas, invertebrados y peces en forma de residuos arseniacales. Las plantas, tanto acuáticas como terrestres, pueden adsorber el arsénico y acumularlo en sus estructuras entrando así en las diferentes cadenas tróficas y biomagnificarse en cada nivel (Fernández, 2012; Ferrer, 2003). En el estudio presentado por Prieto y otros (2005), se puede constatar que existen especies que pueden llegar a absorber el 50% de la concentración de arsénico presente en el suelo y acumularlo en sus estructuras, como es el caso de *Citrus sinenses* (Naranja) que puede acumular el 41,75% de arsénico en sus frutos y, *Chenopodium ambrosoides* el 62,86% en sus hojas, por mencionar algunas especies.

El arsénico siempre se ha conocido como uno de los venenos más utilizados por los humanos debido a las afecciones que este puede causar. Las especies con mayor afección se presentan como ácidos metil arsónico y dimetil arsínico. En exposición de grandes dosis se produce una intoxicación aguda resultando en problemas gastrointestinales, disfunciones en el sistema nervioso, problemas cardiovasculares e incluso la muerte. Por otro lado, si la exposición es en bajas dosis, pero en tiempos prolongados y constantes se desarrolla intoxicación crónica presentando diferentes tipos de cáncer (Reyes et al., 2016).

### **3.2.5. Cadmio**

La forma más común y natural del cadmio es la greenockita. Se halla asociada con el zinc y queda disponible después de la fundición del mineral y la extracción del zinc (García & Azcona, 2012). La fundición del mineral genera gases y material particulado de cadmio, que se depositan en los suelos y que de allí migra hacia el agua donde se disuelve e incorpora a las cadenas tróficas (Tejada et al., 2015).

En actividades industriales suele incurrirse a inhalación, ingesta y contacto con el óxido de cadmio, siendo este elemento tóxico capaz de afectar al sistema respiratorio, acumulación en riñones e hígado, producir osteomalacia, entre otras afecciones. Al igual que el arsénico puede producir intoxicaciones agudas y crónicas. A nivel agudo puede desarrollar edemas pulmonares, finalmente asfixiando al individuo y causando su muerte, a nivel crónico se pueden observar daños en los riñones, osteomalacia, osteoporosis, enfisemas pulmonares, anemia, pérdida del olfato y cáncer (García & Azcona, 2012; Londoño et al., 2016).

Por los procesos de refinado y fundición el cadmio se presenta como óxido de cadmio, además también se puede encontrar en forma de cloruro o sulfato, los cuales pueden encontrarse en la atmósfera en la cual puede producirse deposición seca y húmeda. La solubilidad de los aerosoles de cadmio es muy alta, razón por la cual pueden disolverse con gotas de lluvia y vapor de agua. En el agua y en el suelo dependiendo de la especiación química, potencial redox, pH, cationes e iones se pueden formar diferentes compuestos en el medio (Sánchez, 2016).

En los cuerpos de agua el ion de cadmio se une con diferentes partículas y precipita en forma de sedimento. En cuerpos de agua inmóviles y en calma se producen procesos anaeróbicos en los cuales existe reducción de sulfatos a sulfuros que actúan con el cadmio, este se precipita y queda insoluble en el medio. El cadmio es adsorbido por las plantas acuáticas y terrestres, acumulando así este metal en sus estructuras y biomagnificándose en las cadenas tróficas. Los organismos acuáticos pueden consumir las plantas y así adsorber el cadmio o las partículas suspendidas de cadmio pueden introducirse por las algas bioacumulándose en los tejidos (Reyes et al., 2016). Según el estudio realizado por Angulo y otros (2001), se puede concluir la inhibición de crecimiento de diferentes microalgas por distintas concentraciones de cadmio, ya que se ha evidenciado una inhibición del 20% con

una concentración de 50 mg/l, hasta una inhibición del 98% con una concentración de 250.000 mg/l.

### **3.3. Biodiversidad edáfica**

#### **3.3.1. Los microorganismos y el suelo**

El suelo es una de las matrices de mayor importancia debido a que alberga a una gran cantidad de especies actuando como un medio de vivienda, alimento y depósito (García, 2011). Los organismos vivos presentes en el suelo desempeñan diferentes funciones en él y pueden variar entre animales, plantas y, los más importantes, microorganismos como hongos, bacterias, algas, actinomicetos, protozoarios, entre otros (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2015).

Los microorganismos llegan a considerarse como una de las partes más importantes del suelo debido al papel fundamental que juegan dentro de sus diferentes funciones. Se centran principalmente en la transformación de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo (Baker et al., 2016), como por ejemplo: la humificación de la materia orgánica, transformación de diferentes compuestos y elementos para que estén biodisponibles para ser asimilados por plantas, entre otros. Los ejemplos mencionados anteriormente forman parte de un proceso mucho más grande, los ciclos biogeoquímicos (Guzmán, 2017).

Lo ciclos biogeoquímicos son la explicación de cómo diferentes elementos químicos se movilizan dentro de las diferentes matrices (agua, suelo y aire) y, a la vez, describen la interacción de los microorganismos y organismos con el medio. Se

basa en principios de transformación y descomposición de los elementos y como estos pueden ser asimilados en los sistemas (CORDIS, 2015). Existen varios ciclos, entre los más importantes están: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Los microorganismos actúan sobre las reacciones que ocurren durante los ciclos para transformar y degradar los compuestos y hacerlos disponibles para que puedan ser asimilados por otros organismos y, así continuar el ciclo de un elemento específico (Millan, 2016).

Los microorganismos adicionalmente son capaces de emplear en calidad de fuente de nutrientes (C, N, P) a una amplia gama de contaminantes ambientales antropogénicos, contribuyendo de esta forma a su descontaminación y al restablecimiento de la fertilidad. Adicionalmente, los microorganismos mantienen relación estrecha con las plantas en una relación de carácter simbiótica o parasita, influenciando en su metabolismo en forma positiva o negativa, que se revierte en una mayor o menor productividad (Guzmán, 2017).

### **3.3.2. Diversidad microbiana de los suelos**

Existen diferentes tipos de suelos en todo el mundo y cada suelo posee características propias, la cantidad y la diversidad de microorganismos, flora y fauna va a depender enteramente de las características que posea el suelo (pH, humedad, tipo de suelo, materia orgánica disponible, entre otros). Los suelos tienen una amplia diversidad de microorganismos, gran parte de ellos, especialmente las bacterias, aún son desconocidas para el ser humano debido a que no han podido ser cultivadas, caracterizadas o aún faltan muchos lugares sin estudiarse. Al ser cada suelo diferente, debe cumplir con condiciones óptimas para asegurar el mantenimiento de los organismos que están presentes en el condicionando así la abundancia y diversidad de las especies (García, 2011).

