



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Estudio de absorción de arsénico y plomo con zeolita cálcica
en la relavera de la planta de beneficio Playitas, Portovelo - El
Oro”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

CHRISTIAN DANIEL LESCANO VEGA

MARCO JAMPIER REINOSO AGUILAR

Director:

ING. ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA - ECUADOR

2023

DEDICATORIAS

A Dios, por darme vida, salud y sabiduría para poder cumplir con una de mis metas la cual fue concluir mi carrera universitaria. A mis padres, que fueron el pilar fundamental para este logro, además, por darme todo su cariño y apoyo en cada decisión que he tomado en el transcurso de mi vida estudiantil. A mi hermano, por sus palabras de aliento y apoyo en los momentos más difíciles y por la motivación constante para poder alcanzar mis anhelos. A mis amigos, presentes y pasados que soportaron todas mis ocurrencias y que compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas, especialmente a Christian Cabrera, Emmanuel Choco, Gerardo Peláez, Jampier Reinoso, Mateo Quezada y Paulina Londoño.

Christian Lescano

A mis padres, que fueron las personas que más influyeron en mi educación, carácter y como ciudadano ejemplar, que fueron los que me impulsaron con su sacrificio para culminar este logro de vida, siendo ellos mi apoyo y perseverancia. A mis hermanos, que me inspiraron a continuar sin importar el momento por el que pasemos, siendo yo su guía y ejemplo. A mis amigos, que compartimos grandes momentos, decepciones, pero sobre todo alegría y fraternidad en nuestra formación académica, los reconozco no solo como compañeros, sino también como unos hermanos, a Christian Cabrera, Christian Lescano, Emily Vásquez, Mateo Quezada, Luis Alvear, Paulina Londoño y Emmanuel Choco.

Jampier Reinoso

AGRADECIMIENTOS

A Dios, ser divino por darme una familia maravillosa que siempre está en las buenas y en las malas. A mis padres, por ser los autores y forjadores de la persona que soy actualmente, por brindarme un hogar donde crecer, equivocarme, reír, llorar, aprender y donde adquirí los valores que hoy rigen y definen mi vida. A mi hermano, por ser el mejor amigo el cual siempre pude desear, el que me enseñó a confiar y aplicar mis capacidades para poder cumplir mis metas. A mis docentes, de la Universidad del Azuay por haber compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de la preparación de nuestra profesión, con una mención especial a mi tutor Ing. Patricio Feijoo, Ing. Leonardo Núñez y Ing. Eduardo Luna por su disponibilidad, apoyo y guía para la realización de esta investigación. A mis amigos, Christian Cabrera, Emmanuel Choco, Gerardo Peláez, Jampier Reinoso, Mateo Quezada, por darme su tiempo y su amistad sin esperar algo a cambio durante estos 5 años, en especial a mi mejor amiga Paulina Londoño por brindarme su cariño, conocimientos, enseñanzas y amistad, finalmente a toda la gente que estuvo y está a mi lado, que de alguna manera influyo positivamente en mí.

Christian Lescano

Agradezco a mi familia, profesores, amigos y a la Universidad del Azuay, por el apoyo incondicional que me ofrecieron en mi formación académica, ayudándome a expandir mis conocimientos y culminar esta etapa importante en mi vida.

A mis profesores, siendo nuestro ejemplo y apoyo, nuestros pilares en el conocimiento y sobre todo unos grandes amigos, es grato para mí reconocer al Ing. Leonardo Núñez, Ing. Patricio Feijoo e Ing. Eduardo Luna, que, sin su gran esfuerzo y perseverancia, no podríamos llamarnos ahora ingenieros en minas.

Un agradecimiento especial a nuestro tutor de tesis, Ing. Patricio Feijoo por su guía, paciencia y dedicación en la culminación de esta tesis, que, sin su destreza y conocimiento, no habría sido posible.

Jampier Reinoso

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1 Marco teórico.....	3
1.1 Datos generales	3
1.1.1 Coordenadas UTM.....	3
1.1.2 Mapa de ubicación	4
1.1.3 Acceso a la planta de beneficio.....	5
1.2 Método de explotación y beneficio	5
1.3 Relaves mineros	8
1.4 Tipos de relaves mineros.....	9
1.5 Zeolita cálcica	10
1.6 Propiedades y características la zeolita cálcica.....	11
1.7 Metales pesados	12
1.8 Drenaje ácido	15
1.9 Daños ambientales	16
CAPÍTULO 2	17
2 Metodología.....	17
2.1 Caracterización física y morfológica de relaves mineros	17

2.1.1 Determinación de la humedad del relave	17
2.1.2 Gravedad específica del relave.....	20
2.1.3 Determinación granulométrica del relave	22
2.1.4 Determinación de la densidad aparente y densidad real de relave.....	29
2.1.5 Determinación de la porosidad del relave	32
2.1.6 Caracterización mineralógica.....	32
2.2 Obtención de la zeolita.....	33
2.3 Caracterización físico - química de la zeolita	34
2.3.1 Gravedad específica del relave.....	34
2.3.2 Granulometría de la zeolita	37
2.3.3 Determinación de la densidad aparente y real.....	43
2.3.4 Determinación de la porosidad.....	45
2.3.5 Caracterización mineralógica.....	46
2.4 Determinación de las variables a tomar en cuenta para los diferentes ensayos	47
2.5 Fase experimental.....	47
CAPÍTULO 3.....	53
3 Análisis de resultados.....	53
3.1 Obtención de resultados obtenidos a través de absorción atómica	53
3.2 Análisis de los resultados	54
3.3 Comparación de los resultados.....	61
3.4 Determinación de la alternativa más óptima para el tratamiento del relave y remoción de metales pesados	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa ubicación Playitas.....	4
Figura 1.2 Bocamina nivel-O	5
Figura 1.3 Zona de almacenamiento y clasificación de materia.....	6
Figura 1.4 Planta de beneficio Playitas	6
Figura 1.5 Colectores	7
Figura 1.6 Prensa-filtrado de material	7
Figura 1.7 Piscina de aguas residuales	8
Figura 2.1 Muestras del relave minero	17
Figura 2.2 Muestras de relave en estado húmedo.....	18
Figura 2.3 Muestras para ensayo de humedad en horno.....	18
Figura 2.4 Muestras secas de relave para ensayo de humedad.....	19
Figura 2.5 Ensayo de granulometría de relave	23
Figura 2.6 Curva granulométrica ensayo 1 por método Rosin Rammler- relave	24
Figura 2.7 Curva granulométrica ensayo 2 por método Rosin Rammler- relave	28
Figura 2.8 Ensayo de densidad aparente y real de relave	30
Figura 2.9 Método de cuarteo – relave	33
Figura 2.10 Saco de zeolita	34
Figura 2.11 Ensayo gravedad específica de la zeolita	36
Figura 2.12 Ensayo de granulometría con tamices de zeolita.....	37
Figura 2.13 Curva granulométrica ensayo 1 por método de Rosin Rammler – zeolita ..	40
Figura 2.14 Curva granulométrica ensayo 2 por método de Rosin Rammler – zeolita ..	42
Figura 2.15 Ensayos de densidad aparente y real en zeolita.....	43

Figura 2.16 Ficha técnica y especificación de la zeolita.....	46
Figura 2.17 Colocación de zeolita, malla y relave.....	48
Figura 2.18 500 g de zeolita y relave minero.....	49
Figura 2.19 Muestra 0AB -relave	49
Figura 2.20 Numeración de ensayos	50
Figura 2.21 Reposo de 11 ensayos, 1 mes	50
Figura 2.22 Culminación de la fase experimental en los ensayos	51
Figura 2.23 Empaquetado de las 11 muestras de relave	52
Figura 3.1 Preamálisis de metales pesados.....	53
Figura 3.2 Resultados de las muestras.....	54
Figura 3.3 Porcentaje de remoción de arsénico.....	57
Figura 3.4 Porcentaje de remoción de plomo	60
Figura 3.5 Ejemplo para tratamiento de relave minero	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Sistema de coordenadas PSAD 56	3
Tabla 1.2 Sistema de coordenadas WGS84	4
Tabla 1.3 Tipos de relave minero.....	9
Tabla 1.4 Metales pesados y sus alteraciones	12
Tabla 2.1 Masa de muestras húmedas y secas –humedad de relave	19
Tabla 2.2 Porcentajes de humedad del relave	20
Tabla 2.3 Ensayos para gravedad específica de relave	21
Tabla 2.4 Resultados pesos específico	21
Tabla 2.5 Resultados gravedad específica.....	22
Tabla 2.6 Abertura de tamices, según su malla.....	23
Tabla 2.7 Ensayo 1 relave (500g) – método de Rosin-Rammler	23
Tabla 2.8 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 1 - relave.....	24
Tabla 2.9 Ensayo 2 relave (500g) – método de Rosin-Rammler	27
Tabla 2.10 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 2 – relave	28
Tabla 2.11 Determinación de material retenido relave (promedio de ensayo 1 y 2).....	29
Tabla 2.12 Ensayos para gravedad específica – zeolita	35
Tabla 2.13 Resultados peso específico.....	35
Tabla 2.14 Resultados gravedad específica.....	36
Tabla 2.15 Abertura de tamices, según su malla.....	38
Tabla 2.16 Ensayo 1 zeolita (500g) – método de Rosin-Rammler	39
Tabla 2.17 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 1 – zeolita	40
Tabla 2.18 Ensayo 2 zeolita (500g) – método de Rosin-Rammler	41

Tabla 2.19 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 2 – zeolita	42
Tabla 2.20 Determinación de material retenido relave (promedio de ensayo 1 y 2).....	43
Tabla 2.21 Tabla de nomenclaturas.....	52
Tabla 3.1 Tabla del porcentaje de remoción de arsénico por parte de la zeolita parte superior.....	55
Tabla 3.2 Tabla del porcentaje de remoción de arsénico por parte de la zeolita parte inferior.....	56
Tabla 3.3 Tabla del porcentaje de remoción del plomo por parte de la zeolita parte superior.....	58
Tabla 3.4 Tabla del porcentaje de remoción de plomo por parte de la zeolita parte inferior.....	59
Tabla 3.5 Tabla de comparación de experimentación del porcentaje de remoción superior e inferior	61

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1 Recolección de muestras en la planta de Beneficio PLAYITAS	71
Anexo 2 Muestras de relave - 50 kg cada costal.....	71
Anexo 3 Muestra de relave	72
Anexo 4 Muestra de zeolita	72
Anexo 5 Christian Lescano colocando material en tamiz.....	73
Anexo 6 Jampier Reinoso tamizando relave.....	73
Anexo 7 Secado de muestras para ensayo de humedad.....	74
Anexo 8 Jampier Reinoso en recolección de muestras	74
Anexo 9 Christian Lescano cuarteando relave minero	75
Anexo 10 Jampier Reinoso mezclando relave minero.....	75
Anexo 11 Ensayo con tamices para determinación granulométrica	76
Anexo 12 Lescano y Reinoso separando las muestras de zeolita y relave minero	76
Anexo 13 Empaquetado de los 11 ensayos.....	77
Anexo 14 Espectrofotómetro de absorción atómica (mide concentración de metales) ...	77
Anexo 15 Sistema de digestión de muestras.....	78

**“ESTUDIO DE ABSORCIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO CON ZEOLITA
CÁLCICA EN LA RELAVERA DE LA PLANTA DE BENEFICIO PLAYITAS,
PORTOVELO - EL ORO”**

RESUMEN

En Ecuador los procesos metalúrgicos en plantas de beneficio generan grandes cantidades de desechos denominados relaves mineros, estos son muy perjudiciales para el medio ambiente y para la salud por sus grandes cantidades de metales pesados, los cuales algunas veces son depositados en los efluentes hídricos cercanos a las zonas de producción. Por ello, el propósito de la presente investigación fue realizar una remediación con zeolita cálcica, depositando dicho mineral sobre y bajo el relave minero, efectuando un total de 10 ensayos utilizando distintas cantidades de zeolita, como son 100, 200, 300, 400 y 500 gramos, los cuales fueron sometidos a un tiempo de experimentación de 30 días.

