



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Tratamiento de aguas de drenaje minero utilizando zeolita como
absorbente de metales pesados”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN MINAS

Autoras:

ARIANNA PAULETH FREIRE MATAMOROS.

ERIKA MARIBEL LOJA BARRIONUEVO.

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2024

Arianna Pauleth Freire Matamoros

Erika Maribel Loja Barrionuevo

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Junio, 2024

**“Tratamiento de aguas de drenaje minero utilizando zeolita como
absorbente de metales pesados”**

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo a lo largo de mi vida y carrera. A mi madre, Ilda por su inspiración, sacrificio y aliento, y a mis hermanos, Edgar, Mayra, Cristina y Jairo, por sus palabras de ánimo y sonrisas en los momentos difíciles.

También reconozco el invaluable aporte de mis docentes, cuya dedicación y orientación han enriquecido mi aprendizaje y moldeado mi pensamiento.

No puedo dejar de mencionar a mis mejores amigos, Ariana, Juan Pablo y Sofía, quienes han compartido momentos llenos de emociones e influenciado mi vida y en quien soy ahora; Ariana, Juan Pablo y Sofía que la vida y nuestros caminos siempre se encuentre.

A todos ustedes, les estoy profundamente agradecida por su apoyo y amor. Este logro no habría sido posible sin ustedes. ¡Gracias!

Erika Loja B.

Este trabajo está dedicado con todo mi amor y gratitud a mi familia, cuyos sacrificios y apoyo incondicional han sido la base de todos mis logros, y a mis angelitos del cielo, quienes sin duda nunca dejaron de cuidarme. A ustedes, cuya presencia siento en cada paso y en cada susurro del viento, les dedico este logro con todo mi amor. Aunque no estén físicamente aquí, su amor y protección me han acompañado siempre, dándome la fuerza para continuar

A mis padres, Marianita y Polibio, mis más profundos agradecimientos. Ustedes han sido mis pilares, mis guías y mis héroes. Con su amor, esfuerzo y dedicación, me han dado la

fuerza para alcanzar mis sueños. Cada paso en este camino lo he dado con la certeza de su respaldo inquebrantable.

A mis hermanos, Carlos Alberto, Yadiel, y Ezequiel, gracias por ser mis compañeros de vida y por sus constantes palabras de aliento. Sus risas, consejos y compañía han sido el refugio en los momentos difíciles y la motivación para seguir adelante, a mi querido abuelito tenerte a mi lado es una bendición inmensa y este logro es también es tuyo.

A mi hermana Marelis, te agradezco profundamente por tu ayuda constante y por nunca dejarme sola, por apoyarme como una segunda madre para mí. Tu presencia ha sido un mi luz y seguridad. Gracias por ser esa persona en quien siempre puedo confiar y por estar a mi lado en cada paso de este camino.

A mis mejores amigos Erika, Sofia y Juanpa les agradezco a Dios por haberme puesto personas como ustedes en mi camino. Ustedes no son solo amigos, sino mis hermanos que la vida me ha regalado. Gracias por todo el amor incondicional, por ser ese apoyo inquebrantable en los momentos más difíciles y por compartir conmigo las alegrías y las tristezas.

No puedo dejar de lado a mi otra familia, la que he formado a lo largo de este viaje, mi familia del trabajo. Este logro también lo comparto con ustedes, quienes han sido mi refugio, mi apoyo constante y mi segunda familia, por haber compartido cada uno de mis logros y por estar siempre para mí.

A mis queridos docentes está dedicado a ustedes, quienes han sido faros de conocimiento y guías en mi camino académico. Su pasión por enseñar y su dedicación han dejado una marca profunda en mi formación profesional y personal.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este viaje y por su contribución a este gran logro académico. Sin su apoyo y dedicación, este camino habría sido mucho más difícil de recorrer

Arianna Freire M.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre Ilda por ser la fuente infinita de inspiración y todo el apoyo que recibo de ella, ha sido mi pilar fundamental juntos con mis entrañables hermanos su apoyo incondicional comprensión y aliento constante han sido la luz que ha iluminado cada paso de este viaje académico.

A mi gran amiga, mi compañera de tesis, mi hermana, Ariana, le agradezco de todo corazón su colaboración y esfuerzo juntas hemos superado obstáculos y alcanzado logros significativos, y por eso estoy eternamente agradecida.

Mi más profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, el ingeniero Patricio Feijoo. Su sabiduría, orientación y compromiso han sido esenciales para este trabajo, enriqueciendo tanto mi investigación como mi crecimiento personal y profesional.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este viaje y por su inestimable contribución a este logro académico. Sin su apoyo y dedicación, este camino habría sido mucho más difícil de recorrer.

Erika Loja B.

Primero que nada, agradecerle a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo en este camino.

A mis padres, Marianita y Polivio, les agradezco desde lo más profundo de mi corazón por su amor inquebrantable y su esfuerzo constante, a pesar de la distancia, para ayudarme en todo lo que necesitaba, a ustedes les dedico este trabajo con todo mi corazón, en reconocimiento a su

amor infinito y a la guía que me han brindado a lo largo de mi vida. Gracias por ser mis pilares fundamentales y por creer en mí siempre.

A mis hermanos, por ser siempre esa luz y alegría en mi vida, gracias por sus consejos y enseñanzas que han sido fundamentales en mi crecimiento personal y académico, que sin duda alguna estuvieron presentes siempre en mi vida.

A mi querida compañera de tesis, sin duda alguna la mejor compañía, Erika, te has convertido en mi hermana en este camino que la vida y Dios nos puso. Gracias por esa dedicación tan grande que sin duda fueron parte fundamental de este logro. Espero que sigamos llegando lejos juntas, y siempre celebrando nuestros logros.

A nuestro querido y apreciado tutor, Ingeniero Patricio Feijoo, gracias por habernos orientado y guiado en este camino. Su sabiduría, orientación y compromiso inquebrantable han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Sus valiosos consejos y su guía constante han enriquecido no solo nuestra investigación, sino también nuestro crecimiento personal y profesional.

Arianna Freire M.

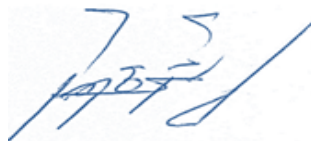
RESUMEN

El propósito principal de este estudio fue evaluar la eficacia de la zeolita como absorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales provenientes del drenaje minero en la concesión PAPAGRANDE, ubicada en la provincia de Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez. La investigación se centró en la remoción, específicamente arsénico, plomo y zinc, presentes en el agua contaminada de la mina.

Se realizaron un total de 8 ensayos, divididos en dos grupos. En el primer grupo, se utilizaron 4 muestras con una base de zeolita y una capa superior de arena. La cantidad de zeolita varió de 50 g a 200 g con incrementos de 50 g en cada muestra. La cantidad de arena se mantuvo constante en 200 g en todas las muestras. En el segundo grupo de ensayos, se aplicaron las mismas cantidades de zeolita, pero con una disposición inversa, la zeolita se colocó en la parte superior y la arena en la inferior.

Se buscó verificar la efectividad de la zeolita en la remoción de metales pesados contenidos en el agua y encontrar una solución viable para el destino del agua tratada, promoviendo su reutilización de manera responsable. La comparación de los niveles de metales antes y después del tratamiento permitió evaluar la eficacia del proceso, proporcionando datos cruciales para la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras.

Palabras clave: Zeolita, arena, arsénico, plomo, zinc, aguas residuales mineras, metales pesados.



Ing Patricio Feijoo Calle.
Director de tesis.

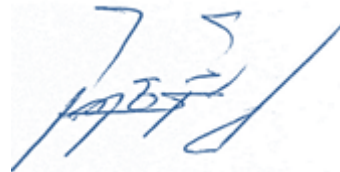
ABSTRACT

The main purpose of this study was to evaluate the effectiveness of zeolite as an absorbent of heavy metals in the treatment of wastewater from mining drainage in the PAPAGRANDE concession, located in the province of Azuay, Camilo Ponce Enríquez canton. The investigation focused on the removal, specifically arsenic, lead and zinc, present in the contaminated water from the mine.

A total of 8 trials were carried out, divided into two groups. In the first group, 4 samples with a zeolite base and a top layer of sand were used. The amount of zeolite varied from 50 g to 200 g with increments of 50 g in each sample. The amount of sand was kept constant at 200 g in all samples. In the second group of tests, the same amounts of zeolite were applied, but with a reverse arrangement, the zeolite was placed on top and the sand on the bottom.

The aim was to verify the effectiveness of zeolite in the removal of heavy metals contained in water and to find a viable solution for the destination of the treated water, promoting its reuse in a responsible manner. The comparison of metal levels before and after treatment allowed the effectiveness of the process to be evaluated, providing crucial data for the optimization of mining wastewater treatment systems.

Keywords: Zeolite, sand, arsenic, lead, zinc, mining wastewater, heavy metals.



Ing. Patricio Feijoo Calle.
Thesis Director.