La microbiota del suelo se ve compuesta principalmente por bacterias, hongos, actinomicetos y algas. Están encargadas de cumplir varios procesos en el suelo por lo cual mientras mayor diversidad exista en el suelo, mejores procesos se desarrollarán, por ende, el suelo será más fértil (Capello et al., 2000).

La mayor diversidad de microorganismos se encuentra entre los primeros 30 centímetros de profundidad del suelo, se establecen en coloides o colonias en conjunto con suelo y materia orgánica, además, en las raíces de diferentes plantas. El desarrollo de estas colonias, abundancia y diversidad tienen mucha relación con la disponibilidad y cantidad de sustrato (alimento) para transformar mediante procesos biológicos (Guzmán, 2017).

### **3.3.3. Diversidad microbiana de suelos en áreas mineras**

La caracterización y cuantificación de una comunidad microbiana en los suelos, es fundamental para conocer su estructura y los posibles cambios, bajo el influjo de contaminación ambiental (Navas et al., 2018). La mayor diversidad de microorganismos edáficos corresponde a géneros bacterianos que se distribuyen en todos los ecosistemas.

En suelos altamente contaminados, la diversidad microbiana está dominada por hongos, actinomicetos y cianobacterias (Arredondo, Aguilar & Noriega, 2016). Así en suelos afectados por contaminación minera de Cu, se ha demostrado la presencia de los Filos *Actinobacteria*, *Acidobacteria*, *Fermicutes*, *Bacteroidete* y *Proteobacteria*, siendo mayor la biodiversidad en suelos no afectados por contaminación (Navas et al., 2018). La diversidad microbiana de suelos mineros es muy variada, así se evidencia del análisis de relaves mineros de cianuro, donde se

identificaron los géneros: *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, y representantes de 16 diferentes filos, entre ellas: *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chlamydiae*, *Chloroflexi*, *Cyanobacteria*, *Firmicutes*, *Fusobacteria* y *Gemmatimonadetes* (Cornejo, 2016). En una minera de oro de Colombia se encontraron especies bacterianas como *Pseudomonas sp.*, y *Enterobacter cloacae*, con predominio de *Pseudomonas*, de igual forma se identificaron especies fúngicas tales como: *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium verticilloides*, *Beauveria bassiana* y *Cadophora malorum* (Vargas, 2017).

En suelos contaminados por metales pesados las especies predominantes son: *Burkholderia pickettii*, *B. solanacearum* y *Alcaligenes eutropus*, *Burkholderia*, *Hafnia*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Comamonas* y *Agrobacterium* (Arredondo, Aguilar & Noriega, 2016). Debido a su genética versátil las *Pseudomonas* son un grupo representativo en suelos contaminados procedentes de la minería; poseen operones y plásmidos que les permite una rápida adaptación a la presencia de estos contaminantes (Gómez et al., 2008). Adicionalmente varias cepas de *Pseudomonas* son capaces de producir metabolitos bioactivos, que constituyen el principal mecanismo de supresión de ciertos patógenos (Chen et al., 2015).

## 4. CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN

### 4.1. Gestión de metales pesados de minería

Las actividades mineras en todo el mundo provocan alta contaminación en las matrices ambientales (suelo, agua y aire) debido al incremento en los parámetros normales de metales pesados en los mismos. Es por esto que durante varios años se han desarrollado varias técnicas, tratamientos y tecnologías para reducir la concentración de metales pesados en el medio. Por cada matriz ambiental se han establecido técnicas, la selección de cual técnica podrá usarse en cada caso

dependerá de muchos factores como, por ejemplo: especiación y disponibilidad de los metales, toxicidad, inversión, espacio en el cual se requiera trabajar, entre otros (Caviedes Rubio et al., 2015).

Lastimosamente, la mayoría de las empresas no tienen sistemas para reducir uso de recursos y minimizar contaminantes, una gran representación de estas, causa afectaciones al medio ambiente y muy pocas implementan sistemas para gestionar todos los contaminantes que generan. Durante la última década se ha prestado más atención a las afecciones causadas por esta industria, razón por la cual se han propuesto distintos sistemas y metodologías para la gestión de metales pesados provenientes de la industria minera.

En Ecuador, en el Proyecto Minero Río Blanco se presentaron varias tecnologías que fueron utilizadas a forma de control, gestión, tratamiento, estabilización y disposición final de relaves mineros. Entre las principales medidas implementadas se incluyeron relaveras, tratamiento de aguas residuales, optimización de uso de recursos dentro de los procesos de obtención de minerales; así como el uso futuro de fitorremediación. De hecho, una vez culminado el tiempo de vida útil de la relavera se realizará la implementación de un sistema de fitorremediación para la estabilización y retención de los metales pesados originados por el proyecto minero.

De hecho, la fitorremediación se trata de una tecnología que emplea especies vegetales que tienen la capacidad de extraer, adsorben, fijar, tolerar y acumular diferentes contaminantes presentes en el suelo y agua, entre ellos los metales pesados (Núñez et al., 2004). La fitorremediación es un proceso complejo que involucra una serie de procesos entre los cuales están: biofiltración, fitoextracción, fitoestabilización, contención, acumulación, degradación de metales, entre otros



(Delgadillo et al., 2011). El proceso va a depender del tipo de contaminante presente, su especiación, concentración, características fisicoquímicas del suelo, entre otros. Las especies vegetales involucradas en el tratamiento de metales pesados son muy variadas: plantas emergentes, flotantes, sumergidas, plantas superiores, entre otras. Se han reportado estudios exitosos con especies vegetales como el maíz, girasol, nabo, arveja, soja, entre otros pueden extraer del suelo metales como Co, Cr, Cd y Pb (Marrero et al., 2012).

Tabla 3.

*Especies utilizadas en fitorremediación de metales pesados.*

<b>Tipo</b>	<b>Nombre científico</b>	<b>Metales Pesados</b>	<b>Fuente y año</b>
Algas	<i>Ulva sp.</i>	Pb, Cu, Ni	Cuizano & Navarro, 2008
	<i>Chlorella vulgaris</i>	Ag, Au	
	<i>Sargassum sp.</i>	Pb, Cr	
	<i>Spirulina sp.</i>	Cu	
	<i>Padina sp.</i>	Cu, Ni	
Plantas	<i>Ascopgyllum sp.</i>	Cd, Cu	Delgadillo et al., 2011
	<i>Brassia juncea</i>	Cd, Zn, Cu, Pb	
	<i>Lolium italicum</i>	Pb, Zn	
	<i>Deschampsia cespitosa</i>	Pb, Cd, Zn	Jara et al., 2014
	<i>Lupinus angustifolius</i>	As	
	<i>Solanum nitidum</i>	Zn, Pb, Cd	
	<i>Brassica rapa</i>	Zn, Pb, Cd	
	<i>Fuertesimalva echinata</i>	Zn, Pb, Cd	
	<i>Urtica urens</i>	Zn, Pb, Cd	
<i>Lupinus ballianus</i>	Zn, Pb, Cd		

Adaptado de (Cuizano & Navarro, 2008; Delgadillo et al., 2011; Jara et al., 2014).