Los resultados que se obtuvieron de la experimentación de las 10 muestras, demostraron que el ensayo de zeolita con un peso de 500 gramos colocado en la parte inferior al relave, fue el más eficiente en la absorción de los metales pesados absorbiendo un 43% de plomo y un 51% de arsénico.

Palabras clave: Relave minero, zeolita cálcica, absorción, procesos metalúrgicos.



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Christian Daniel Lescano Vega

Autor



Marco Jampier Reinoso Aguilar

Autor

**"STUDY OF ABSORPTION OF ARSENIC AND LEAD WITH CALCIUM
ZEOLITE IN THE TAILINGS OF THE PLAYITAS BENEFICIATION PLANT,
PORTOVELO - EL ORO"**

ABSTRACT

In Ecuador, metallurgical processes in profit plants generate large quantities of waste called mine tailings, these are very harmful to the environment and for health due to their large quantities of heavy metals, which are sometimes deposited in nearby watereffluents to production areas. Therefore, the purpose of the present investigation was to perform a remediation with calcium zeolite, depositing said mineral on and under the mine tailings, carrying out a total of 10 tests using different quantities of zeolite, such as 100, 200, 300, 400 and 500 grams, which were subjected to experimentation time of 30 days.

The results obtained from the experimentation of the 10 samples, demonstrated that the zeolite test weighing 500 grams placed on the part lower than the tailings, was the most efficient in the absorption of heavy metals, absorbing 43% lead and 51% arsenic.

Keywords: Mining tailings, calcium zeolite, absorption, metallurgical processes.



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador of the School



Christian Daniel Lescano Vega

Author



Marco Jampier Reinoso Aguilar

Author



Christian Daniel Lescano Vega

Marco Jampier Reinoso Aguilar

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Abril, 2023

**“ESTUDIO DE ABSORCIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO CON ZEOLITA
CÁLCICA EN LA RELAVERA DE LA PLANTA DE BENEFICIO
PLAYITAS, PORTOVELO - EL ORO”**

INTRODUCCIÓN

Mediante el transcurso de los años, las actividades mineras son relacionadas al desarrollo económico, beneficiando a pueblos, comunidades y países del mundo, debido a que generan un progreso tecnológico, de bienes y servicios, pero a pesar de ello, la explotación y refinación de los yacimientos mineros acarrea un lado negativo en las zonas donde se realizan dichas operaciones, ya que han generado y continúan generando grandes cantidades de residuos sólidos que han sido depositados en tranques de relaves, los cuales, bajo condiciones apropiadas o no apropiadas, pueden llegar a contaminar aguas subterráneas y las riberas de los ríos.

Los relaves mineros son un conjunto de materiales de descarte generado del proceso de concentración de minerales en procesos hidrometalúrgicos, los cuales están constituidos por rocas fragmentadas, ganga y agua. Los relaves son almacenados en tranques, ya que dichos residuos no pueden ser reutilizados ni reprocesados en el proceso productivo. Los tranques de relave se definen como: “disposición de almacenamiento de los relaves que cumplen la función de ubicar la fracción sólida en una estructura estable y disponer a su vez, de la suspensión parcial de sólidos en líquidos y de una fracción líquida, capaces de mantenerse en condiciones seguras respecto a eventuales embalses u otras perturbaciones” (D.S.N.84, 2022)

En sí, el relave al inicio no representa ningún peligro, pero al interactuar con el agua genera la solubilización de varios metales pesados y químicos que se usan en el proceso de concentración, donde se pueden encontrar elementos dañinos para los seres

vivos como arsénico, cadmio, plomo, etc. (Sernageomin, 2018). Por dichos químicos y metales pesados se crea una gran problemática, debido a la generación de drenajes ácidos que resulta de la oxidación de los sulfuros metálicos y que se traduce en una fuerte acidificación de las aguas acompañada en algunos casos de altas concentraciones de metales disueltos, afectando severamente a la biodiversidad, salubridad humana y los bienes naturales.

Es importante mencionar que en el Ecuador las altas concentraciones de arsénico, cadmio y plomo se encuentran en sedimentos de los ríos, pertenecientes a las provincias del Oro, debido a las descargas ilegales de relaves realizadas por la pequeña minería, minería artesanal y sobre todo minería ilegal, representando riesgos cancerígenos y de intoxicación a las poblaciones aledañas (Teijlingen, 2019).

Por lo tanto, la presente tesis tuvo como objetivo realizar ensayos para estudiar la capacidad de remoción del arsénico y plomo, mediante la aplicación de zeolita cálcica del relave proveniente de la Planta de Beneficio “PLAYITAS” que está ubicada en el sitio El Salado de la parroquia y cantón Portovelo, provincia de El Oro, con el fin de encontrar una alternativa viable y confiable para el tratado de relaves mineros.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES Y MARCO TEÓRICO

1 Marco teórico

1.1 Datos generales

La compañía minera ASOPROMIN S.A es titular minera del área denominada “O NIVEL”, código 277, la misma que se encuentra ubicada en el sitio del Cajón de la parroquia Huertas, cantón Zaruma, provincia de El Oro, la cual en la actualidad se encuentra realizando actividades de exploración y explotación de minerales polimetálicos. Además, la empresa cuenta con su propia planta de beneficio de minerales “PLAYITAS”, código 3000928, que se encuentra ubicada en el sitio El Salado de la Parroquia y cantón Portovelo, provincia de El Oro, con una capacidad de 150 toneladas métrica diarias, adicionalmente es importante mencionar que dicha planta cuenta con maquinaria adecuada, que le permite tener los más altos índices y estándares de recuperación, así como la aplicación de medidas de control y mitigación ambiental que les permite desarrollar una actividad minera de beneficio sostenible y sustentable.

1.1.1 Coordenadas UTM

Tabla 1.1 Sistema de coordenadas PSAD 56

PUNTOS	X	Y
PP	651036	9585589
P1	651432	9585589
P2	651432	9585953
P3	651036	9585953

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2 Sistema de coordenadas WGS84

PUNTOS	X	Y
PP	650778	9585217
P1	650925	9585217
P2	650925	9584999
P3	650778	9584999

Fuente: Elaboración propia.

1.1.2 Mapa de ubicación

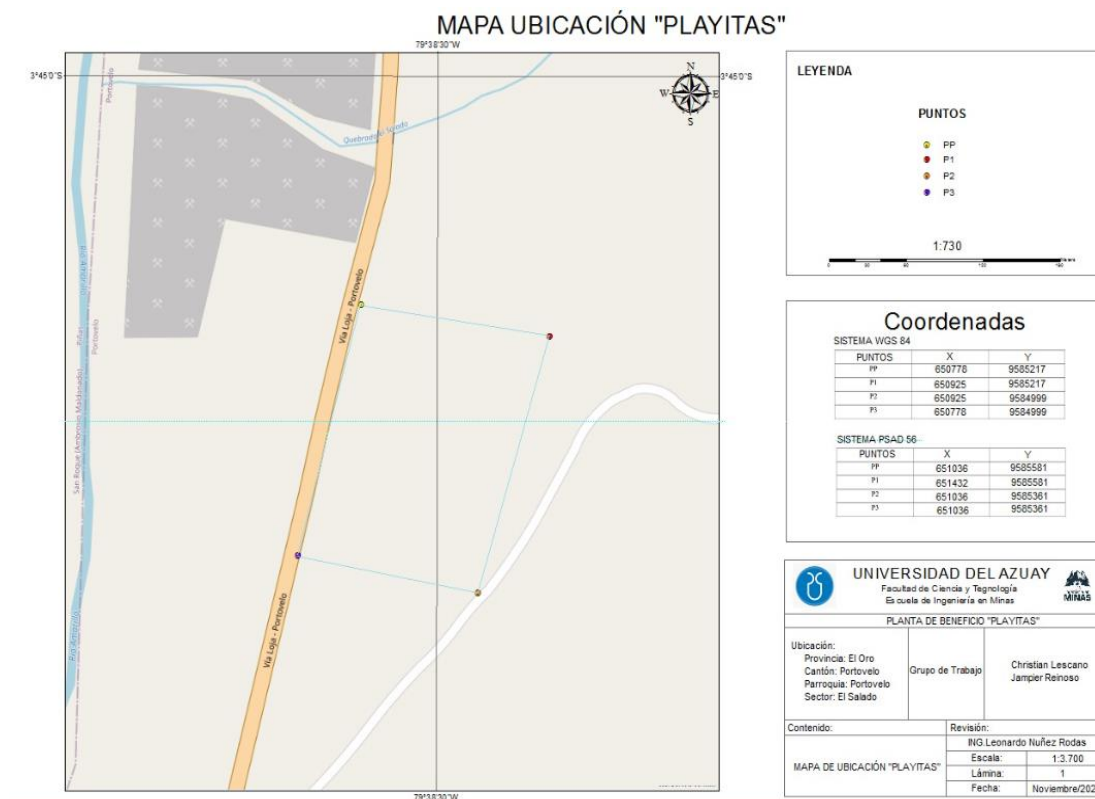


Figura 1.1 Mapa ubicación Playitas

Fuente: Elaboración propia.

1.1.3 Acceso a la planta de beneficio

El acceso a la planta se realiza por el carretero asfaltado que conduce de Portovelo a Loja, a una distancia de 3 km de la ciudad de Portovelo.

1.2 Método de explotación y beneficio

El sistema de explotación en la mina llamada “O NIVEL” es subterráneo, el método de explotación es definido por niveles cada 30 m, tomados desde la superficie, cota 1084 m.s.n.m. El minado se realiza empleando el método de corte y relleno, además del método de cámara y pilares, con algunas modificaciones. Los trabajos actuales se desarrollan desde el nivel O de forma ascendente y descendente, con respecto al bombeo. El nivel freático se encuentra debajo del nivel O. En el área minera “O NIVEL”, las operaciones mineras están comprometidas a realizar trabajos de adecuación de los frentes de avance mediante trabajos de señalización, habilitación de rutas de escape, adecuación de refugios, adecuación de una zona para primeros auxilios, lo cual consiste en la delimitación de bloques para su posterior explotación, mediante la apertura de diferentes labores mineras como son: galerías de exploración, cruceros corta vetas, pozos o piques, rebajes inclinados, chimeneas de ventilación.



Figura 1.2 Bocamina nivel-O

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, cuenta con instalación de diferentes infraestructuras para el trabajo como son: buzones de trasiego, plataformas para estaciones de winches, redondeles de locomotora, etc.



Figura 1.3 Zona de almacenamiento y clasificación de materia

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de beneficio, la flotación se lo ejecuta en el circuito donde se encuentran instalados bancos de 7 celdas de flotación tipo Serrano y dos bancos de 4 celdas Denver; destinadas para la recuperación de metales como son: oro, plata y cobre.



Figura 1.4 Planta de beneficio Playitas

Fuente: Elaboración propia.

La flotación es un proceso basado en las propiedades superficiales de los sólidos. La operación de concentración por flotación se basa en la adherencia de partículas sólidas en suspensión a gases o ciertos líquidos, preferentemente agua. Para que se pueda dar el proceso de flotación se requiere que la superficie del mineral tenga un comportamiento hidrológico y, por lo tanto, una buena adherencia a las burbujas de aire; para ello se utiliza unas sustancias denominadas colectores que facilitan el proceso. Un colector es un compuesto orgánico con una molécula constituida, por una parte, no polar (hidrocarbonada) y un grupo polar (ASOPROMIN S.A, 2023).



Figura 1.5 Colectores

Fuente: Elaboración propia.

Para el manejo de los relaves de la planta de beneficio “PLAYITAS”, se aplica filtros de prensas y tranques de relaves.