Tabla de contenidos

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO | v |
| RESUMEN | vii |
| ABSTRACT..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xii |
| ÍNDICE DE ANEXOS | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1..... | 3 |
| MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1 Aspectos generales | 3 |
| 1.1.1 Antecedentes | 3 |
| 1.1.2 Geología local..... | 3 |
| 1.2 Marco Teórico | 5 |
| 1.2.1 Metales pesados..... | 5 |
| 1.2.2 Revisión de Investigaciones previas sobre la Eficacia de la Zeolita | 6 |
| 1.2.3 Aguas residuales mineras | 7 |
| 1.2.4 Contaminantes presentes en las aguas residuales mineras | 7 |
| 1.2.5 Identificación y evaluación de: Arsénico, Plomo, y Zinc como principales contaminantes..... | 8 |
| 1.2.6 Tratamiento de metales pesados..... | 9 |
| 1.2.7 Procesos físicos | 10 |
| 1.2.8 Procesos químicos | 11 |
| 1.2.9 Procesos biológicos | 11 |
| 1.2.10 Técnicas de tratamiento de metales pesados | 11 |
| 1.2.11 Técnicas convencionales de tratamiento de metales pesados | 12 |
| 1.2.12 Filtración por membrana | 12 |

| | | |
|--|--|----|
| 1.2.13 | Electrodialisis | 12 |
| 1.2.14 | Osmosis inversa..... | 12 |
| 1.2.15 | Intercambio iónico..... | 13 |
| 1.2.16 | Adsorción | 13 |
| 1.2.17 | Carbón activado..... | 13 |
| 1.2.18 | Flotación | 14 |
| 1.2.19 | Técnicas no convencionales de tratamiento de metales pesados | 14 |
| 1.2.20 | Propiedades de la Zeolita | 15 |
| 1.2.21 | Porosidad | 15 |
| 1.2.22 | Adsorción | 16 |
| 1.2.23 | Intercambio iónico..... | 17 |
| 1.2.24 | Capacidad de regeneración..... | 17 |
| 1.2.25 | Mecanismos de absorción | 18 |
| 1.2.26 | Propiedades de la arena | 18 |
| CAPÍTULO 2..... | | 19 |
| METODOLOGÍA Y ENSAYO EXPERIMENTAL | | 19 |
| 2.1 | Metodología empleada..... | 19 |
| 2.2 | Obtención de muestras | 20 |
| 2.3 | Dispositivos y materiales | 21 |
| 2.3 | Dispositivo de clasificación | 22 |
| 2.4 | Dispositivos complementarios | 22 |
| 2.5 | Ensayos de laboratorio | 23 |
| 2.6 | Densidad del material | 24 |
| 2.7 | Descripción de procedimientos..... | 25 |
| CAPÍTULO 3..... | | 31 |
| ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS | | 31 |
| 3.1 | Resultados Conseguídos | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.2 Resultados de análisis de concentración | 31 |
| CONCLUSIONES | 35 |
| RECOMENDACIONES | 36 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS | 37 |
| ANEXOS | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Mapa geológico de Camilo Ponce Enríquez</i> | 4 |
| Figura 2. <i>Tipos de los tratamientos y tecnologías más apropiadas</i> | 10 |
| Figura 3. <i>Análisis de niveles de arsénico, plomo y zinc en las 8 muestras.</i> | 23 |
| Figura 4. <i>Tamizador de material.</i> | 25 |
| Figura 5. <i>Separación de muestras para filtros de agua</i> | 26 |
| Figura 6. <i>Pesaje de material (arena) para filtros de agua</i> | 27 |
| Figura 7. <i>Pesaje del mineral (zeolita) para filtros de agua</i> | 28 |
| Figura 8. <i>Agua de drenaje minero</i> | 28 |
| Figura 9. <i>Preparación de filtros con arena y zeolita</i> | 29 |
| Figura 10. <i>Resultados de porcentaje en la remoción de plomo</i> | 32 |
| Figura 11. <i>Resultados de porcentaje en la remoción de zinc</i> | 32 |
| Figura 12. <i>Resultados de porcentaje en la remoción de arsénico.</i> | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Límites de metales pesados en el agua para el consumo humano</i> | 5 |
| Tabla 2. <i>Porcentajes de metales en la muestra inicial de agua de drenaje minero</i> | 19 |
| Tabla 3. <i>Análisis de cabeza de concentraciones de metales pesados.</i> | 31 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. <i>Tamizador Humboldt laboratorio de minas</i> | 41 |
| Anexo 2 <i>Preparación de la arena para filtros</i> | 41 |
| Anexo 3. <i>Preparación de la zeolita para filtros</i> | 42 |
| Anexo 4 <i>Elaboración de filtros de zeolita y arena</i> | 42 |

| | |
|---|----|
| Anexo 5. Filtros A1-A4 con zeolita en la parte superior..... | 43 |
| Anexo 6. Filtros B1-B4 con zeolita en la parte inferior | 43 |
| Anexo 7. Recolección de muestras post tratamiento..... | 44 |

INTRODUCCIÓN

La actividad minera es fundamental para el desarrollo económico, ha sido acompañada por desafíos ambientales significativos, siendo uno de los más apremiantes el manejo de aguas de drenaje contaminadas con metales pesados. Estas aguas no solo representan una amenaza para los ecosistemas acuáticos, sino que también plantean riesgos potenciales para la salud humana y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la presente investigación se sumerge en la exploración de un enfoque innovador y sostenible para mitigar y encontrar un método eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas de drenaje minero y con ellos reducir los impactos asociados, existen métodos convencionales con costos elevados y un gran consumo de energía que no son totalmente efectivos para la eliminación o disminución de contaminantes específicos.

En la concesión minera “PAPAGRANDE; Cód.: 26” tras la extracción del mineral aurífero se generan aguas de drenaje ácido de mina (ADAM) o aguas ácidas de mina (AMD), son generadas como resultado de la interacción del agua con minerales sulfurados presentes en los depósitos de mineral y contienen concentraciones de metales pesados como principales para el proyecto Plomo, Zinc, Arsénico; adicionales en el análisis de agua de la concesión son Antimonio, Cobre y Cadmio etc.

Es relevante señalar que el arsénico, como elemento químico, experimenta interacciones complejas en entornos acuosos. Sus formas predominantes en soluciones acuosas son el arsenito y el arsenato, siendo el arsenito el compuesto más perjudicial debido a sus propiedades que facilitan una mayor movilidad (Feijoo & Luna, 2024, p.39).

El plomo (Pb) es un contaminante ambiental extremadamente tóxico, y su existencia en el entorno se origina principalmente por actividades humanas como la industria, la minería y la

fundición. En suelos afectados por la contaminación de plomo, es común encontrar también presencia de cadmio (Cd) y zinc (Zn) (Prieto et al., 2009, p.31).

El zinc en altas concentraciones puede tener efectos en organismos acuáticos acumulando zinc en sus tejidos a través del tiempo afectar negativamente a otros organismos consumidores, además pueden contribuir a la reducción de la biodiversidad en los ecosistemas acuáticos, ya que algunos organismos pueden ser más sensibles o intolerantes a la presencia de este metal y el consumo de agua contaminada con niveles elevados de zinc puede causar problemas gastrointestinales y otros efectos adversos para la salud.

La zeolita surge como un candidato prometedor en la remoción de metales pesados, destacando que en los últimos años, se ha comprobado que la zeolita es capaz de eliminar eficientemente metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), níquel (Ni) y arsénico (As) (Abin et al., 2019); debido a esto su aplicación se considera como una opción alternativa y sustitutiva a adsorbentes más costosos, tales como el carbón activado, y a otros métodos o procesos de adsorción de metales como la ósmosis inversa, entre otros.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Aspectos generales

1.1.1 Antecedentes

Las muestras fueron tomadas de la concesión minera PAPAGRANDE se encuentra en un régimen de pequeña minería subterránea ubicada en la ciudad de Camilo Ponce Enríquez, en la provincia de Azuay, Ecuador con código catastral 26. Esta concesión se dedica a la extracción de oro como mineral principal. El oro es un metal precioso altamente valorado por su belleza y su uso en la industria y la joyería. La minería subterránea es un método utilizado para acceder a los depósitos de oro que se encuentran debajo de la superficie de la tierra.

Además, es fundamental destacar que la concesión minera cuenta con una significativa relevancia legal, ya que ha sido otorgada por el Estado Ecuatoriano bajo el régimen especial de pequeña minería. Bajo esta clasificación, se permite la realización de labores simultáneas de exploración y explotación de recursos minerales. Este reconocimiento legal subraya la conformidad de la concesión con las disposiciones establecidas por las autoridades gubernamentales, estableciendo así un fundamento sólido para sus actividades mineras dentro del marco legal ecuatoriano.