Según el estudio realizado por Espín y otros (2017), en los relaves de esta minera se detectaron los siguientes metales: Zn, Cu, Ni, Cd y Pb; por lo que gracias a los análisis presentados se llegó a la conclusión de que existen varias especies de la Sierra ecuatoriana que se podrían ser empleadas en este tratamiento, como lo son el arbusto mariposa o colli (*Buddleja coriacea*) y el yagual o quinual (*Polylepis*

*rasemosas*), especies vegetales que han demostrado tener una alta tolerancia a metales como: Ag, Pb, Cu, Cd, entre otros (Paredes, 2015).

Es importante destacar que, en la etapa de disposición final de los relaves, dentro de los planes presentados a futuro, también se establece la posibilidad del uso de los desechos de los relaves para fabricar ladrillos y baldosas. Para sustentar esta tecnología, se presentan los resultados de proyectos piloto desarrollados en Perú, que buscan utilizar los sedimentos como agregado en ladrillos y baldosas, estos sedimentos tienen metales pesados los cuales son encapsulados con el fin de estabilizarlos y reduciendo su disponibilidad y movilidad (Romero & Flores, 2010).

De igual manera, en Perú se han realizado varios estudios referentes a métodos alternativos para el tratamiento de aguas provenientes de minería. Por ejemplo, el estudio elaborado por Rimarachin y Huaranga (2015), consistió en el uso de métodos pasivos y activos, en donde se empleó humus y compost (método pasivo) y osmosis inversa con membranas semipermeables artesanales (método activo) para depurar las aguas resultantes de esta industria. Este método fue probado en agua residual que contenía Cu, Pb, Cd, Zn, As y Hg, el cual dio resultados de remoción superiores al 85%, dando como conclusión que el uso de métodos pasivos representa una elevada capacidad de remoción de metales pesados en aguas residuales de procesos mineros, pero con la implementación del sistema de membranas semipermeables se eleva mucho más el resultado de remoción (Rimarachin & Huaranga, 2015).

En el documento “Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados”, de Paolo Terrel (2019), desarrollado en conjunto con el Instituto Nacional de Salud de Perú, se enlistan un conjunto de tecnologías para el tratamiento de las aguas de minería, entre las que se mencionan a tratamientos

biológicos (plantas y microorganismos) y a tratamientos químicos como la floculación, métodos electroquímicos, ósmosis, intercambio iónico, entre otros. Adicionalmente, se proponen tratamientos diferenciados por metal, a manera de ejemplo, se presentan estudios de cepas específicas que son capaces de adsorber plomo o el uso de procesos de mineralización de carbonato por bacterias (Terrel, 2019).

La fitorremediación con especies altoandinas es otra técnica empleada en el Perú, para la remediación de suelos mineros. Un estudio señala el empleo de *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata*, *Urtica urens* y *Lupinus ballianus*., para las pruebas se utilizaron diferentes sustratos con diferente concentración de relaves mineros correspondientes al 30, 60 y 100% y un blanco sin concentración de relaves. A una concentración de 100% de relaves mineros la especie con mayor acumulación de plomo y zinc fue *F. echinata*, para el caso de cadmio la mejor fue *L. ballianus*. El estudio concluyó que *F. echinata* es la especie con mayor índice de tolerancia, pero con menor tasa de acumulación en biomasa. (Jara et al., 2014)

*Calamagrostis rigida* y *Myriophyllum quitense*, son especies vegetales empleadas en otro estudio realizado en el Perú, para la Fitoestabilización de las especies de metales pesados presentes. Los resultados del estudio muestran que una mayor acumulación radicular Cu, Cd, Pb, y Zn se presentó en *C. rigida*, razón por la que se concluyó que esta especie puede ser utilizada como bioindicador de contaminación en agua por metales pesados (Jara et al., 2017).

A pesar de la existencia de varios sistemas de gestión varias empresas no recurren a estos por su elevado costo, mantenimiento, tiempo de resultados y complejidad de los procesos. Muchas de las normativas de varios países no consideran la

afección de esta industria razón por la cual existen pocos controles y se realiza mínima gestión de la contaminación por parte de minería.

#### **4.2. Efectos de la contaminación por metales pesados en comunidades microbianas**

Pese a que varios metales son esenciales para algunos procesos celulares ya que actúan como micronutrientes o como factores enzimáticos, a concentraciones elevadas tienen un efecto potencialmente tóxico para todos los organismos vivos (Molina, Medina & Mahecha, 2008) pues bloquean las actividades biológicas provocando la inactivación enzimática causada por la formación de enlaces entre los iones del metal y los grupos sulfhidrilos de las proteínas (Vullo, 2003). La mayoría de las células tienen dos diferentes tipos de sistemas de captación de cationes de metales pesados: 1) un sistema rápido e inespecífico que depende del gradiente quimiosmótico que se encuentra a través de la membrana citoplasmática bacteriana; y, 2) un sistema específico, pero más lento el cual se caracteriza por utilizar la hidrólisis del ATP como fuente de energía además del gradiente quimiosmótico (Marrero, Díaz & Coto, 2010).

Al encontrarse con grandes concentraciones de metales pesados, el catión del metal es transportado al citoplasma pese a su elevada concentración, ya que los transportadores inespecíficos se expresan constitutivamente, es ese el motivo por el cual los iones de metales pesados son altamente tóxicos ya que son transportados con facilidad. Una vez dentro de la célula estos iones son capaces de formar enlaces coordinados con aniones lo cual provoca que se inhiban sistemas de transporte, desplazamiento de metales esenciales a sitios nativos e interrupción de la integridad de la membrana celular (Suárez & Reyes, 2002).

Existen microorganismos resistentes y tolerantes a metales pesados. Los primeros han desarrollado mecanismos de detoxificación codificados genéticamente inducidos por la presencia del mismo metal (Moraga & Mondaca, 2003) y, los tolerantes actúan de manera indiferente a la presencia o ausencia de cualquier metal.

Se conoce que las bacterias han desarrollado diferentes mecanismos resistentes para tolerar los efectos nocivos de los metales pesados como: 1) enzimas que modifican el estado redox de los metales o metaloides transformándolos en formas menos tóxicas, 2) componentes celulares que capturan iones, de esta manera neutralizando su toxicidad; y, 3) transportadores de membrana que expulsan las especies nocivas del citoplasma celular (Cervantes et al., 2006).