Figura 1.6 Prensa-filtrado de material

Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.7 Piscina de aguas residuales

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Relaves mineros

La minería del oro, propone una serie de actividades de beneficio y transformación, para esto requiere usar cantidades cuantiosas de agua y aditivos, además de llevar a cabo ciertos procesos fisicoquímicos para la extracción del oro. La composición de los relaves varía dependiendo de su origen y del método de beneficio de la actividad minera, también, pueden tener un alto contenido de metales pesados como níquel, cobre, arsénico, cadmio, zinc, plomo, etc., que pueden generar afectaciones a la salud de los seres vivos. (Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018). La minería del oro, propone una serie de actividades de beneficio y transformación, para esto requiere usar cantidades cuantiosas de agua y aditivos, además de llevar a cabo ciertos procesos fisicoquímicos para la extracción del oro. El relave minero es un sólido molido, originado de las operaciones mineras, es una mezcla de desechos procedentes de dichas actividades en la concentración de minerales, pasa por un proceso de molienda de sólidos dando un material triturado muy fino y su composición varía dependiendo de su origen, contiene rocas molidas, agua y ganga, solo una pequeña fracción representa al elemento de interés económico que se desea recuperar (cerca del 1%), el resto se lo denomina relave y se deposita de una forma segura y ambientalmente responsable. (Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018).

1.4 Tipos de relaves mineros

Las presas de relave son utilizadas para el almacenamiento de agua y otros desechos provenientes de procesos de extracción mineros, los cuales generan grandes cantidades de material por lo que se ubican en grandes áreas y son topográficamente convenientes debido a la escala del desarrollo de la mina. Estas infraestructuras se utilizan como medio para reducir los impactos de los recursos hídricos y de la ingeniería geotécnica, ya que su función principal es almacenar residuos sólidos y retener temporalmente las aguas residuales líquidas de las plantas de tratamiento e instalaciones receptoras (MarjaanaKarhu, et al., 2020). Los tipos de relave minero son:

Tabla 1.3 Tipos de relave minero

<p>Tranque de relave: Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave compactado, proveniente de un hidrociclón. La parte fina, denominada Lama, se deposita en la cubeta del depósito.</p>
<p>Embalse de relave: Es aquel depósito donde el muro de contención está construido de material de empréstito (tierra y rocas aledañas) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere construcción de un muro de contención.</p>
<p>Relave filtrado: Se trata de un depósito en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado, para asegurar así una humedad menor al 20%. Esta filtración es también similar a la utilizada en agua potable.</p>
<p>Relave en pasta: Corresponden a una mezcla de agua con sólido que contiene abundantes partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad.</p>

Fuente: Sernageomin, 2022.

1.5 Zeolita cálcica

La arcilla es una descomposición de una roca sedimentaria, la cual está constituida por silicatos de aluminio hidratados y su pureza se determina según la coloración presente desde blanco (pura) hasta rojo anaranjado. Tiene una alta capacidad de absorción e intercambio iónico, baja permeabilidad, capacidad de expansión, estabilidad físico-química y elevada área superficial (Ramos, 2018).

Las zeolitas fueron descubiertas por Axel F. Cronstedt en 1756, pero fue hasta 1925 que Weilgel y Steinhoff reportaron su capacidad absorbente (Tuty, Tine, & Siti, 2017). Generalmente, las zeolitas naturales son de origen volcánico o de rocas metamórficas. Las de origen volcánico principalmente forman cristales finos que se encuentran dentro de las rocas ígneas o basálticas. Cabe mencionar, que se pueden encontrar gran cantidad de depósitos de zeolitas en el fondo del mar, pero por ahora resultan inaccesibles para las personas (Król, 2020).

Las zeolitas se encuentran en todo el mundo, pero debido a las diferentes regiones geográficas y diferentes condiciones se han generado variaciones en la estructura cristalina, dando como consecuencia un cambio a sus capacidades físico - químicas (Pérez, Valencia, & Rey, 2022). Cabe recalcar que, en las últimas décadas, se ha encontrado que es eficaz para eliminar metales como Pb (II), Cd (III), Cr (III), Cu (II), Mn (II), Zn (II), Ni (II) y As (V) (Abin, et al., 2019). Entre las zeolitas naturales tenemos alrededor de 67 especies, entre ellas tenemos la Mordenita ($\text{Ca, K}_2, \text{Na}_2$) $\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24}$ ($6,66\text{H}_2\text{O}$); la Chabazita (Ca, Na_2) $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ ($6\text{H}_2\text{O}$), entre otros. Por otra parte, la necesidad de desarrollar nuevos materiales ha llevado a los investigadores, a sintetizar más de 231 estructuras de zeolitas, a las cuales se nombran con letras: Tipo A, X, Y, ZSM, entre otros (Yang, 2001).

La zeolita tiene la capacidad de remover metales pesados, posee propiedades de intercambio iónico, por lo cual pueden remover iones metálicos, se la implementa en procesos metalúrgicos, drenaje ácido y de relaves. La composición de la zeolita se forma por precipitación de fluidos que se hallan en poros, alteración del vidrio volcánico, etc. Tiene un bajo costo de extracción y son neutros en procedimientos químicos - físicos y térmicos. (Herrera & Cajavilca, 2021), (Ávila, 2020).

(Bellido, Alberto, Anccori, & Adelaida, 2020) estudiaron la remoción de arsénico del pasivo de relaves del centro minero Limón Verde, Región Puno, con zeolita natural de la Cantera Perhua Perhuyani de Llungo. La remoción del arsénico dio fue del 52,78%. Estudios demuestran la utilidad de las zeolitas naturales en la remediación de plomo en pasivos mineros, en los cuales se logró remover hasta el 90% del metal tóxico por mecanismos de absorción e intercambio iónico (Ibarra, Lerma, Figueroa, Franco, & Moreno, 2013). Otros estudios con zeolitas naturales en soluciones impactadas con varios metales pesados reportan un porcentaje de remoción de plomo de hasta el 72,45% (Ramo, Castillo, Sánchez, & Coronado, 2001).

1.6 Propiedades y características la zeolita cálcica

Las propiedades de la zeolita son:

- Absorción: la zeolita tiene aplicaciones de secado, purificación y separación en una gran variedad de materiales, remueve el agua a presiones bajas con una capacidad de más del 25% en peso de agua.
- Intercambio iónico: es el resultado del intercambio isomórfico de átomos de silicio de su conformación cristalina por otros átomos, se observan en arcillas, feldspatos y zeolitas.
- Porosidad: su formación es por canales y cavidades homogéneas presenta una superficie interna mayor en relación con la superficie externa de la zeolita.

Sus características son:

- La zeolita puede adsorber moléculas debido a su gran área interna, siempre y cuando puedan pasar a través de sus poros.
- La zeolita puede ser un catalizador ácido sólido. Puede funcionar como un ácido fuerte (aunque se mantiene como un sólido) cuando la hidratación ha sustituido un hidrógeno, por un electrón de valencia adicional, o un intercambio isoelectrónico con el aluminio.
- Se puede usar la zeolita como un tamiz molecular debido a que tiene un tamaño de poro uniforme.

- La zeolita es metaestable; quiere decir, es estable siempre que se mantenga a una temperatura y pH adecuados. Dentro de este rango, no se ve afectada por oscilaciones grandes de temperatura, presión, o radiación ionizante.

1.7 Metales pesados

Bioquímicamente, la acción tóxica de los metales pesados se manifiesta por la fuerte afinidad de las formas catiónicas de estos metales por el sulfuro presente de los grupos sulfhídricos R-SH presentes en las enzimas. Las enzimas son las macromoléculas encargadas de catalizar numerosas reacciones en los organismos (Durango, 2022).

Tabla 1.4 Metales pesados y sus alteraciones

Metales pesados	Aspectos ambientales
Arsénico	<ul style="list-style-type: none"> • Puede transportarse a distancias cortas en aguas subterráneas y superficiales. • Altera la flora, la producción de biomasa, calidad de suelo y agua. • Genera cáncer de pulmón y piel por ingestión.
Mercurio	<ul style="list-style-type: none"> • Es adsorbido por los suelos, sedimentos y materiales húmicos. • Plantas lo absorben por sus raíces, e impide el desarrollo de la mayoría. • La ingestión provoca afectaciones al sistema nervioso, pérdida de memoria, inestabilidad emocional, insomnio, temblores, pérdida de visión y audición.
Plomo	<ul style="list-style-type: none"> • Está presente en suelos y agua, pero no es esencial para el crecimiento de animales y plantas. • Afecta la actividad biológica de los suelos. • Afecta el sistema nervioso, riñones, sistema reproductor.

Zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta de forma negativa en altas concentraciones a los microorganismos. • Es soluble en el agua, aumentando su acidez.
Cadmio	<ul style="list-style-type: none"> • Es el más tóxico de la cadena alimenticia y no experimenta degradación. • Genera efectos negativos en la salud humana como, anemia, disfunción eréctil, disfunción renal, osteoporosis, trastornos, etc.
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Presente en el agua, afecta la salud de los seres vivos, genera vómito, diarrea, trastornos gastrointestinales.
Talio	<ul style="list-style-type: none"> • En niveles altos afecta a organismos vivos del suelo (estructura microbiana).
Cromo	<ul style="list-style-type: none"> • En altos niveles puede afectar daños en la nariz. • Genera cáncer, anemia, daña el estómago y intestino.

Fuente: Durango, 2022.

El arsénico es un elemento químico de número atómico 33, símbolo AS, número de masa atómica 74.92 y de color gris metálico. A pesar de ser un metaloide, entra en la categoría de metal pesado debido a su densidad atómica. Se encuentra en aguas naturales en cuatro estados oxidativos: arsenato (AsO_4^{3-}), arsenito (H_3AsO_3), arsénico (As^0) y arsano (AsH_3), ya sea a modo de compuesto inorgánico u organometálico (Olegario et al., 2019). Estas alteraciones químicas están sujetas al pH en el que se encuentre, siendo de 0-2 arsenito, 3-6 arsenato, de 7-11 arsénico y de 12-14 arsina (Wang & Mulligan, 2006). Es importante mencionar que el arsénico es un elemento químico que sufre complejas interacciones en soluciones acuosas. Los principales estados en los que se encuentra el arsénico son en soluciones acuosas como arsenito y arsenato, donde el arsenito es el compuesto más tóxico, debido a sus propiedades que permiten ser más móviles (ATSDR, 1999). Además, por sus propiedades químicas el arsénico es casi similar al fósforo, por lo que puede introducirse en plantas comestibles (Liu, y otros, 2019). Es por ello que hay una gran posibilidad de que la intoxicación

por arsénico sea debido a fuentes alimenticias o por consumo de agua dando como resultado enfermedades como cáncer, diabetes, cirrosis y problemas de la piel (Buchet & Lison, 2000).

Las vías de absorción del arsénico por el ser humano se encuentran por:

- Ingesta de alimentos 95%.
- Por inhalación un 60% a 90%.
- Absorción por vía dérmica no es muy común (Rossman, 2007).

Los efectos que genera en la salud son:

- Anorexia, pigmentación café.
- Neuritis periférica (debilidad muscular, dolor y parestesias en las extremidades).
- Lesiones hepáticas.
- Edema localizado. (Aposhian, 1989).

El plomo es un elemento químico cuya simbolización en la tabla periódica es Pb, con un número atómico de 82, masa atómica de 207,2 y su densidad de 11,4 g/cm³ es de una tonalidad gris azulada, de baja temperatura de fusión alrededor de los 327,5 °C, rara vez se lo encuentra en la naturaleza en la forma de metal, por lo general se lo encuentra combinado con dos o más elementos compuestos. El plomo es un metal pesado resistente a la corrosión con aire o agua, es de maleabilidad fácil, ya que se puede modelar y tallar, este metal puede combinarse con otros metales para formar aleaciones. (ATSDR, 2016). El plomo es un contaminante ambiental muy tóxico y se presenta en el ambiente por actividades antropogénicas como la minería y la fundición. En el suelo contaminado por plomo se encuentran también cadmio y zinc, generando una barrera de suelo-planta, limitando el crecimiento de la corteza vegetal en algunas especies. (Méndez, Ramírez, Gutiérrez, & García, 2009). En condiciones estándares el plomo no reacciona con el agua, pero al estar en contacto con el aire húmedo, la reactividad con el agua aumenta, en la superficie del metal se forma una capa de óxido de plomo (PbO), en presencia de oxígeno y del agua, el plomo se transforma a hidróxido de plomo (Pb(OH)₂), generando contaminantes tóxicos, las sales de plomo tienen en el agua un peligro de clase 2, y por lo tanto son dañinas, lo mismo se aplica

a otros compuestos como el acetato de plomo, óxido de plomo, nitrato de plomo y carbonato de plomo (Lenntech, 2012).