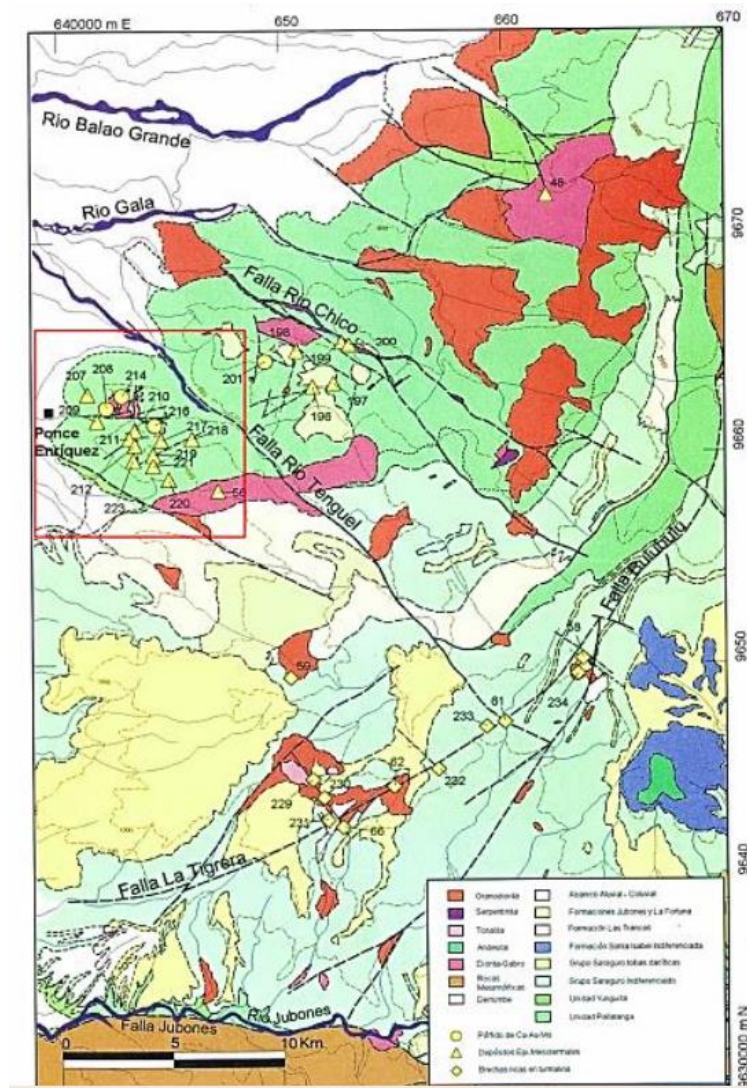
1.1.2 Geología local

Geomorfológicamente la región se encuentra en el flanco Oeste de la cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, que se caracteriza por presentar relieves muy fuertes y

disecados, con drenajes detríticos y subparalelos a la zona de piedemonte, con relieves planos o ligeramente ondulados relacionados con los depósitos secundarios. (Veloz, 2020).

La concesión PAPAGRANDE está compuesta por una combinación de rocas ofiolíticas, que incluyen: basaltos, hialoclastitas, sedimentos pelágicos. Intrusivos, junto con rocas ultramáficas. También contiene cuerpos intrusivos dacíticos-riodacitos, con restos de tobas dacíticas del grupo Saraguro.

Figura 1. Mapa geológico de Camilo Ponce Enríquez



Fuente: (Veloz, 2020).

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Metales pesados

Los metales pesados comprenden una serie de elementos químicos caracterizados por su elevada densidad. Destacan entre ellos con mayor probabilidad de aparecer en el agua subterránea el mercurio, el níquel, el cobre, el plomo y el cromo.

Los metales pesados son, en general, tóxicos para los seres humanos, y además su característica de ser bioacumulativos (no pueden ser eliminados por el cuerpo) provoca que las concentraciones permitidas en el agua de consumo humano por la legislación vigente (RD 140/03) sean muy pequeñas (FACSA, 2017).

Límites establecidos en el agua de consumo humano para los principales metales pesados:

Tabla 1. Límites de metales pesados en el agua para el consumo humano

| Metal | Cantidad |
|--------------|-------------------|
| Mercurio | 1 microgramos/ l |
| Níquel | 20 microgramos/ l |
| Cobre | 2 microgramos/ l |
| Plomo | 25 microgramos/ l |
| Cromo | 50 microgramos/ l |

Fuente: Elaboración propia.

Dos de los más peligrosos son el arsénico y el cadmio los cuales se han encontrado en ubicaciones similares, a pesar de ser ideológicamente incompatibles. Se ha confirmado que las

actividades antropogénicas han logrado posicionar estos dos metales pesados en ubicaciones geológicas cercanas (Wang & Mulligan, 2006).

Dentro del área de investigación, se destacan el arsénico, plomo y zinc como los metales pesados principales presentes en el agua de drenaje minero, y serán objeto de análisis en este estudio.

1.2.2 Revisión de Investigaciones previas sobre la Eficacia de la Zeolita

La zeolita es ampliamente utilizada como adsorbente de metales pesados debido a sus propiedades únicas. La zeolita tiene la capacidad de absorber los contaminantes, como los metales pesados, en el agua, se ha demostrado que la zeolita tiene una mayor eficiencia de absorción de metales pesados, como el mercurio y el plomo (Hurtado Toaylla, 2019). Además, la zeolita actúa como agente quelante contra los metales pesados, lo que quiere decir que puede unirse a los metales pesados y eliminarlos debido a sus propiedades absorbentes.

En una investigación llevada a cabo por, (Wang & Peng, 2010), se demostró que ciertas zeolitas poseen la capacidad de eliminar metales pesados. En este estudio, se emplearon zeolitas tratadas con recubrimientos de óxido de hierro y óxido de manganeso, obtenidos a partir de sales de FeCl_3 y MnSO_4 , respectivamente. Los resultados revelaron que la presencia de estas capas en la zeolita favorece el proceso de absorción de hierro y manganeso. Esto sugiere que el tratamiento químico de la zeolita puede mejorar su efectividad en la remoción de contaminantes metálicos.

Entre otras investigaciones que demuestran que la zeolita natural tiene la capacidad de remover el plomo, cobre y cadmio mediante la modificación de variables que afectan el

proceso de adsorción (Elboughdiri, 2020). Aunque la zeolita natural muestra una afinidad positiva hacia diversos elementos, se ha observado un enfoque predominante en la aplicación de tratamientos químicos para potenciar su eficacia en la remoción de contaminantes.

1.2.3 Aguas residuales mineras

Las aguas residuales mineras son las aguas que resultan de las actividades mineras y que contienen diversos contaminantes, como metales pesados, ácidos y productos químicos. Estas aguas pueden ser altamente contaminantes y representar un riesgo para el medio ambiente y la salud humana si no se gestionan adecuadamente. (Spena Group, 2016).

Según, (Spena Group, 2016), el tratamiento de estas aguas es fundamental para mitigar el impacto ambiental de la actividad minera al garantizar que las aguas residuales se manejen de manera segura y responsable, produciendo efluentes que no representen riesgos para la salud humana ni para los ecosistemas acuáticos.

1.2.4 Contaminantes presentes en las aguas residuales mineras

En la industria minera a nivel mundial y por ende en nuestro país se generan efluentes los cuales provienen de procesos químicos; principalmente del proceso de Cianuración, esto se debe a que este método es el más utilizado en nuestro medio para sacar el oro de los lodos extraídos de las minas en este proceso se genera aguas residuales con contenido de cianuro, sulfuros, y metales que están presentes en los mismos dependiendo del lugar de donde sean extraídos siendo los más comunes: Arsénico (As), Cobre (Cu), Plata (Ag), y Plomo (Pb). (Pesántes V, 2014).

La liberación de estos metales en el entorno puede ser resultado de las operaciones mineras, planteando riesgos tanto para la salud humana como para los ecosistemas acuáticos. Estos metales pesados pueden introducirse en las aguas de drenaje minero, como consecuencia de las actividades mineras y su liberación, sin una aplicación adecuada puede generar efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Por lo tanto, es necesario implementar medidas efectivas de control y tratamiento para minimizar la contaminación de las aguas residuales mineras y preservar la salud de los ecosistemas acuáticos.

1.2.5 Identificación y evaluación de: Arsénico, Plomo, y Zinc como principales contaminantes.

Arsénico

El arsénico es un metaloide que tiene el símbolo As y es el elemento número 33 en la tabla periódica. A pesar de ser un metaloide entra en la categoría de metal pesado debido a su densidad atómica. Se encuentra en aguas naturales en 4 estados oxidativos: arseniato (AsO_4^{3-}), arsenito (H_3AsO_3), arsénico (As_0), arsano (AsH_3), ya sea a modo de compuesto inorgánico u organometálico (Olegario, 2019; citado en Loya Ramírez, 2022, p.15).

Plomo

El plomo es un metal pesado tóxico e color gris azulado con brillo metálico, que se ubica en el grupo IV de la tabla periódica, se obtiene principalmente en minas de galena, cerusita y anglesita (Sierra, 2019; como se citó en Solano Toledo & Cabrera Marín, 2020, p. 21).

Las propiedades fisicoquímicas de este metal son: suavidad, maleabilidad, ductilidad, baja conductividad, resistencia a la corrosión, su naturaleza no es biodegradable por lo cual se

acumula en el medio ambiente (Latif, Anjum, & Jawed Ahmad, 2015; citado en Solano Toledo & Cabrera Marín, 2020, p. 21).