Existen varios géneros y especies de microorganismos capaces de tolerar altas concentraciones de metales pesados, los siguientes son un resumen:

Tabla 4.

*Microorganismos tolerantes a metales pesados.*

<b>Tipo</b>	<b>Género</b>	<b>Metales a los que demuestran tolerancia</b>	<b>Especies</b>
Hongo	<i>Fusarium sp.</i>	Pb, Cu, ZN, Ni, Ag, Cr, Cd	<i>F. oxysporum</i> <i>F. temperatum</i> <i>F. fujikuroi</i> <i>B. subtilis</i>
Bacteria	<i>Bacillus sp.</i>	Pb, Cu, ZN, Ni, Ag, Cr, Cd	<i>B. cereus</i> <i>B. licheniformis</i>
Bacteria	<i>Serratia sp.</i>	Zn, Ni, Cr, Cd	<i>Serratia sp.</i> <i>P. digitatum</i>
Hongo	<i>Penicillium sp.</i>	Pb, Zn, Ni, Ag, Cr	<i>P. rubens</i> <i>P. vanluykii</i>
Bacteria	<i>Enterobacter sp.</i>	Pb, Zn, Ni, Ag, Cr, Cd	<i>Enterobacter sp.</i>
Bacteria	<i>Staphylococcus sp.</i>	Pb, Cu, Ni, Ag, Cr	<i>S. epidermis</i>

Adaptado de Muñoz-Silva (et al., 2019)

En Ecuador, se han realizado estudios referentes a la capacidad de remoción de plomo de aguas residuales sintéticas, para ello se ha determinado la presencia de géneros como: *Acinetobacter*, *Aeromona* y *Pseudomona*, así como las siguientes especies: *Aeromona hydrophila* y *Photobacterium damsela*. En los resultados de este tipo de estudios se ha determinado a *Aeromona hydrophila* como la especie con mayor tasa de crecimiento en presencia de plomo y, a *Pseudomona sp.* como la especie que presentó una remoción de Pb más alta (entre 96 a 100% de eficiencia de remoción) (Ramírez et al., 2016).

Otros estudios se han enfocado en la recolección de información realizada por varios centros de investigación en el país, en los que se reporta el análisis de los componentes de la microbiología del suelo afectado por actividades mineras, donde se ha encontrado que existen bacterias promotoras de crecimiento vegetal, como: *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, bacterias para control biológico, como: *Trichoderma*, *Pasteuria penetrans*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas cepacea*, *Beauveria*, *Baculovirus*, *Metarhizium*) y bacterias empleadas en procesos de biorremediación, como la *Pseudomonas sp.* (Bernal, 2015).

De igual manera en México, se realizó un estudio referente a las interacciones que ocurren entre bacterias y plantas, cuyas relaciones simbióticas han sido utilizadas para la biorremediación de metales pesados. El estudio evaluó la efectividad de la inoculación de rizobacterias en dos especies de plantas, dando como resultado crecimiento continuo de las plántulas bajo condiciones de contaminación por metales pesados, reflejando un tipo de comportamiento de protección al contaminante (Labra et al., 2012).

En un estudio realizado en Santa Rosa, Jangas en Perú (Muñoz et al., 2019), se ensayó el grado de tolerancia que podrían presentar cepas de hongos y bacterias a

diferentes concentraciones de Pb, Ni, Cu, Zn, entre otros metales. Además de comprobar la tolerancia, se obtuvieron resultados respecto a la dinámica de poblaciones que existe en contacto con diferentes concentraciones de metales pesados en el medio demostrando altas tasas de crecimiento de las especies tolerantes y reduciendo la abundancia de las especies menos tolerantes.

Ahora bien, en base al análisis de la bibliografía seleccionada, se ha encontrado que el mercurio es el metal pesado de mayor uso en la minería artesanal a pequeña escala, donde la emplean para la extracción de oro y plata de las amalgamas encontradas en el proceso extractivo (INS, 2012). Es así que la mayoría de fuentes bibliográficas señalan que los metales con mayor efecto contaminante son el plomo y el mercurio (Londoño, 2016). El Hg fue de los primeros metales en ser prohibido y determinado como elemento con alta contaminación en el Convenio de Minamata de 2013 con el objetivo de proteger a los seres humanos y al ambiente, de los efectos nocivos de su presencia en los componentes ambientales (PNUMA, 2017).

El plomo es un metal tóxico ampliamente utilizado en varias actividades productivas (no solo minería), presenta una similitud química con el calcio, razón por la que puede reemplazarse en algunos procesos de metabolismo celular (Ferrer, 2003), limitar la síntesis de la clorofila, limitar el desarrollo de estructuras en plantas y generar procesos de bioacumulación y biomagnificación (Eróstegui, 2009).

La contaminación por metales pesados afecta a la biodiversidad microbiana que responde con algunos mecanismos como: muerte de algunas especies, desarrollo de resistencia y tolerancia, cambios en la dinámica poblacional (cambios en la estructura y relaciones tróficas que desencadenan en destrucción o fragmentación de hábitats), además de bioacumulación y biomagnificación en la biomasa microbiana (Marrero, 2010).

Los microorganismos son capaces de interactuar con los metales pesados a 3 niveles: en el interior, por absorción; en la superficie, por adsorción y a nivel externo mediante la producción de metabolitos como polisacáridos o péptidos que interactúan con los metales pesados provocando su precipitación y su aislamiento (García, 2002). La interacción a nivel intracelular involucra procesos de transformación enzimática, síntesis proteica que los enlaza con la consecuente bioacumulación (Suárez, 2002).

Además, los microorganismos que entran en contacto con metales pesados presentan variaciones a nivel poblacional y funcionamiento del ecosistema, es así que llegan a disminuir el tamaño de la población microbiana afectando sus actividades biológicas. Se ha determinado que existe una reducción en la población microbiana por presencia de metales pesados dejando una estructura de 30,64% para bacterias, 11,48% para hongos y 19,03% para actinomicetos (Zarate, 2013). Cabe recalcar que estos valores se presentaron para el suelo de estudio (suelo agrícola Chupaca - Junín, Perú) con características propias y diferentes, por lo que cada suelo se verá afectado en distintas proporciones dependiendo de sus características fisicoquímicas y biológicas.

En lo que respecta a hongos y bacterias se ha reportado una reducción en abundancia y biomasa. Según el estudio de Baath (1989), se ha logrado constatar que los hongos presentan mayor tolerancia a metales pesados que las bacterias. En sus ensayos, las bacterias gram-positivas resultaron ser más sensibles que las bacterias gram-negativas. Dentro del mismo estudio, también se encontraron resultados respecto al aumento en el crecimiento del 24% de hongos específicos en suelos contaminados. Se concluyó que no se presentaron diferencias en composición y diversidad del total de bacterias; sin embargo, las bacterias tolerantes



a Cd tuvieron una mayor diversidad con una predominancia de *Pseudomonas* sp.(Baath, 1989).