Las vías de absorción del plomo por el ser humano se encuentran por:

- Vía respiratoria mediante inhalación representando el 50% de absorción.
- Vía digestiva mediante ingesta representando el 10% en adultos, en niños representa de 30% a 50%.
- Vía dérmica por contacto por la piel (Fernández, 2018).

Los efectos que genera en la salud son:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia.
- Incremento de la presión sanguínea.
- Daño a los riñones.
- Abortos y abortos sutiles.
- Perturbación del sistema nervioso.
- Daño al cerebro.
- Disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma.
- Disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños.
- Perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad (Lenntech, 2012).

1.8 Drenaje ácido

Uno de los principales problemas de la mala gestión de los residuos mineros es la generación de drenaje, especialmente el drenaje ácido minero, provocado por la oxidación de grandes cantidades de minerales sulfurados expuestos al medio ambiente durante la explotación de ciertos yacimientos, como la pirita, la cual al entrar en contacto con el agua, oxígeno y bacterias, dan como resultado la generación del drenaje ácido minero y la producción de ácido sulfúrico, que afecta a otros minerales disolviéndolos y creando elementos tóxicos que se liberan al medio ambiente contaminado a las aguas superficiales como subterráneas (Ignacia & Oñate, 2019).

Moreno & Palacios (2017), indican que el drenaje ácido de mina, es el resultado de la oxidación de sulfuros metálicos, por la presencia de oxígeno y agua como lo indica la

Red Internacional de Prevención de Ácidos, además, es uno de los principales problemas causados por las actividades mineras y tiene el potencial de contaminar aguas superficiales y subterráneas. La descarga incontrolada de aguas de mina con concentraciones elevadas de contaminantes en el medio ambiente puede afectar la vida acuática, el suelo, y los sedimentos.

1.9 Daños ambientales

Los relaves pueden alterar la composición del suelo adyacente, la flora y fauna además pueden producir cambios a nivel de microclima, que se traducen en una variación del paisaje. La mayoría de los impactos ambientales se genera por las grandes dimensiones de los depósitos de relaves, la vulnerabilidad a la erosión eólica e hídrica, la alteración que producen en los cauces de aguas naturales y a la composición física y química de los residuos, que, entre otros, pueden llevar a la acidificación del medio (Chamorro, 2008).

CAPÍTULO 2

EXPERIMENTACIÓN

2 Metodología

2.1 Caracterización física y morfológica de relaves mineros

Previo a la toma de la muestra de relave minero, se realizó una solicitud formal de aprobación a la empresa ASOPROMIN S.A. y después de dos días la empresa aceptó y entregó el oficio de aprobación, por lo que se procedió a tomar la cantidad de 50 kilogramos del relave minero en cuatro costales impermeables para evitar la pérdida de efluente minero.



Figura 2.1 Muestras del relave minero

Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 Determinación de la humedad del relave

Después de la recolección de la muestra, se dedujo que esta tenía un alto grado de contenido de humedad, siendo un problema para el ensayo de la determinación granulométrica del relave, debido a esta circunstancia, se decidió secar la muestra y aprovechar este procedimiento para realizar la determinación de la humedad.

La humedad se define como la relación entre la masa de agua intersticial o de poros y la masa de las partículas sólidas, según la norma ASTM D-2216-10.

El procedimiento que se llevó a cabo para la obtención del porcentaje de humedad fue:

- Se pesó las muestras en su estado natural, se utilizó 500g de muestra en cada ensayo.
- Se pesó la muestra después de ser sometida a un secado de 24 horas a temperatura constante de ± 105 °C.



Figura 2.2 Muestras de relave en estado húmedo

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.3 Muestras para ensayo de humedad en horno

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.4 Muestras secas de relave para ensayo de humedad

Fuente: Elaboración propia.

Formula humedad

$$\omega = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

ω = contenido de humedad de la muestra.

m_1 = masa del recipiente en gramos.

m_2 = masa del recipiente y del suelo húmedo (g).

m_3 = masa del recipiente y del suelo seco (g) después de 24 h al horno.

Tabla 2.1 Masa de muestras húmedas y secas –humedad de relave

Humedad			
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa de la muestra húmeda (g)	Masa de la muestra seca + masa del recipiente (g)
1	106	500	499
2	120	500	520
3	110	500	508

Fuente: Elaboración propia.

Basados en la ecuación, tenemos los siguientes resultados:

Tabla 2.2 Porcentajes de humedad del relave

Muestra	% Humedad (ω)
1	27.23
2	25
3	25.63
Media	25.95

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Gravedad específica del relave

La gravedad específica o densidad relativa definimos como la densidad de un material en relación con la densidad del agua a una misma temperatura, es de propiedad intensiva de la materia, lo que significa que solo depende de su composición y no de la cantidad de materia (Arrieta, 2011).

Formula de peso específico

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

Donde:

ρ : peso específico (g/cm^3).

m: masa inicial (g) (masa del relave, 100 g en cada prueba).

V1: volumen inicial (se colocó agua hasta la mitad de cada probeta, en este caso en una probeta de 1000 ml con 500 ml de agua y dos probetas de 250 ml con 125 ml de agua).

V2: volumen final (se colocó la masa de 100 g en cada probeta, la medición del volumen final es la diferencia de nivel al volumen inicial (el agua sube), se dejó reposar 24 h para obtener este resultado).

Tabla 2.3 Ensayos para gravedad específica de relave

Datos			
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 250 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)
Masa (g)	100	100	100
Volumen 1 (ml)	500	125	125
Volumen 2 (ml)	535	164	166

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4 Resultados pesos específico

Resultados			
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 250 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)
Peso específico (g/ cm³)	2.86	2.56	2.44

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar los cálculos de la gravedad específica se realizará con la formula siguiente:

Formula de gravedad específica

$$GM = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (3)$$

Donde:**GM:** gravedad específica **ρ :** peso específico (g/cm^3). **ρ_{H_2O} :** peso específico del agua (g/cm^3).**Tabla 2.5** Resultados gravedad específica

Resultados				
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 250 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)	Promedio
Gravedad específica	2.86	2.56	2.44	2.62

Fuente: Elaboración propia.**2.1.3 Determinación granulométrica del relave**

De acuerdo con la norma ASTM C 33-136, la misma que especifica la abertura que cada tamiz debe tener para evaluar las partículas gruesas y finas contenidas en la muestra, se procedió a realizar el ensayo granulométrico de la siguiente manera. En este caso, se realizó solo la determinación de granulometría para partículas finas, debido a que el relave es de poco espesor.

Tabla 2.6 Abertura de tamices, según su malla

Tamices serie ASTM	
N° de malla	Abertura (mm)
10	2
40	0.425
50	0.36
80	0.18
100	0.15
200	0.075

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.5** Ensayo de granulometría de relave

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.7 Ensayo 1 relave (500g) – método de Rosin-Rammler

N° de malla	Diámetro (mm)	Abertura (um)	Masa retenida (g)	%Retenido	% Retenido acumulado	Pasante acumulado	Rosin-Rammler	
					R(X)	F(X)	X	Y
10	2	2000	0	0%	0%	1.00	7.60090246	-
-10 + 40	2	2000	13	3%	3%	1.00	7.60090246	-
-40 + 80	0.425	425	281	57%	59%	0.97	6.05208917	1.292430442
-80 + 100	0.18	180	183	37%	96%	0.41	5.19295685	0.648181158
-100	0.149	149	19	4%	100%	0.04	5.00394631	3.242670797
Total			496	100%		0.00		

Fuente: Elaboración propia.

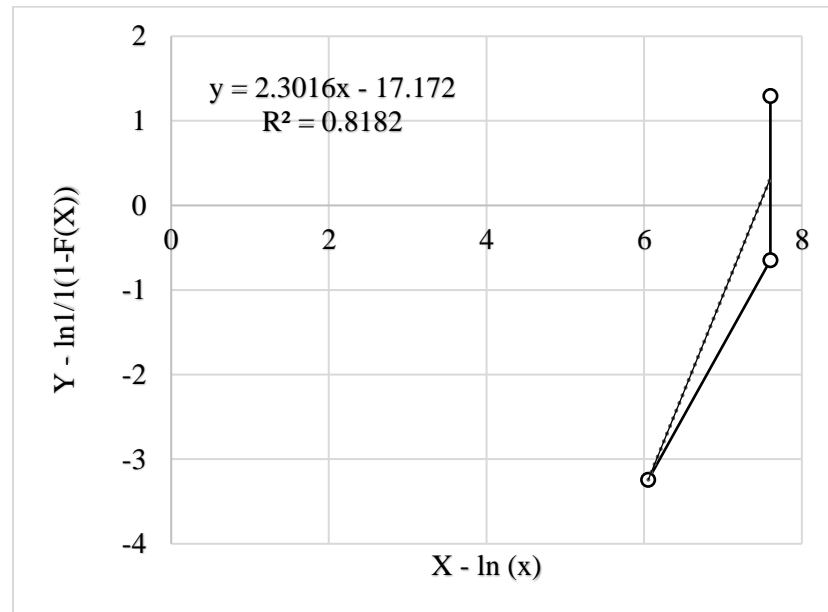


Figura 2.6 Curva granulométrica ensayo 1 por método Rosin Rammler- relave

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.8 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 1 - relave

Rosin-Rammier - ensayo 1	
m	1.808
lnx	12.224
Krr	863.55876

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.9 Ensayo 2 relave (500g) – método de Rosin-Rammler

N° de malla	Diámetro (mm)	Abertura (um)	Masa retenida (g)	%Retenido	% Retenido acumulado	Pasante acumulado	Rosin-Rammler	
					R(X)	F(X)	X	Y
10	2	2000	0	0%	0%	1.00	7.60090246	-
-10 + 40	2	2000	16	3%	3%	1.00	7.60090246	-
-40 + 80	0.425	425	277	56%	59%	0.97	6.05208917	1.233134161
-80 + 100	0.18	180	181	37%	96%	0.41	5.19295685	0.645528839
-100	0.149	149	21	4%	100%	0.04	5.00394631	3.138438406
Total			495	100%		0.00		

Fuente: Elaboración propia.

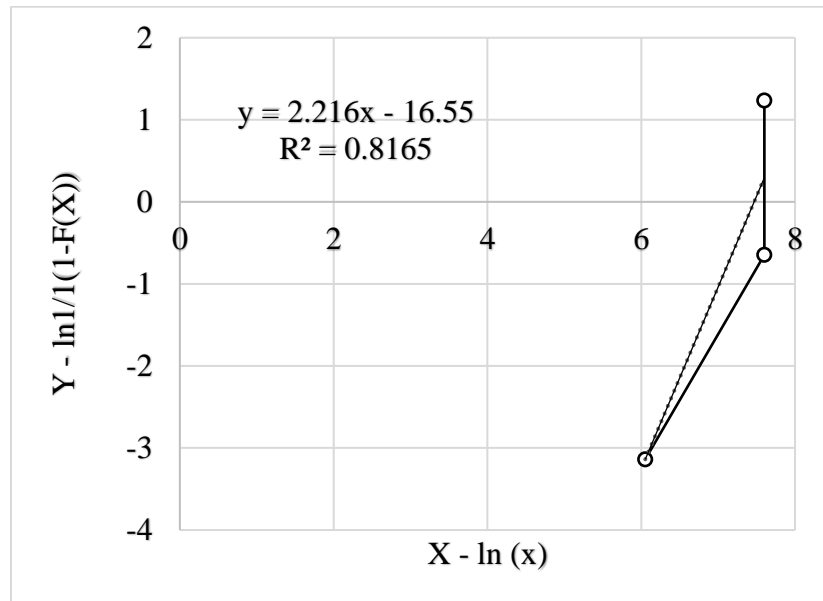


Figura 2.7 Curva granulométrica ensayo 2 por método Rosin Rammler- relave

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.10 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 2 – relave

Rosin-Rammler – ensayo 2	
m	3.5607
lnx	20.136
Krr	285.73586

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de Rosin Rammler

$$F(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{K_{RR}} \right)^m \right] \quad (4)$$

Donde:

F(x): % peso acumulado pasante por cada malla D80 (0.8), D60 (0.6), D50 (0.5) y D25 (0.25).

m: parámetro de distribución.