Zinc

El zinc es un metal sólido de color gris azulado y se encuentra dentro de los metales de transición, ubicado en la tabla periódica en el grupo II-B, tiene un número atómico de 30, valencia +2 con peso molecular de 65,38 g/mol. Su símbolo es Zn, con un punto de ebullición de 907.85°C y de fusión de 420.63°C (Carriña et al., 2018).

(Vargas Zapata et al., 2018) se refiere a que, a pesar de la estructura y carga del zinc, este elemento no participa directamente en reacciones redox, pero sí tiene la capacidad de formar enlaces coordinados como un ácido de Lewis fuerte. Este aspecto resulta fundamental para comprender el comportamiento del zinc en diversas reacciones químicas y su relevancia en la coordinación química de coordinación.

1.2.6 Tratamiento de metales pesados

El tratamiento de metales pesados abarca una serie de procesos y técnicas destinados a eliminar, reducir o recuperar metales pesados que se encuentran en diversos medios tales como aguas residuales, suelos contaminados, aguas de drenaje minero, sedimentos y efluentes industriales. Para determinar la estrategia más efectiva para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales, es crucial comprender los diversos procesos disponibles y evaluar meticulosamente cuál se ajusta de manera óptima a las circunstancias específicas.

Figura 2. Tipos de los tratamientos y tecnologías más apropiadas

| Crterios | Tipos | Tecnologías |
|-------------------------|---------------------------------------|--|
| Medio de eliminación | Procesos Físicos | Desbaste/ Flotación/ Absorción/ Desarenado/ Sedimentación/ Evaporación/ Desengrasado/ |
| | Procesos Químicos | Floculación y Coagulación/ Neutralización/ Oxidación/ Desinfección/ Intercambio Iónico/ Adsorción |
| | Procesos Biológicos | Fangos Activos/ Lechos bacterianos, de Turba/ Lagunaje/ Biodiscos |
| Fase de depuración | Pretratamiento y Tratamiento Primario | Desbaste/ Desarenador/ Decantación Primaria/ Lagunaje anaerobio/ Desengrasador/ |
| | Tratamiento Secundario | Fangos activos/Lagunaje facultativo/ Lagunas aireadas/ Lechos de turba/ Biodiscos |
| | Tratamiento terciario | Procesos de nitrificación-desnitrificación y de eliminación de fosforo/ biodiscos/ Lechos bacterianos/ lagunaje de maduración, de macrofitas/ Filtros verdes/ ultrafiltración/ Ozonización/ Radiación UV |
| Coste de la explotación | No Convencionales/ Bajo coste | Sedimentación/ Filtración/ Adsorción/ Precipitación Química/ Intercambio Iónico, junto tratamientos naturales |
| | Convencionales/ Mayor Coste | Lagunaje/ Laguna de macrófitas/ Filtros verdes/ Lechos de turba y bacterianos/ Biodiscos |

Fuente: (Ulloa, 1996)

Según el medio de eliminación de los contaminantes presentes en aguas residuales pueden ser tratados por:

1.2.7 Procesos físicos

Estos métodos implican la aplicación de fenómenos físicos, como las fuerzas gravitacionales, centrifugación, retención física, entre otros, y pueden comprender tratamientos como la eliminación de sólidos gruesos, desengrasado, desarenado, sedimentación, flotación,

evaporación y absorción (Fernández, 2020).

1.2.8 Procesos químicos

Estos métodos implican cambios químicos en la composición de sustancias debido a reacciones químicas o adición de productos químicos que pueden destruir o modificar los contaminantes orgánicos. Por ejemplo: floculación, coagulación, reducción, desinfección, neutralización, intercambio iónico y adsorción.

1.2.9 Procesos biológicos

Estos procesos biológicos son una alternativa efectiva y sostenible para la remoción de metales pesados, sin embargo, la efectividad de este proceso dependerá de una serie de factores. Entre ellos: fangos activos, lechos bacterianos, lechos de turba, lagunaje y biodiscos.

1.2.10 Técnicas de tratamiento de metales pesados

El manejo de aguas contaminadas con metales pesados varía según diversos factores, por lo que se ha dividido en dos categorías principales: convencionales y no convencionales.

Las técnicas convencionales son aquellas que se utilizan regularmente para eliminar contaminantes, mientras que las no convencionales se refieren a métodos innovadores diseñados específicamente para la eliminación o disminución de metales en aguas, especialmente las de origen industrial.

1.2.11 Técnicas convencionales de tratamiento de metales pesados

1.2.12 Filtración por membrana

Esta tecnología, que implica el uso de membranas, ofrece altas eficiencias en la eliminación de contaminantes, requiere poco espacio y es fácil de operar, pero produce una cantidad significativa de lodos con metales. Se utiliza en el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y, en menor medida, aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse según diversas características, como su peso molecular de corte, el material de la membrana (sintético o natural modificado), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Fernández, 2020, p.19).

1.2.13 Electrodialisis

La electrodialisis es una técnica electroquímica utilizada para la eliminación de iones metálicos, en donde, estos se separan de la solución acuosa mediante un proceso de transporte bajo la influencia de un campo eléctrico. Es una técnica prometedora debido a su alta eficiencia y bajo costo. (Hernández et al., 2023, p.115-122)

1.2.14 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (RO) es un proceso de tratamiento de agua basado en membranas que puede eliminar los sólidos disueltos y los contaminantes. RO es eficaz para purificar el agua y recuperar recursos valiosos, incluido el litio de las aguas residuales (Pure Agua, Inc, 2016).

1.2.15 Intercambio iónico

El proceso de intercambio se produce entre un sólido (resina o zeolita) y un líquido (agua). En el proceso, los compuestos menos deseados se intercambian por aquellos que se consideran más deseables. Estos iones deseables se cargan en el material de resina. Estas resinas se pueden utilizar solas o en conjunto para eliminar los contaminantes iónicos del agua (Fluence, 2017).

1.2.16 Adsorción

La adsorción se ha convertido en un método económicamente viable y ampliamente utilizado para eliminar contaminantes de las aguas residuales. La técnica exhibe la eliminación de diversos contaminantes, una capacidad elevada y una rápida cinética, y puede tener cierto grado de selectividad dependiendo del adsorbente utilizado como carbón activado, arcillas, biopolímeros, zeolitas, entre otras, lo que influye en su eficacia, principalmente debido a la estructura física del adsorbente (Caviedes et al., 2019).

1.2.17 Carbón activado

El carbón activado con gran área superficial, alta porosidad y características de bajo costo se aplica ampliamente como material de almacenamiento de energía para súper condensadores. El agente activador es significativo en el proceso de activación ya que la cantidad de sitios activos y las estructuras de poros del carbón activado están determinadas principalmente por los agentes activadores (Yi-Han & Lu Yin, 2019).

1.2.18 Flotación

“La flotación es un proceso físico-químico trifásico (sólido-líquido-gaseoso) que tiene como objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a las burbujas de aire” (*Flotación*, 2019).

“La flotación es el método más moderno, eficaz y de mayor aceptación, aunque también en muchos aspectos es el más complejo de todos” (Universidad Politécnica de Cartagena, n.d.).

1.2.19 Técnicas no convencionales de tratamiento de metales pesados

Adsorbentes de bajo costo

La adsorción se ha destacado como uno de los enfoques más populares debido a su sencillez operativa, eficacia notable, recuperación sencilla y rentabilidad. Para ser efectivo en este proceso, un adsorbente óptimo deberá contar con una extensa área superficial, capacidad de adsorción elevada, estabilidad mecánica y la capacidad de ser regenerado con facilidad (Pyrzynska, 2019).

Biopolímeros

El término biopolímero generalmente se designa para materiales que se originan parcial o totalmente de fuentes renovables como microorganismos, plantas o árboles. Los biopolímeros en comparación con los polímeros sintéticos producen una mayor biodegradabilidad, reciclabilidad prominente y requisitos de energía de proceso reducidos. (Rajesh et al., 2019)

1.2.20 Propiedades de la Zeolita

La zeolita, ya sea de origen natural o sintético, ha probado ser eficaz en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales mineras debido a su estructura porosa.

Según (Curi et al., 2006, como se citó en Smith Johnson, 2006), la capacidad de adsorción de la zeolita se debe a su estructura cristalina, la cual posibilita la captura y retención de sustancias perjudiciales, como metales pesados y compuestos orgánicos.

Adicionalmente, se ha explorado el impacto de diversas variables en el proceso de adsorción de zeolita en aguas residuales mineras. Este análisis refuerza la comprensión de cómo factores específicos influyen en la eficacia de la zeolita como agente adsorbente, brindando una visión más completa y detallada de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales mineras.

Según los resultados de (Carbonel Ramos, 2018, como se citó en Rodríguez et al. 2020), factores como el pH, la concentración inicial de contaminantes y la dosis de zeolita pueden afectar la eficiencia de remoción de contaminantes.

1.2.21 Porosidad

La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) identifica tres categorías de poros diferenciados cada uno por sus dimensiones. Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos (Sing, 1982).

Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán absorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas) (Gregg y Sing, 1967).