Asimismo, en el estudio presentado por Vig y otros (2003), se puede observar un compilado de varios estudios referentes al efecto que tiene las altas concentraciones de cadmio en diferentes suelos y bajo distintos parámetros, como pH y humedad. Se obtuvieron resultados de inhibición en el crecimiento de biomasa microbiana presentando un decrecimiento superior al 20%. Dentro de este mismo estudio, se concreta que los valores de inhibición porcentual varían demasiado (1% - 98%) por el tipo de suelo, tipo de tratamiento utilizado y concentración de cadmio. Es importante recordar que la mayor parte de estudios realizados a nivel laboratorio, emplean multimetales por lo cual hay poca información referente a efectos individuales de cada uno de los metales que actúan como contaminantes. Fernández y otros (2010), en su estudio sobre los efectos de concentración de cobre y variante de pH en suelos sobre la estructura de comunidades, empleó cobre en concentraciones de 33 a 1120 mg/kilogramo de suelo y a pH de 4,3 a 7,3, en donde tuvo como resultado concluyente que el factor pH tiene mayor capacidad de modificación de la composición de las comunidades microbianas debido a la especiación que puede adquirir, tanto el cobre como otros elementos, dependiendo del pH que tenga el suelo.

Para continuar sustentando el criterio sobre los efectos de los metales pesados sobre la actividad de bacterias y hongos, se hace referencia al estudio presentado por Rajapaksha, Tobor-Kaplon y Baath (2004). En esta investigación, uno de los factores medibles más importantes fue el índice o ritmo de respiración de los microorganismos, dando como resultado un decrecimiento del 30% lo cual se traduce directamente en una disminución de la población microbiana. Además, se concluyó que, a diferencia de las bacterias, se notó un aumento en los hongos de 3

a 7 veces respecto a su actividad en el medio. Esto se alinea a lo establecido por el estudio realizado en 1989 por Baath, en el cual también se observó un incremento del 24% en población de hongos, resaltando que los hongos presentan mayor resistencia a los metales pesados.

Para reforzar lo planteado respecto a una mayor tolerancia por parte de los hongos, se hace referencia al estudio propuesto por Beltrán y Gómez (2016), en el cual se evalúan las diferentes formas por las cuales los hongos y bacterias actúan en contacto con metales pesados (Cd, Cr y Hg) con objetivo de biorremediación. Los hongos poseen grupos acetamidos de quitina, quitina, polisacáridos, grupos sulfhidrilos, entre otros compuestos, que se ven como fundamentales dentro de procesos de biosorción de metales pesados debido a su compatibilidad con estos. Estos compuestos evitan que los metales ingresen al citoplasma debido a que quedan en las paredes celulares de los hongos unen los iones de los metales o pueden rodearlos con polisacáridos, reduciendo así su tasa de afectación y mortalidad.

Una gran cantidad de estudios se centran en tolerancia y en cómo esta tolerancia puede ser traducida en procesos de biorremediación de suelos contaminados, razón por la cual, existen muchos limitantes respecto a cómo estos contaminantes pueden actuar en la dinámica poblacional de los microorganismos. A su vez, el uso de multimetales y condiciones específicas de laboratorio limitan el reconocimiento de los efectos específicos de cada metal en diferentes condiciones ambientales.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Con todo lo expuesto en este documento podemos hacer las siguientes conclusiones:

La gama de metales pesados derivados de la minería abarca a los siguientes metales: Pb, Hg, Cd, Cr y As, siendo los de mayor afectación para el ambiente y la biodiversidad edáfica el plomo y el mercurio por su mayor efecto a menor concentración y debido a su mayor uso en la industria. En la mayor parte de los estudios a nivel de campo y de laboratorio se utilizaron multimetales para los ensayos experimentales, razón por la cual existen varias limitantes respecto a los efectos específicos de cada uno de los metales pesados. Además, existe una limitante adicional respecto a los efectos que presenta la dinámica poblacional de los microorganismos, ya que esta depende directamente de las diferentes condiciones y parámetros del suelo afectado (humedad, pH, materia orgánica, etc.).

De manera general, los efectos que provocan los metales pesados sobre microorganismos edáficos se manifiestan a nivel de: cambios en la dinámica poblacional, cambios en la interacción de los microorganismos con los metales pesados a nivel extracelular, intracelular y en superficie, generación de procesos de bioacumulación y biomagnificación y, el surgimiento de mecanismos de resistencia y tolerancia.

Los efectos de los metales pesados se pueden explicar en términos de 3 procesos primordiales: cambios en estructura (densidad de las especies), alteraciones en la población (reducción de la abundancia de especies sensibles) y cambios en

biodiversidad (muerte de especies no tolerantes). Se observa una tolerancia mayor por parte de los hongos debido a la composición de estos (quitina y producción de polisacáridos), al contrario de bacterias, las cuales muestran un índice de mortalidad mucho mayor y una reducción en abundancia y diversidad. Como se evidenció en varios de los estudios de Baath (2004), existe una reducción del índice de respiración del 30% en bacterias, en contraste con un crecimiento del 24% en la población de hongos.

## **5.2. Recomendaciones**

El análisis de la información bibliográfica pone en evidencia la ausencia de estudios y de trabajos de remediación de metales pesados derivados de actividades mineras a gran escala a nivel nacional, razón por la que se recomienda la organización de amplios programas de investigación mediante alianzas público-privadas de empresas públicas, privadas con la academia.

Para un mejor desarrollo y entendimiento de la temática de efectos de los metales pesados derivados de actividades mineras sobre los microorganismos edáficos se recomienda ampliar este estudio, a escala de laboratorio, vía experimental para entender de primera mano cuales son o pueden ser los efectos sobre los diferentes microorganismos de diferentes metales niveles a distintas condiciones ambientales.

Realizar ensayos utilizando muestras de diferentes lugares del Ecuador debido a que cada zona, posee un diferente tipo de suelo, por ende, distinto tipo de biodiversidad microbiana, en consecuencia, los efectos serán distintos, aunque en términos generales sean los mismos. Además, proponer ensayos que no realicen el uso de multimetales, sino, que se pueda estudiar la variabilidad de metales específicos sobre las poblaciones y evaluar sus efectos.