K_{RR}: Contante de Rosin Rammler (tamaño de la distribución).

X: Tamaño de la partícula (μm).

Tabla 2.11 Determinación de material retenido relave (promedio de ensayo 1 y 2)

	D80	D60	D50	D25
X (μm)	725.085415	550.8013925	481.4454301	317.451527

Fuente: Elaboración propia.

2.1.4 Determinación de la densidad aparente y densidad real de relave

La densidad aparente o densidad de volumen se la entiende como la masa de suelo seco por unidad de volumen de suelo inalterado, interpretando la relación entre sólidos y espacios porosos (Gutiérrez, 2010).

En el experimento, se identificó la densidad aparente del relave, donde se utilizó un vaso de ensayo de 90ml, para determinar masa y volumen del material.



Figura 2.8 Ensayo de densidad aparente y real de relave

Fuente: Elaboración propia.

Formula de densidad aparente

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen total}} = \frac{\text{Peso 2} - \text{peso 1}}{\text{Volumen total}} \quad (5)$$

Donde:

Peso 1: peso (g) del vaso de 90 ml.

Peso 2: peso del vaso (g) + material de relave (g) hasta llegar a 20 ml.

Volumen total: conversión de unidades de gramos a ml (1g = 1 ml).

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{86 \text{ g} - 50 \text{ g}}{86 \text{ ml}}$$

$$\text{Densidad aparente} = 0.41860 \frac{g}{ml}$$

$$\mathbf{Densidad\ aparente = 0.41860 \frac{g}{cm^3}}$$

La densidad de las partículas del suelo o densidad real; se enfoca en la fracción sólida de un suelo (mineral y orgánica) y por otra parte no considera la fase líquida y gaseosa, es por ello que la densidad real es casi constante en un suelo. Es importante mencionar que dicho valor puede ser afectado por materias orgánicas o cambios en la composición mineralógica (Vega, Agil, Bustamante, & Pineda, 2017).

Formula de densidad real

$$\mathbf{Densidad\ Real \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Peso\ 2 - peso\ 1}{(Peso\ 4 - Peso\ 1) - (Peso\ 3 - Peso\ 2)}} \quad (6)$$

Donde:

Peso 1: peso de un matraz aforado vacío (g.)

Peso 2: peso de un matraz aforado (g) + peso del ensayo de densidad aparente (g).

Peso 3: peso de la matanza aforada, consuelo y agua.

Peso 4: peso del matraz aforado (g) con agua.

$$Densidad\ Real \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{76\ g - 40\ g}{(89\ g - 40\ g) - (112\ g - 76\ g)}$$

$$Densidad\ Real \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{36\ g}{13\ g}$$

$$\mathbf{Densidad\ Real = 2.76923 \frac{g}{cm^3}}$$

2.1.5 Determinación de la porosidad del relave

La porosidad la definimos como el porcentaje en volumen de suelo que no es ocupado por partículas sólidas, dichos poros son espacios que suelen alojar agua, gases y actividad biológica. Es por ello, que la porosidad es la relación entre la densidad real y densidad aparente (Guijarro & Dolores, 2019).

Formula de porosidad

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{\text{Densidad Real} - \text{Densidad Aparente}}{\text{Densidad Real}} \times 100 \quad (7)$$

Se realizó el cálculo directo según los datos obtenidos anteriormente:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{2.76923 \frac{g}{cm^3} - 0.41860 \frac{g}{cm^3}}{2.76923 \frac{g}{cm^3}} \times 100$$

$$\% \text{ Porosidad} = \mathbf{84.88 \%}$$

2.1.6 Caracterización mineralógica

Para obtener resultados representativos, se debe utilizar una técnica de muestreo adecuada, para este caso la obtención de una fracción representativa de muestra. En base a ello, se usó el método de cuarteo. El cual consistió en colocar el relave sobre una superficie horizontal para evitar la pérdida de material, hecho lo anterior se procedió a mezclar hasta formar una pila de material homogénea en forma de cono, después se aplanó y se extendió la pila cónica dándole una base circular y finalmente se dividió en cuatro partes iguales, de las cuales se extrajeron 2/4 diagonalmente opuestos. Los dos cuadros restantes se mezclaron uniformemente y se repitió la operación hasta obtener los 1200kg de la muestra requerida y finalmente se envió al laboratorio ELICROM, con el fin de conocer qué tipos

de metales pesados existían en la muestra de relave minero y verificar la presencia de arsénico y plomo.



Figura 2.9 Método de cuarteo – relave

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Obtención de la zeolita

Se realizó la adquisición del material llamado zeolita tipo cálcica a la empresa Ecuaminerales –MINMETEC.



Figura 2.10 Saco de zeolita

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Caracterización físico - química de la zeolita

2.3.1 Gravedad específica del relave

Fórmula de peso específico

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

Donde:

ρ : peso específico (g/cm³).

m: masa inicial (g) (masa del relave, 100g en cada prueba).

v1: volumen inicial (se colocó agua hasta la mitad de cada probeta, en este caso en una probeta de 250 ml son 1000 ml de agua y dos probetas de 250 ml son 125 ml de agua).

v2: volumen final (colocación de la masa de 100 g en cada probeta, la medición del volumen final es la diferencia de nivel al volumen inicial, el agua sube, se dejó reposar 24 h para obtener este resultado).

Tabla 2.12 Ensayos para gravedad específica – zeolita

Datos			
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 1000 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)
Masa (g)	100	100	100
Volumen 1 (ml)	500	500	125
Volumen 2 (ml)	550	548	170

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.13 Resultados peso específico

Resultados			
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 1000 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)
Peso específico (g/ cm³)	2	2.08	2.22

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar los cálculos de la gravedad específica se utilizó la fórmula siguiente:

Fórmula de gravedad específica

$$GM = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

Donde:

GM: gravedad específica

ρ : peso específico (g/cm^3).

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ peso específico del agua (g/cm^3).

Tabla 2.14 Resultados gravedad específica

Resultados				
N°	Prueba 1 (Probeta 1000 ml)	Prueba 2 (Probeta 1000 ml)	Prueba 3 (Probeta 250 ml)	Promedio
Gravedad específica (asimétrico)	2	2.08	2.22	2.10

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.11 Ensayo gravedad específica de la zeolita

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Granulometría de la zeolita

Se determinó la granulometría para partículas finas, debido a que el relave es de poco espesor. Para ello se tomó como alimento 500 gramos de muestra. Luego se sometió a 15 minutos en el tamizador.



Figura 2.12 Ensayo de granulometría con tamices de zeolita

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario remarcar que para el ensayo de granulometría se utilizó los siguientes tamices con las distintas aberturas o diámetros mostrados en la tabla 2.20.

Tabla 2.15 Abertura de tamices, según su malla

Tamices serie ASTM	
N° de malla	Abertura (mm)
10	2
40	0.425
50	0.36
80	0.18
100	0.15
200	0.075

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra los cálculos que se realizó para determinar la granulometría de la zeolita:

Tabla 2.16 Ensayo 1 zeolita (500g) – método de Rosin-Rammler

N° de malla	Diámetro (mm)	Abertura (um)	Masa retenida (g)	%Retenido	% Retenido acumulado	Pasante acumulado	Rosin-Rammler	
					R(X)	F(X)	X	Y
10	2	2000	0	0%	0%	1.00	7.60090246	-
-10 + 40	2	2000	20	4%	4%	1.00	7.60090246	-
-40 + 50	0.425	425	32	6%	10%	0.96	6.05208917	1.16653372
-50 + 200	0.36	360	372	75%	85%	0.90	5.88610403	0.81329728
-200	0.075	75	72	15%	100%	0.15	4.31748811	1.85251334
Total			496	100%		0.00		

Fuente: Elaboración propia.

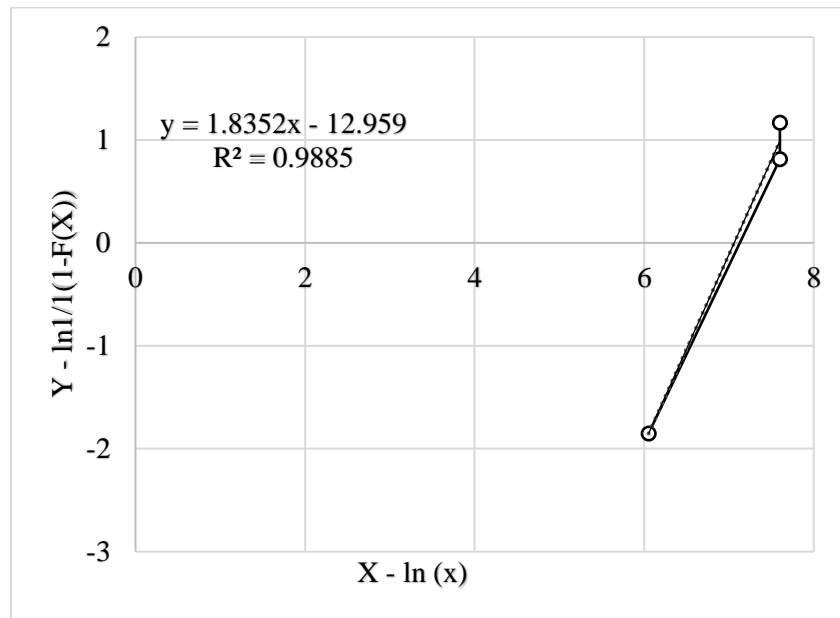


Figura 2.13 Curva granulométrica ensayo 1 por método de Rosin Rammler – zeolita

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.17 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 1 – zeolita

Rosin-Rammier-ensayo 1	
m	1.7241
lnx	9.2995
Krr	220.04425

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.18 Ensayo 2 zeolita (500g) – método de Rosin-Rammler

N° de malla	Diámetro (mm)	Abertura (um)	Masa retenida (g)	%Retenido	% Retenido acumulado	Pasante acumulado	Rosin-Rammler	
					R(X)	F(X)	X	Y
10	2	2000	0	0%	0%	1.00	7.60090246	-
-10 + 40	2	2000	21	4%	4%	1.00	7.60090246	-
-40 + 50	0.425	425	33	7%	11%	0.96	6.05208917	1.1493012
-50 + 200	0.36	360	371	75%	86%	0.89	5.88610403	0.79368238
-200	0.075	75	68	14%	100%	0.14	4.31748811	1.907709152
Total			493	100%		0.00		

Fuente: Elaboración propia.