1.2.22 Adsorción

La superficie de los sólidos es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ella no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos situados en el seno del sólido que es, en definitiva, responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos. (Curi et al., 2016)

A distancias suficientemente grandes, no existe una interacción apreciable entre una molécula acercándose a una superficie, por lo tanto, la energía de este sistema es próxima a cero. A medida que la molécula se acerca a la superficie la energía del sistema comienza a disminuir debido a que las fuerzas de cohesión de los átomos de la superficie empiezan a verse compensadas. En otras palabras, el potencial de adsorción origina una fuerza atractiva que provoca el acercamiento de la molécula a la superficie. (Curi et al., 2016)

“Cuando la distancia entre la superficie y la molécula libre comienza a disminuir, las fuerzas de repulsión (debidas a la proximidad de las capas de electrones de los átomos de la superficie con los átomos de la molécula libre) comienzan a ser importantes. Por lo tanto, existe una distancia para la cual la energía del sistema es mínima. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción,

ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, y, por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida” (García, 2002; citado en Fernández, 2020).

1.2.23 Intercambio iónico

Según, (Curi et al., 2016), la zeolita muestra la capacidad de realizar intercambio iónico, lo que significa que puede intercambiar iones con otros compuestos en su entorno. Esta habilidad se debe a su estructura porosa, que le permite retener y liberar iones. La zeolita puede capturar iones de metales pesados, como plomo, cadmio y arsénico. Su capacidad para realizar este intercambio iónico es particularmente útil para eliminar metales pesados y mejorar la calidad del agua.

1.2.24 Capacidad de regeneración

La zeolita presenta la capacidad de regenerarse, lo cual resulta beneficioso para su aplicación en la descontaminación de aguas residuales mineras. Después de absorber los contaminantes, la zeolita puede ser tratada para liberar los metales pesados y el amonio que ha capturado, permitiendo así su reutilización en futuros procesos de descontaminación. Esta capacidad de regeneración de la zeolita tiene ventajas tanto desde el punto de vista económico como ambiental, al recuperar y neutralizar la zeolita, se reduce la necesidad de utilizar grandes cantidades de nuevos materiales y se minimiza la generación de residuos. Por lo general, la regeneración de la zeolita se realiza mediante procesos de lavado o tratamiento químico, estos procedimientos eliminan los contaminantes absorbidos y restauran la capacidad de absorción de la zeolita para su uso posterior. (Curi et al., 2016).

1.2.25 Mecanismos de absorción

Para la remoción de metales pesados del agua, se han aplicado diferentes métodos que incluyen distintos mecanismos físico-químicos, entre los que se encuentran coagulación-precipitación y filtración, electrodiálisis, ósmosis inversa, mecanismos de absorción, incineración, floculación, intercambio iónico, foto electroquímica, procesos de oxidación avanzada y tratamientos biológicos (Asere et al., 2019; citado en Loya Ramírez, 2022, p. 17).

Sin embargo, dentro de los métodos preferidos por la comunidad científica se encuentra el fenómeno de adsorción, el cual es especialmente adecuado para países en desarrollo.

“El método de adsorción resulta ser económico, práctico y ecológicamente amigable, por lo que se ha promovido su uso en países de bajos recursos” (Martínez - Martín, 1990; citado en Loya Ramírez, 2022, p. 17).

1.2.26 Propiedades de la arena

La arena obtenida del Valle de Yunguilla presenta una relevancia significativa en diversos sectores industriales debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. Esta región es reconocida por albergar depósitos de arena sílice de alta calidad, cuya composición mineralógica y granulométrica la hacen altamente deseable para una variedad de aplicaciones.

Bruni & Spuhler (2018) menciona que la arena es comúnmente utilizada como medio filtrante principal en diversos sistemas de filtración. Su principal función consiste en atrapar las partículas sólidas presentes en el líquido en suspensión, mientras que la grava, por su parte, actúa como soporte para la arena, permitiendo que el agua filtrada pueda fluir hacia el drenaje. El tamaño óptimo de partícula para la arena de la capa filtrante se encuentra en el rango de 0.5 a 1.5 mm de diámetro.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA Y ENSAYO EXPERIMENTAL

2.1 Metodología empleada

La metodología empleada en este estudio fue de naturaleza experimental, siendo descrita detalladamente a continuación:

Para esta metodología, se consideraron dos variables principales: la adsorción y la filtración, las cuales son propiedades fundamentales de la zeolita para la eliminación de metales pesados presentes en el agua proveniente de la mina.

Resultado de la muestra inicial de agua de drenaje minero, se encuentran detallados en la tabla 2.

Tabla 2. Porcentajes de metales en la muestra inicial de agua de drenaje minero

| Metal | Concentración (%) |
|---------------|--------------------------|
| Plomo (Pb) | 0.12 % |
| Zinc (Zn) | 0.17 % |
| Arsénico (As) | 6.3 % |

Nota. Los tres metales destacados en la tabla son aquellos que muestran la concentración más alta en la muestra inicial de agua de drenaje de la mina PapaGrande.

Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo este proyecto se realizó un análisis del agua de la concesión minera “PAPAGRANDE”, ubicada en la ciudad Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay.

Se realizaron un total de 8 ensayos, divididos en dos grupos distintos. En el primer

grupo, se utilizó como base zeolita en las 4 primeras muestras, con una capa de arena en la parte superior con una cantidad específica de zeolita siendo esta de: A1 50 g, A2 100 g, A3 150g y A4 200 g. Por otro lado, el segundo grupo de muestras se ejecutó con las mismas cantidades, pero con una disposición inversa estas muestras se identificaron como B1, B2, B3, B4, con la zeolita colocada en la parte superior y la arena en la inferior. La cantidad de arena en cada filtro se mantuvo constante en 200 g, mientras que la cantidad de zeolita varió en incrementos de 50 g hasta alcanzar los 200 g. Cabe recalcar que se llevó a cabo un tamizado de la arena por pasante malla 16, debido a la granulometría de la misma. Esta medida fue necesaria dado que se requería material fino para la fabricación de los filtros.

Uno de los objetivos establecidos es lograr que uno de los 8 filtros proporcione el resultado final para evaluar la eficacia del tratamiento, comparando los resultados antes y después del proceso en función del contenido de zeolita, con el fin de determinar el porcentaje de reducción de los metales pesados encontrados en el agua.

2.2 Obtención de muestras

El agua empleada en el análisis proviene de la concesión minera de oro "PAPAGRANDE". La muestra de agua se extrajo de la galería principal, con un volumen aproximado de 20 litros, y fue posteriormente sometida a análisis en un laboratorio externo. Para dicho análisis, se utilizó una cantidad de agua original de aproximadamente 12 mililitros. La orden de ensayo incluyó la detección de los metales pesados: Cobre, Plomo, Zinc, Arsénico, Hierro y Antimonio.

Los resultados revelaron una concentración destacada de Plomo, Arsénico y Zinc en el

agua. Estos hallazgos constituyeron la base para nuestro estudio experimental, que se enfocó en evaluar la eficacia del tratamiento aplicado a las aguas subterráneas.

La arena utilizada en el estudio fue obtenida directamente de depósitos situados en Yunguilla, una región conocida por su extracción de materiales de este tipo. Se adquirió una cantidad aproximada de 20 kg, caracterizada por un tamaño de partícula que oscila entre 1 y 2 pulgadas, presentando una mezcla con rocas de tamaño mediano. Dada esta composición, se llevó a cabo un proceso de separación de partículas mediante tamices de la marca Humboldt, disponibles en el laboratorio de Ingeniería en Minas el procedimiento se llevó a cabo directamente sin cuartear, dado que la cantidad requerida para los filtros no era considerablemente grande.

El tamaño requerido para la arena fue una granulometría que pasa a través de la malla 16, con un tamaño específico de 1190 micrones (μm). Este procedimiento aseguró la uniformidad deseada en las propiedades físicas de la arena utilizada en el estudio.

La zeolita utilizada en este estudio fue adquirida directamente de la empresa Ecuaminerales, con una cantidad de 50 kg. La ficha técnica proporcionada por el proveedor confirmó que se trataba de zeolita de tipo natural, con una pureza del 100%. Este material se empleó como el mineral principal en el tratamiento mediante filtros, con la adición de arena para mejorar la eficacia del proceso.

2.3 Dispositivos y materiales

Los equipos y materiales utilizados en todos los experimentos contribuyeron al desarrollo del proyecto de titulación y se describirán a continuación:

2.3 Dispositivo de clasificación

El equipo empleado para la clasificación de muestras es un agitador de muestras mecánico perteneciente al laboratorio de Ingeniería en Minas. Este dispositivo facilita la homogeneización de muestras de minerales triturados o pulverizados, asegurando una distribución uniforme antes de llevar a cabo análisis químicos o pruebas de concentración.

- **Tamices Humbolt:** Se utilizó principalmente para la clasificación granulométrica de la arena descrita anteriormente, los tamices están diseñados con diferentes tipos de tamaño de mallas con las que pueden realizar la separación de materiales granulares como rocas, minerales y otros elementos. Para nuestro proyecto se utilizó el tamiz de malla 16, es decir 1190 μm .