En la mayor parte de las fuentes bibliográficas se hace referencia netamente a las especies que demuestran tolerancia a metales pesados, razón por la cual hay insuficientes estudios respecto a cómo se comporta la estructura poblacional de las comunidades microbianas frente a metales pesados, específicamente con relación a las tasas de muerte y reducción de poblaciones. Se hace necesario ampliar el análisis del estudio de la influencia de los metales pesados sobre la biodiversidad microbiana edáfica incluyendo otro tipo de contaminantes, generados por la minería y que están en forma simultánea presente en los suelos con el objetivo de entender como los otros contaminantes, influyen mediante fenómenos de sinergia, amplificación, e inhibición sobre la dinámica microbiana.

## 6. REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 51. [http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf)
- Agencia de regulación y control minero (2017). *El sector minero es el futuro del desarrollo económico para el país*. Obtenido de <http://www.controlminero.gob.ec/el-sector-minero-es-el-futuro-del-desarrollo-economico-para-el-pais/>
- Alcalá, J., Ávila, C., Rodríguez, J. C., Hernández, A., Beltrán, F. A., Rodríguez, H., & Loya, G. (2012). Metales pesados como indicador de impacto de un sistema ecológico fragmentado por usos de suelo, san luis potosí, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO*, 44(2), 15–29.
- Arredondo, R. J., Aguilar, M. J., & Noriega, B. (2016). Aislamiento y caracterización de microorganismos nativos de muestras de suelos contaminados con residuos mineros. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 522-526. Obtenido de <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1097/730>
- Asociación Geoinnova. (2016). *Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente*. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>
- Ayala, H. J., Diaz Muegue, L. C., Gómez -Fernández, S., González Rubio, H., Ipaz Cuastumal, S. N., Macías Gómez, L., Fernando, Madriñán Valderrama, L. F., Montoya Nuñez, C. E., Peña Ortiz, J. I., Pinto Martínez, E., Saldarriaga Isaza, C. A., Valencia Núñez, A. J., Valladares Salinas, R. Y., & Vasquez Ochoa, O. Y. (2019). Sentencia T 445 de agosto de 2016. *Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*, 368.

- Baath, E. (1989). Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations (a review). *water, air and soil pollution*, 2, 335–379.
- Baath, E., & Díaz-ravi, M. (2001). Response of soil bacterial communities pre-exposed to different metals and reinoculated in an unpolluted soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 241–248.
- Baath, E., Díaz-ravi, M., & Bakken, R. (2005). Microbial Biomass, Community Structure and Metal Tolerance of a Naturally Pb-Enriched Forest Soil. *Microbial Ecology*, 50, 496–505. <https://doi.org/10.1007/s00248-005-0008-3>
- Baker, B., Jerkins, D., Ory, J., Lowell, V., Hernandez, L., & Tecum, A. (2016). Interacción de la Microbiología del Suelo con la Agricultura Orgánica. *Organic Farming Research Foundation*, 8.
- Banco Central del Ecuador. (2018). *Reporte de minería, julio 2018*. 9–11.
- Banco Mundial (2013). *Minería: Resultados del sector*. Obtenido de <http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/14/mining-results-profile>
- Barcelo-quintal, I. D., Borja, M., Bussy, L., Gardezi, A. K., Cetina-alcalá, V. M., & Pérez, J. (2006). Absorción de cobre y características de *Leucaena leucocephala* Asociada con *Glomus* spp. y *Rhizobium* en suelo contaminado del Río Lerma, México. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 347–354.
- Barcos, M., Moína, E., Naranjo, J., & Oviedo, R. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/rb/2017.02.04.5>
- Bernal, G. (2015). LA MICROBIOLOGIA DE SUELOS EN EL ECUADOR : Situación actual de la investigación. *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, 1–12. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-La-Microbiologia-de-Suelos.pdf>
- Cano, D. I. (2018). Impacto social y ambiental asociado a la minería aurífera de

- subsistencia en Sabanalarga – Antioquia, 2017. *Universidad Nacional de Colombia*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63861#.XmFRjGD7nhY.mendeley>
- Capello, R., Donovarros, C., & Giono, S. (2000). La diversidad microbiana en México. *Bisdiversitas*, 32, 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.05.041>
- Cervantes, C., Espino, A., Acevedo, F., León, I., Rivera, M., Avila, M., y Moreno, R. (2006). Interacciones microbianas con metales pesados. *Revista latinoamericana de microbiología*, 48(2), 203-210.
- Chen, Y., Shen, X., Peng, H., Hu, H., Wang, W., y Zhang, X. (2015). *Comparative genomic analysis and phenazine production of Pseudomonas chlororaphis, a plant growth-promoting rhizobacterium*. *Genomics data*, 4, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.gdata.2015.01.006>
- Chaparro, L. (2015). *Drenajes Ácidos de Mina. Formación y Manejo*. ESAICA, 1, 53–57.
- Cisneros, P. (2016). Política minera y sociedad civil en América Latina. En *Institutos de Altos Estudios Nacionales* (Vol. 1, Número). Editorial IAEN. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CORDIS. (2015). *Functional redundancy of marine bacteria in biochemical cycles*. Obtenido de <https://cordis.europa.eu/article/id/151645-microorganisms-and-biogeochemical-processes/es>
- Cordero J., Guevara M., Morales, E. & Lodeiros, C. (2005) Efecto de metales pesados en el crecimiento de la microalga tropical *Tetraselmis chunii* (Prasinophyceae). *Revista de Biología Tropical*. 53(3), 325-330. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442005000200002](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442005000200002)
- Cornejo de la Torre, M. (2016). Biorremediación de relaves mineros con un consorcio microbiano nativo caracterizado molecularmente y productor de



enzimas degradadoras de cianuro y derivados. Universidad Nacional de Tumbes. Tesis de maestría. Obtenido de [http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/153/3/2016\\_Cornejo\\_Biorremediacion-relaves-mineros.pdf](http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/153/3/2016_Cornejo_Biorremediacion-relaves-mineros.pdf)

ELAW, A. M. de D. A. (2010). *Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. 132. [https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Guia para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros.pdf](https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Guia%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf)

Espín, D., Jarrín, J., & Escobar, O. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto río blanco. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, *II*(4), 1–12. <http://geo1.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2018/01/Art1.pdf>

Fernández, I. (2012). *Factores que afectan la movilidad del arsénico en ls suelos. Propuesta de protocolo de actuación para valorar la contaminación de suelos por arsénico*. 261.

Fernández, D., Martín, A., Arias-estévez, M., Bååth, E., & Díaz-ravi, M. (2010). Microbial community structure of vineyard soils with different pH and copper content. *Applied Soil Ecology*, *46*, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.001>

Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, *26*(SUPPL. 1), 141–153. <https://doi.org/10.4321/s1137-66272003000200008>

Forigua, D., Fonseca, N., & Vasquez, Y. (2017). Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *XIX*(1), 92–100.

Friess, S., & Brotz, H. (2011). La Minería en los Países en Desarrollo. Desafíos y Propuestas de Acción. *Misereor*, 42.

Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, *10*, 48–60.

- Gaona, X. (2004). El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. *Universitat Autònoma de Barcelona*, 246. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10803/3174>
- García, C., Moreno, J., Hernández, M., & Polo, A. (2020). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125-138.
- García, D. (2006). Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *Zea mays* L. expuestas a la toxicidad por plomo. *Universidad Autònoma de Barcelona*, 129.
- García, E., & Azcona, M. I. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199–205. <https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>
- García, I. E. (2011). Microorganismos del suelo y sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista Argentina de Microbiología*, 43(1), 1–3. [https://doi.org/10.1016/S0924-9338\(13\)76708-7](https://doi.org/10.1016/S0924-9338(13)76708-7)
- Giraldo, D. (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a minería aurífera a cielo abierto, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Gómez, S., Gutiérrez, D., Hernández, A., y Hernández, C. (2008). Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. *Researchgate*, 6, 101-2012. <https://doi.org/10.22490/24629448.398>
- González, I., López, M., & Romero, A. (2008). Problemática de lo suelos Afectados por la Explosión de Sulfuros. *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 10(10), 61–75. [http://www.ehu.es/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_61.pdf](http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_61.pdf)
- González, M., Bodas, A., Rubio, M. Án., Martell, N., Trasobares, E. M., Ordóñez, J.

M., Guillén, J. J., Herráiz, M. Án., García, J. A., Farré, R., Calvo, E., Martínez-Álvarez, J. R., Llorente-Ballesteros, M. T., Sáinz-Martín, M., Martínez-Astorquiza, T., Martínez-García, M. J., Lesmes, I. B., Cuadrado-Cenzual, M. Án., Prieto-Menchero, S., ... Calle-Pascual, A. (2014). Efectos sobre la salud del metilmercurio en niños y adultos; estudios nacionales e internacionales. *Nutricion Hospitalaria*, 30(5), 989–1007. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.5.7728>

Grassi, D. (2015). *Interacción de metales pesados con diferentes matrices orgánicas*. 268.

Guzmán, S. (2017). Los microbios y la ecología. *Ciencia*, 68(2), 50–59. [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68\\_2/PDF/MicrobiosEcologia.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68_2/PDF/MicrobiosEcologia.pdf)

Hazin, M. S. (2013). Desarrollo minero y conflictos socioambientales. *Macroeconomía del Desarrollo*, 137, 58. <http://www.cepal.org/es/publicaciones/5369-desarrollo-minero-conflictos-socioambientales-casos-colombia-mexico-peru>

Hernandez, J. (2011). *Efectos de la minería en el agua*. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/00069423641ac3cafd97b>

Hernández, N., Ulloa, M., Almaguer, Y., & Ferrer, Y. (2014). Evaluación Ambiental Asociada a La Explotación Del Yacimiento De Materiales De Construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba. *Luna Azul*, 38, 146–158. <https://doi.org/10.17151/luaz.2014.38.9>

Higueras, P., & Oyarzun, R. (s.f.). *Universidad de Castilla-La Mancha*. Obtenido de [https://previa.uclm.es/\\_users/higueras/MAM/MMAM5.htm#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20en%20su%20conjunto,van%20a%20parar%20al%20suelo.&text=Al%20llegar%20estos%20%C3%A1cidos%20al,vegetaci%C3%B3n%20infiltr%C3%A1ndose%20en%20el%20suelo](https://previa.uclm.es/_users/higueras/MAM/MMAM5.htm#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20en%20su%20conjunto,van%20a%20parar%20al%20suelo.&text=Al%20llegar%20estos%20%C3%A1cidos%20al,vegetaci%C3%B3n%20infiltr%C3%A1ndose%20en%20el%20suelo).

- Higueras, P., Oyarzun, R., & Maturana, H. (s.f.). *Universidad Castilla-La Mancha*.  
Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.  
(2015). *Análisis Microbiológico De Suelos Segunda Edición*.  
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1820.PDF>
- Instituto Nacional de Salud (INS) . (2012). Biomédica Instituto Nacional de Salud.  
*Revista Biomédica*, 3, 2004–2006
- Jara, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014).  
Capacidad Fitorremediadora De 5 Sp Altoandinas En Suelos Contaminados  
con metales pesados. *Revista peruana de biología*, 21(October), 145–155.
- Jara, E., Montoya, H., Sanchez, T., Tapia, L., Cano, N., & Dextre, A. (2017).  
Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. ex  
Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae) evaluadas en  
cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*, 24(2), 583–598.  
<https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210>
- La Rotta, Á., & Torres, M. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y  
en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde em Debate*, 41(112), 77–91.  
<https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>
- Labra, D., Guerrero, L., Rodríguez, A., Montes, S., Pérez, S., & Rodríguez, A.  
(2012). Respuesta de crecimiento y tolerancia a metales pesados de *Cyperus*  
*elegans* y *Echinochloa polystachya* inoculadas con una rizobacteria aislada de  
un suelo contaminado con hidrocarburos derivados del petróleo. *Plant*  
*Physiology*, 28(1), 7–16.
- Lillo, J. (2008). Impactos de la minería en el medio natural. *Grupo de estudios en*  
*minería y medioambiente*, 1–38.  
[https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos de la minería -  
Javier Lillo.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf)
- Lominchar, M. A., Sierra, M. J., Rodríguez, J., & Millán, R. (2010). Estudio del

Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdezogues. *Informes Técnico Ciemat*, 1215, 51.

Londoño, L. F., Londoño, P. T., & Muñoz, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)

Marrero, J., Díaz, A., y Coto, O. (2010). Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41(1),67-78. ISSN: 0253-5688. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1812/181221644010>

Millan, P. (2016). *Papel de los microorganismos en los ciclos biogeoquímicos*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/125193680/Papel-de-Los-Microorganismos-en-Los-Ciclos-Biogeoquimicos>

Ministerio de Economía y Finanzas. (2019). Obtenido de <https://www.finanzas.gob.ec/usd-3-800-millones-de-inversion-minera-hasta-2021-daran-mas-prosperidad-al-ecuador/>

Ministerio de Minería del Ecuador. (2016). *Plan nacional de desarrollo del sector minero*. 1–308. <http://www.mineria.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo-del-sector-minero/>

Ministerio de Minería del Ecuador. (2017). Obtenido de <http://historico.mineria.gob.ec/el-sector-minero-es-un-eje-central-de-la-economia-del-ecuador/>

Molina, M., Medina, M., & Mahecha, L. (2008). Microorganismos y micronutrientes en el crecimiento y desarrollo del Aliso (*Alnus acuminata* HBK) en un sistema silvopastoril alto andino. *Livestock Research for Rural Development*, 20(4).