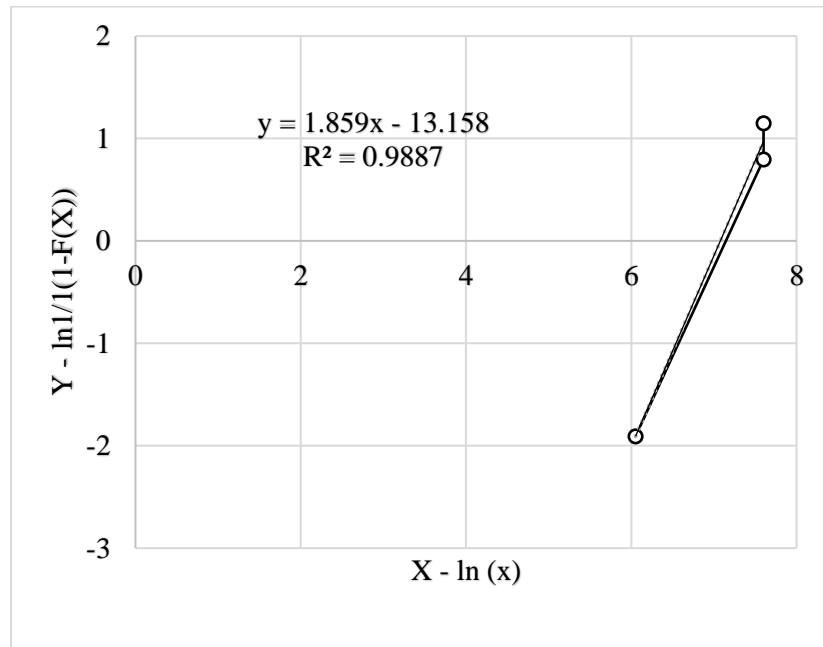


Figura 2.14 Curva granulométrica ensayo 2 por método de Rosin Rammler – zeolita

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.19 Cálculos de m, Lnx y Krr, ensayo 2 – zeolita

Rosin-Rammler-ensayo 2	
m	1.7463
lnx	9.4505
Krr	224.01828

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de Rosin Rammler

$$F(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{K_{RR}} \right)^m \right]$$

Donde:

F(x): % peso acumulado pasante por cada malla D80 (0.8), D60 (0.6), D50 (0.5) y D25 (0.25).

m: parámetro de distribución.

K_{RR}: Contante de Rosin Rammler (tamaño de la distribución).

X: Tamaño de la partícula (μm).

Tabla 2.20 Determinación de material retenido relave (promedio de ensayo 1 y 2)

	D80	D60	D50	D25
X (μm)	292.092038	211.122348	179.755982	108.29139

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Determinación de la densidad aparente y real

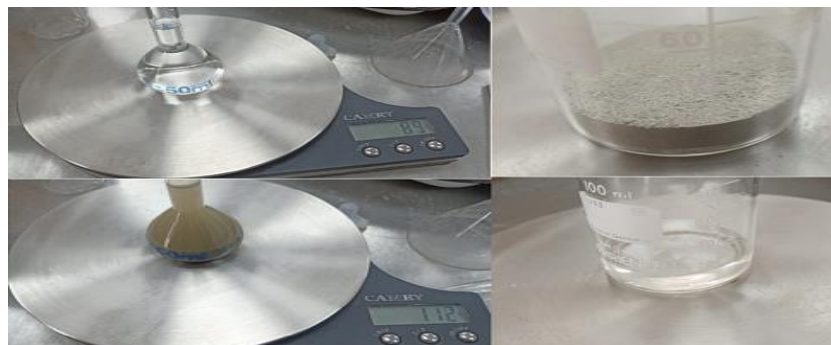


Figura 2.15 Ensayos de densidad aparente y real en zeolita

Fuente: Elaboración propia.

Fórmula de densidad aparente

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen total}} = \frac{\text{Peso 2} - \text{Peso 1}}{\text{Volumen total}}$$

Donde:

Peso 1: peso (g) del vaso de 90 ml.

Peso 2: peso del vaso (g) + material de zeolita (g) hasta llegar a 20 ml.

Volumen total: conversión de unidades de gramos a ml (1g = 1 ml).

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{74 g - 50 g}{74 ml}$$

$$\text{Densidad Aparente} = 0.32432 \frac{g}{ml}$$

$$\text{Densidad Aparente} = 0.32432 \frac{g}{cm^3}$$

Fórmula de densidad real

$$\text{Densidad Real} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Peso 2} - \text{peso 1}}{(\text{Peso 4} - \text{Peso 1}) - (\text{Peso 3} - \text{Peso 2})}$$

Donde:

Peso 1: peso de un matraz aforado vacío (g.)

Peso 2: peso de un matraz aforado (g) + peso del ensayo de densidad aparente (g).

Peso 3: peso del matraz aforada con suelo y agua.

Peso 4: peso del matraz aforado (g) con agua.

$$Densidad Real \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{64 g - 40 g}{(89 g - 40 g) - (96 g - 64 g)}$$

$$Densidad Real \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{24 g}{8 g}$$

$$Densidad Real = 3 \frac{g}{cm^3}$$

2.3.4 Determinación de porosidad

Fórmula porcentaje de porosidad

$$\% Porosidad = \frac{Densidad Real - Densidad Aparente}{Densidad Real} \times 100$$


Se realizó el cálculo directo según los datos obtenidos anteriormente:

$$\% Porosidad = \frac{3 \frac{g}{cm^3} - 0.32432 \frac{g}{cm^3}}{3 \frac{g}{cm^3}} \times 100$$

$$\% Porosidad = 89.19 \%$$

2.3.5 Caracterización mineralógica

	FICHA TÉCNICA AGROLITE	Versión: 2020 Código: PTCZEO001 Fecha: Enero 2020
---	-----------------------------------	--

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO		
Nombre del producto :	Agrolite	
Nombre Químico:	Zeolita	
Clasificación:	Origen Mineral	
<p>Descripción: La clinoptilolita es una zeolita natural perteneciente al grupo de la heulandita. La zeolita está formada por aluminosilicatos cristalinos microporosos, los cuales permiten absorber agua y otros cationes rellenando así los microporos. Además posee múltiples beneficios para el suelo como: mejorar el pH, humedad, aireación, porosidad, densidad y la concentración de nutrientes en el suelo.</p>		

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO			
Características Físicas		Características Químicas	
Color: Marrón - verdoso	Granulometría 40 % máximo retenido en malla 100	Intercambio Catiónico meq/100g	Análisis Químico
pH: 9.8		Mg 1.96	Al ₂ O ₃ 16.87%
Humedad: 7% máx		Ca 54.47	SiO ₂ 63.78%
		K 14.95	Fe ₂ O ₃ 3.54%
		Na 28.20	Na ₂ O 2.15%
		Total: 99.58 meq/100g	MgO 0.78%
			CaO 3.63%
			K ₂ O 2.45%
			Pérdida de Fuego 6.79%

EMPAQUE	
Envase	Sacos de polipropileno Virgen
Tipo	Saco Termolaminado
Capacidad	30 kg.

INFORMACIÓN ADICIONAL	
Presentación	Sacos de polipropileno de 30 kg. Cada saco consta con la información del producto: nombre, lote, razón social, información del fabricante, peso neto.
Almacenamiento	Almacenar los sacos en un lugar fresco, seco y libre de humedad
Vida útil	2 años desde su elaboración

Figura 2.16 Ficha técnica y especificación de la zeolita

Fuente: Empresa ECUAMINERALES, 2020.

2.4 Determinación de las variables a tomar en cuenta para los diferentes ensayos

- Los envases que se utilizó son de un material llamado polipropileno para evitar pérdida de las propiedades del relave o zeolita.
- La malla que se utilizó, es del mismo material que los envases utilizados en la fase de experimentación, esta malla tiene como fin la separación del relave y la zeolita para facilitar la extracción de los mismos.
- Se mezcló uniformemente el relave, antes de su colocación.
- Se colocó el relave y la zeolita sin ser manipuladas con las manos, para que no existan alteraciones.
- La zeolita estuvo sellada hasta el momento en el que se realizó la colocación con su respectivo peso en el envase designado para la fase de experimentación.
- En cada muestra se designó un número, letra y peso de la zeolita, esto para poder identificar de una manera rápida y que no se mezclen las muestras, de los dos tipos de experimentación.
- La muestra de relave fue enviada en una funda plástica de alta para poder conservar las propiedades de relave y que no se pueda alterar hasta la llegada al laboratorio.
- Él envió de las muestras de relave al laboratorio fueron numeradas y con sus respectivas especificaciones, esto nos ayudó a la comparación de las muestras sometidas a las diferentes variantes de zeolita.

2.5 Fase experimental

Primero, se procedió a mezclar el relave varias veces hasta formar una pila en forma de cono, esto con la intención de obtener uniformidad en el relave que se utilizó para la realización de los ensayos. Cabe recalcar que dicho relave no se manipuló de ninguna manera ni se dejó secar.

Segundo, se colocó 5 ensayos con las cantidades de 100, 200, 300, 400 y 500 kilogramos de zeolita y en la parte superior de cada ensayo 500 kilogramos de relave respectivamente, además se dividió la zeolita y relave con una malla especial de material polipropileno.



Figura 2.17 Colocación de zeolita, malla y relave

Fuente: Elaboración propia.

Tercero, se colocó 5 ensayos con las cantidades de 500kg de relave en la parte inferior y en la parte superior de cada ensayo 100, 200, 300, 400 y 500 kilogramos de zeolita respectivamente, aquí se realizó el mismo procedimiento.



Figura 2.18 500 g de zeolita y relave minero

Fuente: Elaboración propia.

Cuarto, se colocó una muestra de relave de 500kg con 0kg de zeolita.



Figura 2.19 Muestra 0AB -relave

Fuente: Elaboración propia.

Quinto, se designó la numeración y peso de la zeolita de todas las 11 muestras.



Figura 2.20 Numeración de ensayos

Fuente: Elaboración propia.

Sexto, se dejó reposar las 11 muestras de relave sometidas a la experimentación con zeolita a la intemperie por un mes.



Figura 2.21 Reposo de 11 ensayos, 1 mes

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego del tiempo establecido (1 mes), se envió las 11 muestras al laboratorio. En este proceso se utilizó el levantamiento de la malla donde se separó el relave de la zeolita y viceversa de las muestras.



Figura 2.22 Culminación de la fase experimental en los ensayos

Fuente: Elaboración propia.

Además, se utilizó fundas plásticas para el empaquetamiento de los relaves y se designó las nomenclaturas correspondientes para la identificación de las muestras.



Figura 2.23 Empaquetado de las 11 muestras de relave

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.21 Tabla de nomenclaturas

Nomenclatura	Arriba/Abajo	Zeolita (kg)	Relave (kg)
1A	Arriba	100	500
2A	Arriba	200	500
3A	Arriba	300	500
4A	Arriba	400	500
5A	Arriba	500	500
1B	Abajo	100	500
2B	Abajo	200	500
3B	Abajo	300	500
4B	Abajo	400	500
5B	Abajo	500	500
0AB	Ninguno	0	500

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

3 Análisis de resultados

3.1 Obtención de resultados obtenidos a través de absorción atómica

Se realizó un pre análisis antes de la fase experimental verificando la existencia de los metales pesados; arsénico y plomo, para la remoción mediante zeolita cálcica, además se pudo constatar 5 metales adicionales a los ya mencionados, como se puede observar a continuación en la figura 3.1.

Locación/ puesto / muestra	Parámetro	Resultado	Unidad
Muestra Análisis 1	ARSÉNICO	299.1219	mg/Kg
	CADMIO	4.6186	mg/Kg
	CROMO TOTAL	33.5999	mg/Kg
	PLOMO	74.6536	mg/Kg
	COBRE	298.7304	mg/Kg
	ZINC	628.7114	mg/Kg
	MERCURIO	0.2439	mg/Kg
	TALIO	0.0000	mg/Kg

Figura 3.1 Preanálisis de metales pesados

Fuentes: Empresa Elicrom, 2022.

Luego se realizó el envío de las muestras al laboratorio de la fase experimental para su análisis y para poder realizar un análisis de los resultados obtenidos, a continuación, se puede observar dichos resultados en la figura 3.2.