2.4 Dispositivos complementarios

- **Balanza:** La balanza se empleó para medir con precisión el peso tanto de la zeolita como de la arena en las diversas muestras de ensayo. Dado que estas sustancias presentaban variaciones en sus cantidades y en la disposición en la que se colocaron, la balanza garantizó una medición exacta y consistente, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio.
- **Probetas:** La probeta fue empleada para medir con precisión la cantidad exacta de agua de drenaje minero obtenida de mina, la cual se depositó en cada envase de muestra en volúmenes de 400 mililitros cada uno. Además, se utilizó para medir la cantidad constante de arena, siendo 200 gramos para las 8 muestras de ensayo. Respecto a la zeolita, se midió en incrementos de 50 gramos hasta alcanzar un total de 200 gramos en cada muestra.

- **Bandejas:** Las bandejas se emplearon para almacenar las muestras después de la clasificación granulométrica del material que pasó a través de la malla de tamaño 16.

2.5 Ensayos de laboratorio

Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad del Azuay específicamente en el laboratorio de minas. Se realizaron un total de 8 muestras, variando la cantidad de zeolita desde 50g hasta 200g, manteniendo constante la cantidad de arena en 200 g. Las cantidades exactas se determinaron mediante el pesaje en una balanza, luego se distribuyeron en el orden correspondiente de zeolita y arena, tanto en la parte superior como inferior, como se puede observar en la **figura 3**.

Figura 3. Análisis de niveles de arsénico, plomo y zinc en las 8 muestras.



Fuente: Elaboración propia.

Estas muestras se dejaron reposar en el laboratorio durante 30 días a una temperatura ambiente, con el propósito de determinar cuánto arsénico, plomo y zinc es capaz de absorber la

zeolita simplemente con colocarla sobre y debajo de la arena. Después de un periodo de 2 semanas tras la realización de los ensayos, se consideró apropiado realizar una revisión, como medida para agilizar el proceso de filtración, se procedió a destapar los recipientes. Este procedimiento tuvo como objetivo optimizar el flujo y la eficiencia del filtrado, garantizando así resultados más rápidos y precisos en el estudio realizado.

La normalización de este parámetro de control permitió aislar los efectos de la zeolita, lo que proporcionó resultados más precisos y aplicables. La gestión del agua proveniente directamente de la mina es una preocupación constante debido a sus contaminantes, y comprender cómo la zeolita puede ofrecer nuevas posibilidades para optimizar los procesos en la minería y obtener nuevas posibilidades para mejorar los procesos en la minería y obtener resultados efectivos en la atenuación de impactos ambientales.

2.6 Densidad del material

Zeolita: La densidad de la zeolita puede variar dependiendo de su forma y origen geológico, y suele estar entre 2.0 y 2.4 (g/cm³). Sin embargo, existen varios tipos de zeolitas con diferentes densidades. Debido a su estructura cristalina y composición química. En este caso, se optó por emplear zeolita natural en los ensayos, dado que su densidad tiende a ser ligeramente superior a la de la arena.

Arena: La densidad de la arena puede oscilar en función de varios factores, tales como el tamaño de las partículas, y el grado de compactación. Por lo general, se encuentra en un rango de 1.4 a 1.6 (g/cm³). Entre los tipos más comunes de arena utilizados en aplicaciones industriales y de construcción se encuentra la arena silíceo, que tiene una densidad promedio de alrededor de 1.5 (g/cm³)

En este caso para llevar a cabo el ensayo, se utilizó arena proveniente del Valle de Yunguilla las propiedades de la arena pueden variar según su origen geográfico y composición mineralógica.

2.7 Descripción de procedimientos

Figura 4. Tamizador de material.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso se inició con la separación de la arena, cuya granulometría era variada, con el propósito de obtener las partículas más finas. Para lograr este objetivo se empleó con la ayuda de un tamizador Humboldt con tamaño de malla 16, pretendiendo así una separación efectiva de las partículas según su tamaño. Esta etapa es fundamental, ya que garantiza la obtención del material adecuado para la posterior elaboración de los filtros, asegurando su eficacia en la

retención de contaminantes presentes en el agua.

Separación de muestras

Figura 5. Separación de muestras para filtros de agua



Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso, se llevó a cabo una clasificación de los envases utilizados en el ensayo de tratamiento, considerando tanto la ubicación del material como del mineral a ser adicionados, siendo la arena y la zeolita, respectivamente.

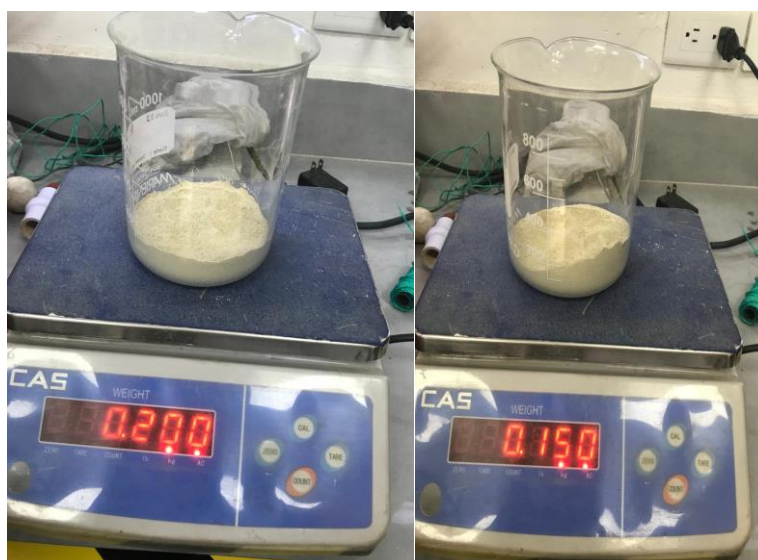
Figura 6. Pesaje de material (arena) para filtros de agua



Fuente: Elaboración propia.

Durante esta fase del ensayo, se llevó a cabo el pesaje preciso de 200 g de arena en una probeta, manteniendo esta cantidad constante en las 8 muestras analizadas, esta etapa es de vital importancia ya que la precisión de todo el ensayo depende de las cantidades sean exactas para cada ensayo realizado.

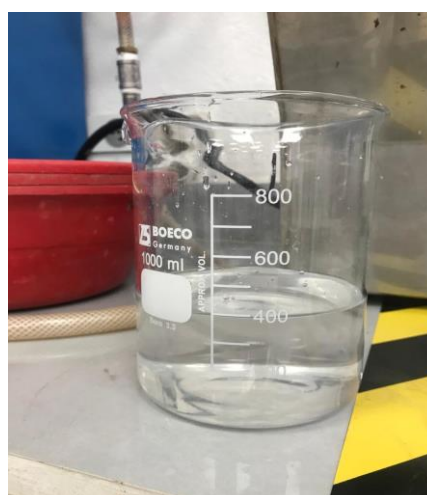
Figura 7. Pesaje del mineral (zeolita) para filtros de agua



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se procedió al pesaje correspondiente de la zeolita. Es fundamental considerar que la zeolita tiende a perder humedad con rapidez debido a su elevada capacidad de absorción, lo que vuelve susceptible a cambios en su composición. Por lo tanto, resulta fundamental realizar este proceso de pesaje de manera inmediata una vez que el saco haya sido abierto y entre en contacto con el aire. Se llevaron a cabo un total de 8 muestras, variando la cantidad de zeolita desde 50g hasta 200g.

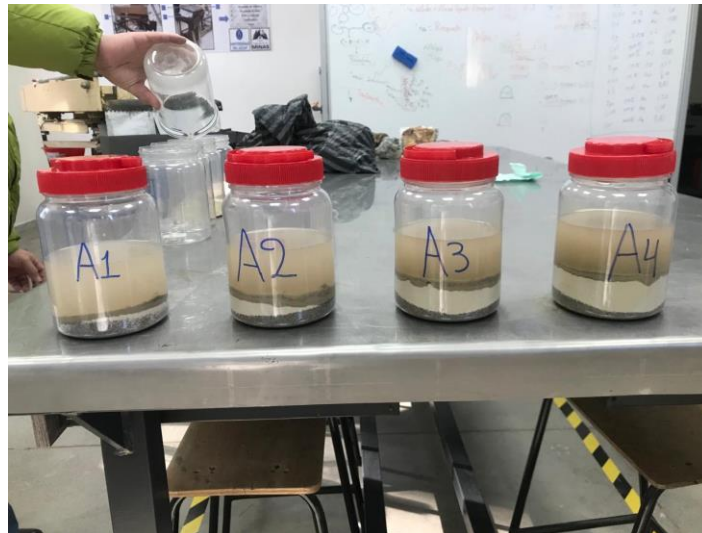
Figura 8. Agua de drenaje minero



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procedió a colocar la cantidad del agua de drenaje minero correspondiente. Para cada muestra, se vertieron 400 mililitros en los vasos de precipitación de ensayo. En este punto, los materiales destinados a los filtros estaban preparados, solo restaba agregar la cantidad precisa de agua en cada uno de ellos.