Recuperado el 22 de junio de 2020 de <http://lrrd.cipav.org.co/lrrd20/4/moli20054.htm>

Moraga, R., Merino, C., & Mondaca, M. A. (2003). Resistencia a metales pesados en bacterias aisladas de la bahía de Iquique. *Invest. Mar., Valparaíso*, 31(1), 91–95. <https://doi.org/10.4067/S0717-71782003000100010>

Muñoz-Silva, L., Olivera-Gonzales, P., Santillán-Torres, M., & Tamariz-Angeles, C. (2019). Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú). *Revista peruana de Biología*, 26(1), 109–118. <https://doi.org/10.15381/rpb.v26i1.15914>

Navas, M., Pérez, J., Prieto, M., Rodríguez, A., Masaguer, A., y Ana, M. (2018) Diversidad bacteriana en suelos de zonas contaminadas y no contaminadas de una mina de cobre. *Researchgate*. Recuperado el 19 de junio de 2020 de [https://www.researchgate.net/profile/Ana\\_Moliner/publication/325271216\\_Bacterial\\_diversity\\_in\\_soils\\_from\\_contaminated\\_and\\_uncontaminated\\_areas\\_of\\_a\\_copper\\_mine/links/5b02eeb94585154aeb07096e/Bacterial-diversity-in-soils-from-contaminated-and-uncontaminated-areas-of-a-copper-mine.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ana_Moliner/publication/325271216_Bacterial_diversity_in_soils_from_contaminated_and_uncontaminated_areas_of_a_copper_mine/links/5b02eeb94585154aeb07096e/Bacterial-diversity-in-soils-from-contaminated-and-uncontaminated-areas-of-a-copper-mine.pdf)

OCMAL. (2015). *Conflictos mineros en América Latina. Extracción, saqueo y agresión*. 101.

Ordoñez Ramirez, V. (2014). Contaminación del agua. *Ingenius*, 1, 124. <https://doi.org/10.17163/ings.n1.2007.04>

Paredes, J. (2015). Assessment of the applicability of phytoremediation in mining tailings using forest species of the peruvian highland. *ECIPerú*, 11(2), 42–46. <http://encuentrocientificointernacional.org/revista/eci2015vrevista/08ambiental/esparedesucsmprefinal.pdf>

Pineda, B., & Gómez, M. (2016). Biorremediación de Metales Pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Mercurio (Hg), Mecanismos Bioquímicos e Ingeniería Genética: Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197.

<https://doi.org/10.18359/RFCB.2027>

Piña, B., & Silva, K. (2016). Residuos mineros , qué son y posibilidades de valorización Residuos Mineros. *Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela.*, June, 14. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3481.0489>

Poma, P. A. (2008). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de la Facultad de Medicina*, 69(2), 120–126.

PNUMA, (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2017). *Seguimiento del Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. 3. <https://observatoriop10.cepal.org/sites/default/files/documents/treaties/minamata-convention-booklet-sp-full.pdf>

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, 5((1-2)), 149–155.

Rábago, I. (2011). *Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en los suelos de la comunidad de Madrid*.

Rajapaksha, R., Bååth, E., & Tobor, M. (2004). Metal Toxicity Affects Fungal and Bacterial Activities in Soil Differently Metal Toxicity Affects Fungal and Bacterial Activities in Soil Differently. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(5), 2966–2973. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.5.2966>

Ramírez, A. V. (2008). Intoxicación ocupacional por mercurio. *Anales de la Facultad de Medicina*, 69(1), 46. <https://doi.org/10.15381/anales.v69i1.1184>

Ramírez, L., Guerra, S., & Reinoso, G. (2016). Evaluación in vitro de la capacidad bacteriana para remover plomo en aguas residuales sintéticas. *FIGEMPA*, 1(6), 107–114.

- Revilla, C. (2018). *Preocupados: contaminación del agua a causa de la minería*.  
Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/carlos-revilla-calcina/preocupados>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 12.  
<https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Rimarachin, P., & Huaranga, F. (2015). Tratamiento de aguas de efluentes minero – metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales. *Sciéndo*, 18(2), 20–29.
- Rodríguez, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. En *Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura FAO*. <http://www.mineria.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo-del-sector-minero/>
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 075. <https://doi.org/10.15381/idata.v13i2.6193>
- Sánchez, F., & Lardé, J. (2006). Minería y competitividad internacional en América Latina. En *CEPAL - SERIE Recursos naturales e infraestructura* (Número 109).  
[https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6304/S0600325\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6304/S0600325_es.pdf)
- Sánchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. *Universidad Complutense*, 23.  
[http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA\\_SANCHEZ\\_BARRON.pdf](http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf)
- Sánchez, L., Espinosa, M., & Eguiguren, M. (2016). Percepción de conflictos socio-ambientales en zonas mineras : El Caso Del Proyecto Mirador En Ecuador. *Scielo* , *Ambiente & Sociedade*, 19, 22.  
[http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n2/es\\_1809-4422-asoc-19-02-00023.pdf](http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n2/es_1809-4422-asoc-19-02-00023.pdf)
- Soria, J. (2016). Los Residuos Urbanos y asimilables. *Los residuos mineros*, 460–



492. <http://www.lতিরajala.org/sites/default/files/Manual didáctico para trabajar los residuos.pdf>
- Suárez, P., & Reyes, R. (2002). La incorporación de metales pesados en las bacterias y su importancia para el ambiente. *Interciencia*, 27(4), 160-164.
- Tábora Sarmiento, S. D. (2017). *Efecto del Cobre y Zinc en la Comunidad Microbiana del Río Arkansas, Leadville, Colorado, Estados Unidos*. 4–44. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5977/1/IAD-2017-043.pdf%0A>
- Tejada, C., Villabona, Á., & Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109–203. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Terrel, P. (2019). Tecnologías Para La Recuperación De Agua Contaminada Con Metales Pesados: Plomo, Cadmio, Mercurio Y Arsénico. *Instituto Nacional de Salud, Perú.*, 64.
- Vargas, L. (2017). Evaluación de indicadores mmicrobiológicos en suelos de un área impactada por la minería del oro, en el municipio de Santa Isabel- Tolima. Universidad de Tolima. Tesis de grado. Recuperado el 19 de junio de 2020 de <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/2693/1/T%200701%20469%20CD6143.pdf>
- Weinberg, J. (2005). Introducción a la Contaminación las ONG. *Annual Review of Plant Biology*, 42(1), 665–700. <https://doi.org/10.17226/9899>
- Zarate, C. (2013). Determinación de los efectos de tres tipos de contaminantes y el tiempo en la población microbiana de suelos agrícolas Chupaca - Junín. *Universidad Alas Peruanas*. Obtenido de <http://repositorio.uap.edu.pe/handle/uap/3077>