Locación / puesto / muestra	Parámetro	Resultado	Unidad
Muestra 1A	ARSÉNICO	214.5337	mg/Kg
	PLOMO	61.9799	mg/Kg
Muestra 2A	ARSÉNICO	208.3498	mg/Kg
	PLOMO	60.5564	mg/Kg
Muestra 3A	ARSÉNICO	204.0731	mg/Kg
	PLOMO	59.9023	mg/Kg
Muestra 4A	ARSÉNICO	205.5344	mg/Kg
	PLOMO	58.9999	mg/Kg
Muestra 5A	ARSÉNICO	203.7765	mg/Kg
	PLOMO	59.1032	mg/Kg
Muestra 1B	ARSÉNICO	170.6712	mg/Kg
	PLOMO	49.7899	mg/Kg
Muestra 2B	ARSÉNICO	162.3391	mg/Kg
	PLOMO	48.0876	mg/Kg
Muestra 3B	ARSÉNICO	160.7621	mg/Kg
	PLOMO	46.2333	mg/Kg
Muestra 4B	ARSÉNICO	156.1998	mg/Kg
	PLOMO	45.7456	mg/Kg
Muestra 5B	ARSÉNICO	151.3967	mg/Kg
	PLOMO	42.9788	mg/Kg
Muestra 0AB	ARSÉNICO	309.1214	mg/Kg
	PLOMO	76.5999	mg/Kg

Figura 3.2 Resultados de las muestras

Fuentes: Empresa Elicrom, 2023.

3.2 Análisis de los resultados

Primero se analizó la absorción del arsénico mediante la zeolita colocada en la parte superior e inferior del relave minero, donde se determinó el porcentaje de remoción en las diferentes cantidades administradas de zeolita en los recipientes, para ello se utilizó la siguiente formula:

Fórmula de porcentaje de remoción

$$\% \mathbf{RZ} = \left(\frac{Rr * 100\%}{R0AB} \right) - 100\% \quad (8)$$

Donde:

%RZ= porcentaje de remoción de la zeolita.

Rr = resultado del relave expuesto a la zeolita cálcica.

R0AB= muestra principal del relave sin exposición a la zeolita.

A continuación, se adjuntará los resultados obtenidos del porcentaje de remoción del arsénico con la zeolita en la parte superior e inferior del relave.

Tabla 3.1 Tabla del porcentaje de remoción de arsénico por parte de la zeolita parte superior

Muestra	Relación	Zeolita (kg)	Relave (kg)	Parámetro	Resultado de la muestra principal de relave 0AB (mg/kg)	Resultado relave (mg/kg)	% de remoción de la zeolita
1A	1:5	100	500	Arsénico	309.1214	214.5337	30.5988
2A	2:5	200	500	Arsénico		208.3498	32.5993
3A	3:5	300	500	Arsénico		204.0731	33.9828
4A	4:5	400	500	Arsénico		205.5344	33.5101
5A	5:5	500	500	Arsénico		203.7765	34.0788

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 Tabla del porcentaje de remoción de arsénico por parte de la zeolita parte inferior

Muestra	Relación	Zeolita (kg)	Relave (kg)	Parámetro	Resultado de la muestra principal de relave 0AB (mg/kg)	Resultado relave (mg/kg)	% de remoción de la zeolita
1B	1:5	100	500	Arsénico	309.1214	170.6712	44.7882
2B	2:5	200	500	Arsénico		162.3391	47.7837
3B	3:5	300	500	Arsénico		160.7621	47.9938
4B	4:5	400	500	Arsénico		156.1998	49.4697
5B	5:5	500	500	Arsénico		151.3967	51.0235

Fuente: Elaboración propia.

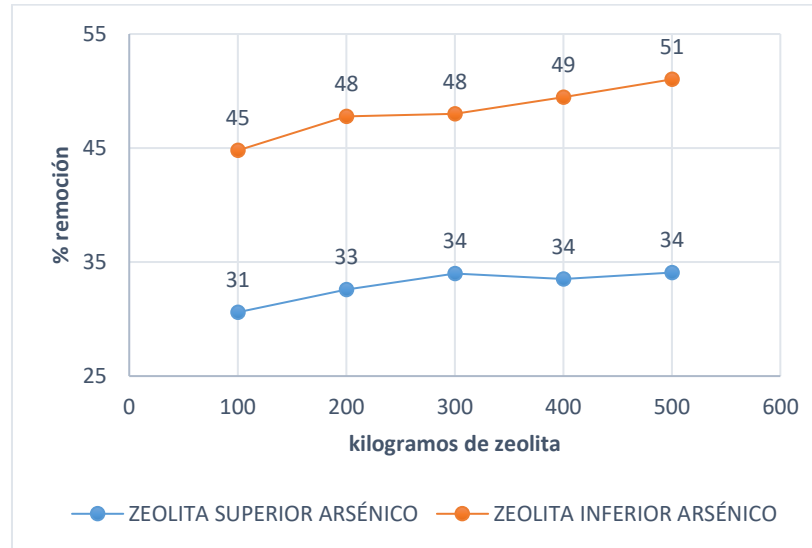


Figura 3.3 Porcentaje de remoción de arsénico

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.3 el porcentaje de remoción de arsénico donde la zeolita se encuentra en la parte superior del relave, se logra destacar un incremento de remoción del arsénico de un 30% con 100 kilogramos de zeolita a un 34% con 500 kilogramos de zeolita, además es importante recalcar que de 300 kilogramos de zeolita a 500 kilogramos tenemos datos casi similares, esto debido a que el relave se colocó en la parte inferior y posiblemente fue afectado por la gravedad y la densidad del material. Además, en el porcentaje de remoción de arsénico donde la zeolita se encuentra en la parte inferior, se puede enfatizar un incremento considerable en la remoción del arsénico por parte de la zeolita cálcica siendo de un 44% con 100 kilogramos de zeolita a un 51% con 500 kilogramos de zeolita, esto debido a que el relave se colocó en la parte inferior de la zeolita, favoreciendo a una absorción más eficaz debido a la densidad del material y gravedad.

Finalmente, se realizó el análisis de absorción del plomo con la zeolita colocada en la parte superior e inferior, de igual manera se utilizó la fórmula anterior para la determinación del porcentaje de remoción de la zeolita. A continuación, se adjunta los resultados obtenidos.

Tabla 3.3 Tabla del porcentaje de remoción del plomo por parte de la zeolita parte superior

Muestra	Relación	Zeolita (kg)	Relave (kg)	Parámetro	Resultado de la muestra principal de relave 0AB (mg/kg)	Resultado relave (mg/kg)	% de remoción de la zeolita
1A	1:5	100	500	Plomo	76.5999	61.9799	19.0861
2A	2:5	200	500	Plomo		60.5564	20.9445
3A	3:5	300	500	Plomo		59.9023	21.8084
4A	4:5	400	500	Plomo		58.9999	22.9777
5A	5:5	500	500	Plomo		59.1032	22.8416

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Tabla del porcentaje de remoción de plomo por parte de la zeolita parte inferior

Muestra	Relación	Zeolita (kg)	Relave (kg)	Parámetro	Resultado de la muestra principal de relave 0AB (mg/kg)	Resultado relave (mg/kg)	% de remoción de la zeolita
1B	1:5	100	500	Plomo	76.5999	49.7899	35.0000
2B	2:5	200	500	Plomo		48.0876	37.2223
3B	3:5	300	500	Plomo		46.2333	39.6431
4B	4:5	400	500	Plomo		45.7456	40.2798
5B	5:5	500	500	Plomo		42.9788	43.8918

Fuente: Elaboración propia.

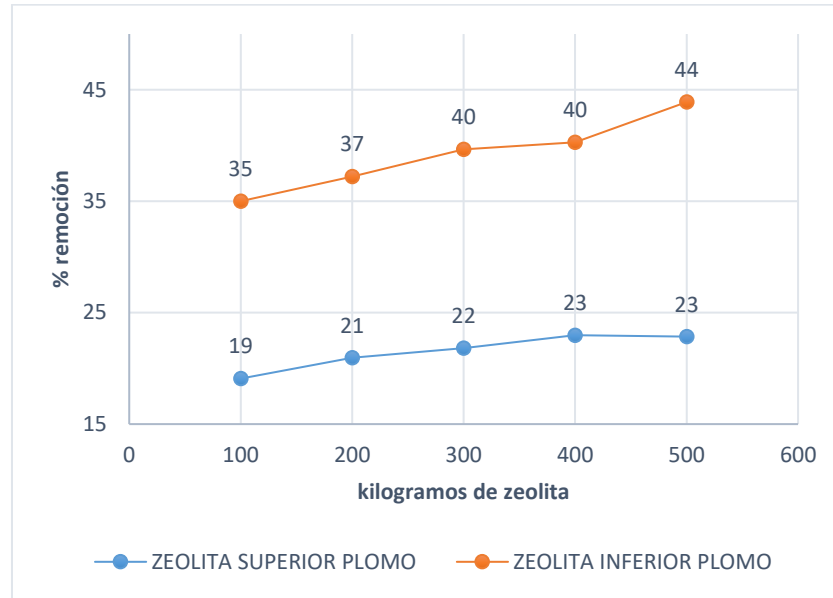


Figura 3.4 Porcentaje de remoción de plomo

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.4 se puede observar un incremento de remoción del plomo con la zeolita en la parte superior de un 19% con 100 kilogramos de zeolita a un 22% con 500 kilogramos de zeolita, de igual manera que la remoción del arsénico en 300 kilogramos de zeolita a 500 kilogramos obteniendo valores casi similares esto debido a que pudo ser afectado por la gravedad y la densidad del material. Además, de igual manera que en la remoción del arsénico podemos recalcar que los valores de remoción del plomo incrementan de un 35% con 100 kilogramos de zeolita a un 43% con 500 kilogramos de zeolita, esto debido a la densidad del material y la gravedad.

Es importante mencionar que en la relación de zeolita y relave 5:5, tanto en la experimentación de zeolita en la parte superior y en la parte inferior, tenemos el porcentaje de remoción más alto que en las anteriores.

3.3 Comparación de los resultados

Se realizó el análisis de la remoción de la zeolita en los dos tipos de experimentación y con las variables en relación a la cantidad de zeolita, se pudo comparar datos y se concluyó que la experimentación es más conveniente para el proyecto de tesis.

Tabla 3.5 Tabla de comparación de experimentación del porcentaje de remoción superior e inferior

Relación	Zeolita parte inferior y relave parte superior		Zeolita parte superior y relave parte inferior	
	% de remoción		% de remoción	
	Arsénico	Plomo	Arsénico	Plomo
1:5	44.7882	35.0000	30.5988	19.0861
2:5	47.7837	37.2223	32.5993	20.9445
3:5	47.9938	39.6431	33.9828	21.8084
4:5	49.4697	40.2798	33.5101	22.9777
5:5	51.0235	43.8918	34.0788	22.8416

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla anterior 3.5, tenemos que la relación 5:5 es la que tuvo el más alto porcentaje de remoción de todos los anteriores; teniendo un 51% de remoción de arsénico y un 43% de plomo en la experimentación de la zeolita en la parte inferior del relave, además un 34% de remoción de arsénico y 22% de plomo en la experimentación de la zeolita en la parte superior del relave, demostrando que la relación 5:5 (500kg de zeolita y relave) de zeolita en la parte inferior es la que tiene el más alto porcentaje de

remoción de las dos. Es por ello que se determinó que la relación 5:5 en la experimentación de zeolita en la parte inferior del relave es la más eficiente teniendo un porcentaje de remoción de 51% en arsénico y 43% en plomo.

3.4 Determinación de la alternativa más óptima para el tratamiento del relave y remoción de metales pesados

Ya realizado el análisis y la comparación de datos se llegó a determinar que la alternativa más óptima para el tratamiento de relave y remoción de los metales pesados arsénico y plomo es la experimentación de zeolita en la parte inferior del relave minero y la relación 5:5. Esto quiere decir que al tener volúmenes idénticos se obtiene una mejor remoción de dichos metales, además se realizó un diseño de ejemplo en 3D de cómo se debe realizar el tratamiento con la relación seleccionada.