Figura 9. Preparación de filtros con arena y zeolita



Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a añadir la zeolita y la arena a las muestras A1, A2, A3 y A4, en las cuales

la disposición de estos filtros se caracterizaba por la colocación de la zeolita en la parte inferior con cantidades variables en cada muestra, y en la parte superior se ubicaba la arena. De igual manera para las muestras B1, B2, B3 y B4 con la variabilidad del material y el mineral, durante este proceso, se vertió cuidadosamente el agua de drenaje sobre las muestras, evitando provocar la formación de grumos.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

3.1 Resultados Conseguidos

Después de llevar a cabo todo el proceso experimental, se han obtenido los resultados finales para la interpretación de datos de los 8 ensayos, presentados a continuación.

3.2 Resultados de análisis de concentración

Los resultados de las concentraciones de metales pesados en el agua de drenaje minero obtenida para los ensayos se obtuvieron en el laboratorio FERSUR laboratorio del cantón Portovelo, provincia del Oro, fueron los siguientes:

Tabla 3. Análisis de cabeza de concentraciones de metales pesados

| | Pb | Zn | As |
|--------|------|------|-----|
| | % | % | % |
| Cabeza | 0,12 | 0,17 | 6,3 |

Fuente: Elaboración propia.

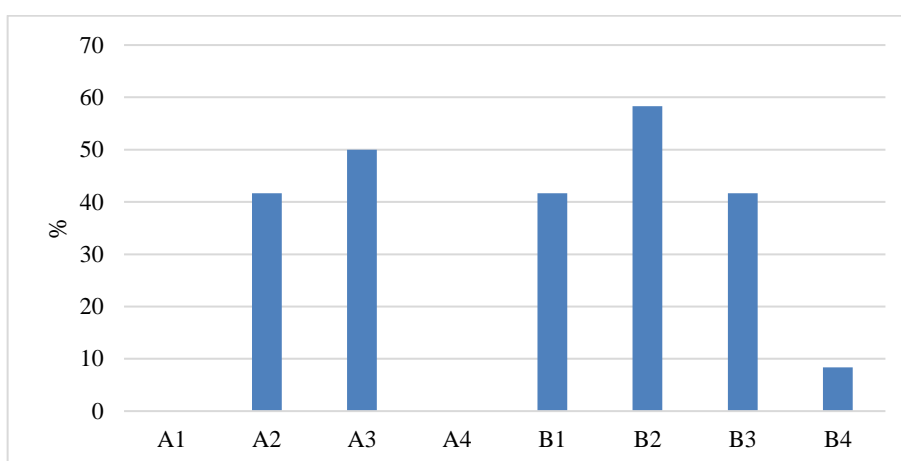
Tabla 4. Análisis de concentraciones de metales pesados

| | Pb | Zn | As |
|----|------|------|------|
| | % | % | % |
| A1 | 0,12 | 0,17 | 5,72 |
| A2 | 0,07 | 0,08 | 5,38 |
| A3 | 0,06 | 0,11 | 5,38 |
| A4 | 0,12 | 0,17 | 5,38 |
| B1 | 0,07 | 0,03 | 6,02 |
| B2 | 0,05 | 0,01 | 6,3 |
| B3 | 0,07 | 0,03 | 6,02 |
| B4 | 0,11 | 0,01 | 6,3 |

Fuente: Elaboración propia.

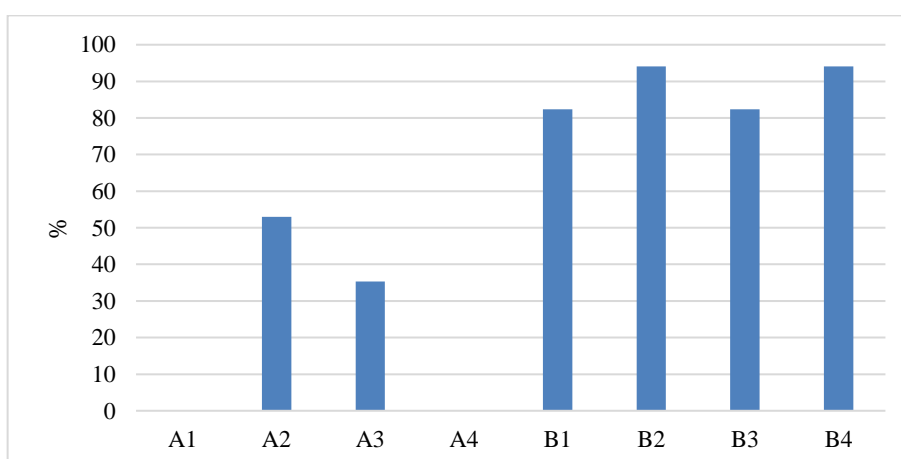
Tras examinar las concentraciones de las 8 muestras de agua de drenaje, se evidencia una variabilidad considerable en los resultados. Algunas muestras muestran concentraciones mínimas, mientras que otras, como la muestra A1, exhiben niveles más significativos, con contenidos de 0.12 y 0.17 para Plomo y Zinc, respectivamente. Por otro lado, la muestra B4 revela un valor notable de 6.3 para el arsénico. Estos datos específicos de cada metal servirán como puntos de referencia cruciales para el análisis posterior al tratamiento con zeolita y arena. Todo lo expuesto se lo puede observar en las tablas 5 y 6, además de las figuras 10, 11 y 12.

Figura 10. Resultados de porcentaje en la remoción de plomo



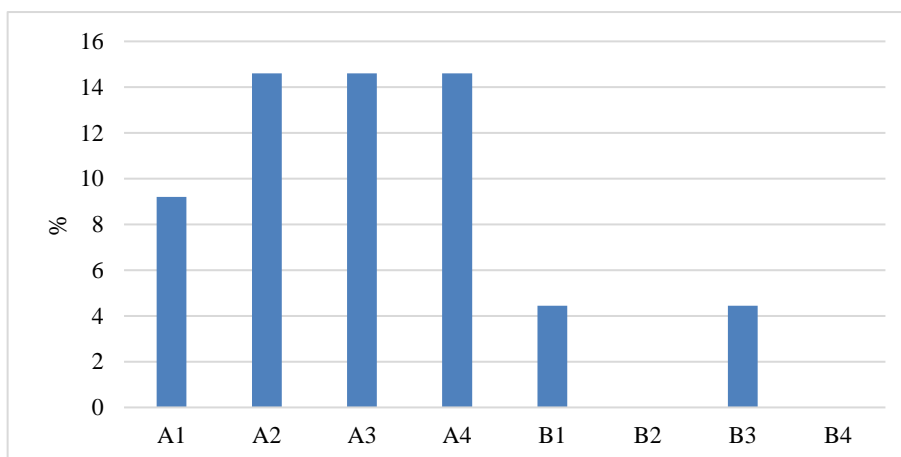
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Resultados de porcentaje en la remoción de zinc



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Resultados de porcentaje en la remoción de arsénico



Fuente: Elaboración propia.

En este estudio, se ha detectado una notable reducción en las concentraciones de arsénico, plomo y zinc, lo que sugiere que los minerales investigados pueden tener un efecto mitigador sobre estos contaminantes. Los resultados obtenidos son de gran relevancia tanto para la salud pública y medio ambiente en comunidades locales de la concesión minera, ya que la eliminación de estos metales tóxicos del drenaje minero podría mejorar significativamente la calidad de agua tanto superficial como subterránea.

Al analizar la disposición de la zeolita y la arena, se observó que, en los 8 ensayos realizados, especialmente en las muestras A2 y A3, (Tabla 6) donde la zeolita estaba colocada en la parte inferior y la arena en la parte superior, se logró una mayor adsorción de arsénico, plomo y zinc en comparación con la disposición donde la zeolita se encontraba en la parte superior. Este evento puede explicarse por los procesos de adsorción y filtración, donde la zeolita de la parte inferior actúa como una barrera eficiente, atrapando los contaminantes y así aumentando su eficacia como mineral adsorbente.

Tabla 5. Porcentaje de remoción de metales pesados en muestras específicas

| | Pb | Zn | As |
|----|-------|-------|-------|
| | % | % | % |
| A1 | 0,00 | 0,00 | 9,21 |
| A4 | 0,00 | 0,00 | 14,60 |
| B1 | 41,67 | 82,35 | 4,44 |
| B2 | 58,33 | 94,12 | 0,00 |
| B3 | 41,67 | 82,35 | 4,44 |
| B4 | 8,33 | 94,12 | 0,00 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Porcentaje de remoción de metales pesados en muestras específicas

| | Pb | Zn | As |
|----|-------|-------|-------|
| | % | % | % |
| A2 | 41,67 | 52,94 | 14,60 |
| A3 | 50,00 | 35,29 | 14,60 |

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar claramente que los ensayos efectuados en las muestras A2 y A3 son los que presentan mejores porcentajes de remoción y/o absorción de los metales estudiados.

CONCLUSIONES

- A través de la zeolita, es posible remover metales pesados, específicamente arsénico, plomo y zinc.
- La disposición de la zeolita en la parte inferior permite obtener mejores resultados de remoción.
- Con la disposición de zeolita (A2), se obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción, **arsénico** (41,67), **plomo** (52,94), **zinc** (14,60).
- Con la disposición de la zeolita (A3), se obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción, **arsénico** (50,00), **Plomo** (35,29), **zinc** (14,60).

RECOMENDACIONES

- Sería conveniente realizar otros análisis para detectar diferentes metales en el agua proveniente de esta mina y conocer si existió remoción de los mismos.
- Se recomienda no utilizar la disposición de la zeolita en la parte superior, ya que hemos detectado que al colocarla en la parte inferior la remoción es mayor.
- Proponemos aumentar las cantidades de zeolita en la disposición de la parte inferior de las muestras para verificar el aumento de remoción de los metales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abin, A., Aquino-De Los Ríos, G., Rodríguez, L., Santellano, E., Rodríguez, S., & Cortés, L. (2019). Copper Removal by Acid-Conditioned Zeolite, Part II: Kinetics, and Thermodynamic Studies. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(3), 39-50. <https://core.ac.uk/download/pdf/234665429.pdf>
- Bruni, M., & Spuhler, D. (2 de December de 2018). *Filtración rápida de arena*. Retrieved 8 de May de 2024, from SSWM.info: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-r%C3%A1pida-de-arena>
- Carmiña, V. Z., Karen, M. S., Emilse, G. S., Alvaro, G. S., Diana, M. S., Sergio, C. R., & Fredy, G. S. (2018). GENERALIDADES DEL ZINC Y SU IMPORTANCIA EN LA GESTIÓN. *Repositorio Uniatlántico*, 11.
- Carmiña, V. Z., Karen, M. S., Emilse, G. S., Alvaro, G. S., Diana, M. S., Sergio, C. R., y Fredy, G. S. (2018). Propiedades fisicoquímicas del Zinc y funciones catalíticas, estructurales y reguladoras, inmunológicas, celulares y neurológicas. (U. d. Atlántico, Ed.) *Repositorio Uniatlántico*, 11. <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/bitstream/handle/20.500.12834/1078/Generalidades+del+zinc+y+su+importancia+en+la+gestaci%C3%B3n+.pdf?sequence=1>
- Caviedes, D. I., & Espinosa, N. L. (2019). *TRATAMIENTOS PARA LA REMOCION DE PESTICIDAS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES*. Retrieved 13 de March de 2024, from <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/3f4d6e94-d4c4-4df9-9206-9dcaff9be0e2/content>
- Compañía Minera Quebrada Fría S.A. (s.f.). Informe de producción. *CONCESIÓN MINERA "PAPAGRANDE; Cód.: 26"*, 50. <file:///C:/Users/arian/Downloads/Informe%20de%20Produccion.pdf>
- Curi, A., Lima, H., & Sousa, W. (2016). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Scielo*, 17(N°6-2006), 111-118. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017
- Elboughdiri, N. (13 de abril de 2020). The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater. *Cogent Engineering*, 13.

<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/23311916.2020.1782623?needAccess=true>

FACSA. (23 de January de 2017). *Metales pesados*. Retrieved 28 de November de 2023, from Facsa: <https://www.facsa.com/metales-pesados/>

Feijoo, P., & Luna, E. (16 de 01 de 2024). Use of calcium zeolite as an absorption agent for arsenic and lead in mine tailings. *Minerva Journal*, 5(13), 39.

Fernández, K. G. (2020). *Propuesta de obtención de pellets de carbón-arcilla-zeolita para la remediación de suelos afectados por actividades*. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10392/1/16018.pdf>

Fernández, K. G. (2020). Propuesta de obtención de pellets de carbón-arcilla-zeolita para la remediación de suelos afectados por actividades mineras. 19-26. Cuenca. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10392/1/16018.pdf>

Flotación. (29 de January de 2019). Retrieved 13 de March de 2024, from Métodos de separación de mezclas: <https://metodosdeseparaciondemezclas.win/flotacion/>

Fluence. (2017). *¿Qué Es El Intercambio de Ion?* Retrieved 13 de March de 2024, from Fluence Corporation: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>

Hernández, L., Rojas, J. C., Arellano, L. R., Martínez, V. J., & Martínez, D. C. (07 de 06 de 2023). Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis. *EPISTEMUS*, 17(34), 115-122. <https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/article/view/266/>

Hurtado Toaylla, B. (8 de Febrero de 2019). ZEOLITA: Tratamiento de metales pesados. *iagua*. <https://www.iagua.es/blogs/benji-jose-hurtado-tomaylla/zeolita-tratamiento-metales-pesados>

Loya Ramírez, J. (Febrero de 2022). Remoción de arsénico y cadmio en agua usando zeolitas como material adsorbente. 88. [file:///C:/Users/arian/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/B6DQNF2M/Zeolita%20-%20absorbente%20metales%20pesados\[1\].pdf](file:///C:/Users/arian/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/B6DQNF2M/Zeolita%20-%20absorbente%20metales%20pesados[1].pdf)

MOTSI, T. (March de 2010). REMEDIATION OF ACID MINE DRAINAGE USING NATURAL ZEOLITE. *UNIVERSITY OF BIRMINGHAM*, 260. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/683/1/Motsi10PhD.pdf>

Pesántes V, J. (2014). ESTUDIO DEL PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES PROVENIENTES DE EMPRESAS

MINERAS.

Cuenca.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20202/1/TESIS.pdf>

Prieto, J., González, C. A., Román, A. D., & García, F. (2009). CONTAMINACIÓN Y FITOTOXICIDAD EN PLANTAS POR METALES PESADOS PROVENIENTES DE SUELOS Y AGUA. *10(1)*, 29-44.
<https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Pure Aqua, Inc. (2016). *Minería de litio | Sistemas de tratamiento de agua y ósmosis inversa - Pure Aqua, Inc.* Retrieved 13 de March de 2024, from Pure Aqua Inc.:
<https://es.pureaqua.com/aplicaciones-de-tratamiento-de-agua-de-osmosis-inversa/mineria-de-litio/>

Pyrzynska, K. (2019). Removal of cadmium from wastewaters with low-cost adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718307206>

Rajesh, B., S, K., Yukesh Kannah, R., Poornima Devi, T., Gunasekaran, M., & Kumar, G. (2019). A review on biopolymer production via lignin valorization. *Bioresource Technology*, *290*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241931020X?via%3Dihub>

Solano Toledo, S., & Cabrera Marín, C. (07 de Enero de 2020). “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE SALES DE PLOMO DE COPELAS USADAS EN LA INDUSTRIA MINERA”. *99*.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33781/1/Tesis%20Ingenier%20C3%ADa%20Qu%20C3%ADmica.pdf>

Spena Group. (27 de November de 2016). *Tratamiento de Aguas Residuales en Minería - SPENA GROUP Tratamiento de Aguas Residuales*. Retrieved 13 de March de 2024, from Spena Group: <https://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-mineria/>

Spena Group. (27 de November de 2016). *Tratamiento de Aguas Residuales en Minería - SPENA GROUP Tratamiento de Aguas Residuales*. Retrieved 13 de March de 2024, from Spena Group: <https://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-mineria/>

Ulloa, J. (1996). El tratamiento de las aguas residuales. Necesidades, objetivos y sistemas. *In Curso sobre reutilización de aguas residuales y salinas en*. Madrid.

- Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *INTRODUCCION Y DEFINICION DEL CAMPO*. Retrieved 13 de March de 2024, from https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5563/mod_resource/content/1/FLOTACION_INTRODUCCION_-_Notas.pdf
- Vargas Zapata, C., Muñoz Salas, K., Garcia Solano, E., Gomes Sarmiento, A., Marquez Sanchez, D., Coronado Reyes, S., & Gonzales Santiago, F. (2018). GENERALIDADES DEL ZINC Y SU IMPORTANCIA EN LA GESTIÓN. *Repositorio Uniatlántico*, 73. <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/bitstream/handle/20.500.12834/1078/Generalidades+del+zinc+y+su+importancia+en+la+gestaci%C3%B3n+.pdf?sequence=1>
- Veloz, J. (s.f.). INFORME DE PRODUCCIÓN. 50. <file:///C:/Users/arian/Downloads/Informe%20de%20Produccion.pdf>
- Wang, S., & Mulligan, C. (August de 2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution. *Science of The Total Environment*, 366(2-3), 701-721.
- Wang, S., & Peng, Y. (1 de January de 2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709007219?via%3Dihub>
- Yi-Han, C., & Lu Yin, L. (25 de May de 2019). Effect of activating agents for producing activated carbon using a facile one-step synthesis with waste coffee grounds for symmetric supercapacitors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 101, 177-185. [https://www.sciencedirect-com.translate.google/science/article/abs/pii/S1876107019302056?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419&_x_tr_pto=sc](https://www.sciencedirect.com.translate.google/science/article/abs/pii/S1876107019302056?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419&_x_tr_pto=sc)

ANEXOS

Anexo 1. Tamizador Humboldt laboratorio de minas



Anexo 2 Preparación de la arena para filtros



Pesaje de material

Anexo 3. Preparación de la zeolita para filtros



Anexo 4 Elaboración de filtros de zeolita y arena



Anexo 5. Filtros A1-A4 con zeolita en la parte superior



Anexo 6 Filtros B1-B4 con zeolita en la parte inferior



Anexo 7. Recolección de muestras post tratamiento