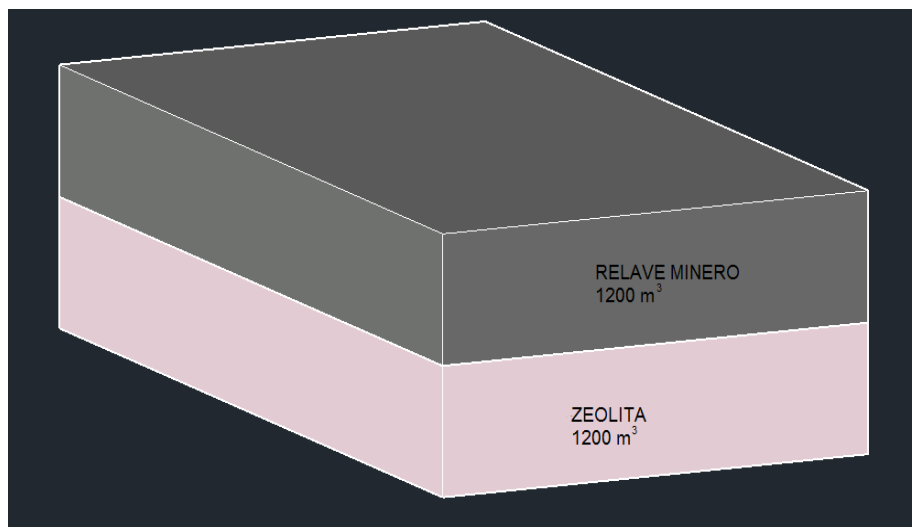


Figura 3.5 Ejemplo para tratamiento de relave minero

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Los ensayos de gravedad específica concluyeron que el relave tiene una mayor densidad con $2,62 \text{ g/cm}^3$, a comparación de la zeolita con un 2.10 g/cm^3 .
- Las pruebas de granulometría, reflejaron que la zeolita presenta un tamaño característico del 40% pasante malla 100, lo que significa que sus partículas son más finas que el relave minero, donde su retenido no pasaba menos del 40% en malla 100.
- En los cálculos de Rosin Rammler la zeolita tiene un menor tamaño de partículas que el relave minero, en relación al porcentaje de peso acumulado que pasa por cada malla D80, D60, D50 y D25.
- En los ensayos de densidad aparente, densidad real y porosidad de la zeolita y relave, demuestran que la zeolita tiene una mayor capacidad de para almacenar fluidos, por su porcentaje de porosidad, las cuales son de relave minero con 84.88% y la zeolita con 89.19%.
- El relave tiene un tamaño de partícula mayor en comparación a la zeolita, por lo cual el relave tiene una menor superficie y en si menor porosidad, acorde a los cálculos realizados.
- Los ensayos de las muestras “1A, 2A,3A, 4A y 5A ”, obtuvo una remoción del 30% al 34% de arsénico y de un 19% al 22% de plomo, y en las muestras “1B, 2B, 3B, 4B y 5B” se obtuvo valores de remoción del 44% al 51% en arsénico y del 35% al 43% en plomo.
- La investigación demostró que la relación 5:5 parte inferior “5B” es la más óptima de los ensayos de absorción, con un 43% de plomo y 51% de arsénico.
- El ensayo de la muestra 5:5 (5B), demuestra que la relación de volumen para una absorción eficiente es del 50% de relave minero en la parte superior y 50% de volumen de zeolita en la parte inferior.

- Al finalizar se concluyó que la absorción de zeolita puede ser utilizada en la remediación de metales pesados de plomo y arsénico en relaves mineros en plantas de beneficio.

Recomendaciones

- Realizar el método de cuarteo, para tener una muestra representativa y obtener datos reales en la caracterización de la muestra de relave minero.
- Utilizar sacos impermeables, para evitar la pérdida de humedad en la muestra del relave minero
- Usar tamices para partículas más finas, si el retenido del material pasa más del 40% en la malla 100. Realizar el ensayo de las 11 muestras a la intemperie, para obtener un mejor criterio de como funcionaria en su aplicación en una relavera.
- Es importante usar una malla N° 50 (abertura de 0.36 mm), para impedir el contacto directo de zeolita y relave minero en la fase experimental de los ensayos, y a su vez para la facilitación en la separación de las mallas al finalizar el tiempo de experimentación.
- Para futuros ensayos, se recomienda reducir el tiempo de experimentación de 30 días, con el propósito de determinar la efectividad en los resultados de absorción de plomo y arsénico.
- Utilizar envases de polipropileno, ya que evita la pérdida de las propiedades de zeolita y relave minero.
- La zeolita debe estar sellada en su respectiva bolsa, hasta iniciar la fase de experimentación en laboratorio y así mismo en los 11 ensayos con el relave minero, esto para evitar la mezcla contaminante externa.
- Utilizar fundas plásticas Zipper de alta calidad, conservará las propiedades del relave minero, sin verse alteradas hasta su análisis en laboratorio.
- Utilizar guantes y mascarilla para evitar el contacto directo con el relave y zeolita.
- Para la aplicación a gran escala del método de absorción por zeolita en una relavera, se recomienda colocar un aislante de plástico para evitar el contacto directo de la zeolita con el suelo base.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abin, Aquino, Rodríguez, Santellano, Rodríguez, & Cortés. (2019). *Copper Removal by Acid-Conditioned Zeolite, Part II: Kinetics, and Thermodynamic Studies*.
Obtenido de Journal of Environment and Earth Science:
<https://core.ac.uk/download/pdf/234665429.pdf>
- Aposhian, H. (1989). *Biochemical toxicology of arsenic*. Obtenido de EPA United States Environmental Protection Agency:
https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/67675
- Arrieta, L. G. (03 de 03 de 2011). "*Determinación de la gravedad específica de un suelo de Sabana a una profundidad de 300 a 450 mm ubicado en Jusepin, estado Monagas*". Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de Oriente:
<http://201.249.180.234/handle/123456789/1887>
- ASOPROMIN S.A. (2023). *Informe de diseño y construcción*. Portovelo :
ASOPROMIN S.A.
- ATSDR. (1999). *Resúmenes de Salud Pública - Cadmio (Cadmium)*. Obtenido de ATSDR Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades:
<https://www.atsdr.cdc.gov/es/>
- ATSDR. (06 de 05 de 2016). *Resúmenes de la Salud Pública - Plomo (Lead)*. Obtenido de ATSDR en Español: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.pdf
- Ávila, K. G. (2020). *dspaceuazuay*. Obtenido de Propuesta de obtención de pellets de carbón-arcilla-zeolita para la remediación de suelos afectados por actividades mineras: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10392/1/16018.pdf>
- Bellido, O., Alberto, J., Ancori, M., & Adelaida. (20 de 11 de 2020). *Remoción de cobre Cu (II) y arsénico As (V) de aguas residuales de mina, por adsorción con zeolita natural en proceso batch*. Obtenido de SUNEDU:
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3220248>

- Buchet, & Lison. (2000). *Clues and uncertainties in the risk assessment of arsenic in drinking water*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278691599001301>
- Chamorro, M. J. (2008). *Efectividad de biosólidos para la fitoestabilización de un tranque de relaves minero, en la comuna de Nogales*. Obtenido de Repositorio Académico de la Universidad de Chile:
file:///C:/Users/pc/Downloads/lobos_m.pdf
- D.S.N.84. (2022). *Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras*. Obtenido de SERNAGIOMIN: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Guia-Metodologica-Cierre-Faenas-Mineras-CM.pdf>
- Durango, C. C. (2022). *Viabilidad técnica del proceso de vitrificación como alternativa al manejo de relaves mineros*. Obtenido de doi.org:
file:///C:/Users/pc/Downloads/EscobarCristian_2022_ViabilidadTecnicaProceso.pdf
- Fernández, M. M. (02 de 2018). *La contaminación del suelo por plomo y sus consecuencias sobre la salud humana*. Obtenido de E-Prints Complutense:
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/62982/>
- Guijarro, J., & Dolores, J. (2019). *Apuntes de Edafología*. Obtenido de RUA (Repositorio Intitucional de la Universidad de Alicante):
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/13283>
- Gutiérrez, A. M. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del parque Natural los Alcornocales*. Obtenido de Difital csic:
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Herrera, G. E., & Cajavilca, K. M. (2021). *Análisis de los métodos de tratamientos biológicos en procesos mineros para la gestión de aguas residuales y relaves*. Obtenido de repositorio ucsp:

http://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/20.500.12590/16746/1/ARENAS_HERRERA_GAB_RES.pdf

Ibarra, A., Lerma, S., Figueroa, M., Franco, M., & Moreno, P. (2013). *Evaluación de la potencialidad de una chabasita natural mexicana en la remoción de plomo en agua*. Obtenido de Revista Internacional de Contaminación Ambiental: <https://www.redalyc.org/pdf/370/37028275006.pdf>

Ignacia, C., & Oñate, B. (2019). *repositorio unab*. Obtenido de “Caracterización mineralógica y su relación con el potencial de contaminación del relave abandonado, ‘Dulcinea’ ubicado en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso”: <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/13590>

Król, M. (2020). *Natural vs. Synthetic Zeolites*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-4352/10/7/622>

Lenntech. (2012). *Plomo y agua: mecanismos de reacción, impacto ambiental y efectos en la salud*. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/plomo-y-agua.htm>

Lenntech. (2012). *Propiedades químicas del Plomo - Efectos del Plomo sobre la salud - Efectos ambientales del Plomo*. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>

Liu, J., Wu, P., Li, S., Chen, M., Cai, W., Zou, D., . . . Dang, Z. (2019). *Synergistic deep removal of As(III) and Cd(II) by a calcined multifunctional MgZnFe-CO₃ layered double hydroxide: Photooxidation, precipitation and adsorption*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519304412?via%3Dihub>

Méndez, P., Ramírez, G., Gutiérrez, R., & García, P. (2009). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua*. Obtenido de redalyc.org: <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Moreno, A. R., & Palacios, T. (2017). Tratamiento de drenaje ácido de mina con el uso de zeolita natural a escala experimental. *FIGEMPA*, 30.

- Pérez, E., Valencia, S., & Rey, F. (19 de 10 de 2022). *Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects*. Obtenido de National Library of Medicine: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9801387/>
- Ramo, L., Castillo, S., Sánchez, H., & Coronado, G. (2001). *Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales*. Obtenido de Revista Internacional de Contaminación Ambiental: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25522>
- Ramos, D. C. (18 de septiembre de 2018). *Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética*. Obtenido de redalyc : <https://www.redalyc.org/journal/4988/498858250004/html/#:~:text=Las%20ventajas%20de%20emplear%20arcillas,f%C3%ADsica%20y%20elevada%20%C3%A1rea%20superficial.>
- Rodríguez, B., Larrahondo, & Cobos. (diciembre de 2018). *Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia*. Obtenido de scielo : http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302018000200005
- Rossmann, T. (2007). *Environmental and Occupational Medicine*. Obtenido de STUDENTS AIU: http://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/F5h6X8_Environmental_and_Occupational_Medicine-_4th.pdf
- Sernageomin. (2018). *Depósito de Relaves*. Obtenido de sernageomin : <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>
- Sernageomin. (2022). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. Obtenido de Sernageomin: <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Teijlingen, K. v. (2019). *Los depósitos de relaves en Ecuador y sus riesgos socio-ambientales*. Obtenido de geografiacriticaecuador:

<https://geografiacriticaecuador.org/wp-content/uploads/2020/08/Van-Teijlingen-2019-Informe-sobre-los-riesgos-de-las-relaveras.pdf>

Tuty, Tine, & Siti. (2017). *Treatment of Wastewater Containing Hexavalent Chromium Using Zeolite Ceramic Adsorbent in Adsorption Column*. Obtenido de ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/316360054_Treatment_of_Wastewater_Containing_Hexavalent_Chromium_Using_Zeolite_Ceramic_Adsorbent_in_Adsorption_Column

Vega, J., Agil, C., Bustamante, R., & Pineda, I. (27 de 07 de 2017). *Determinación de la Densidad Real*. Obtenido de issuu:

https://issuu.com/edafologia27/docs/densidad_real_de_suelo

Yang, R. T. (2001). *Nanostructured adsorbents*. Obtenido de ScienceDirect:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065237701270045?via%3Dihub>

ANEXOS



Anexo 1. Recolección de muestras en la planta de Beneficio PLAYITAS

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 2. Muestras de relave - 50 kg cada costal

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 3. Muestra de relave

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4. Muestra de zeolita

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 5. Christian Lescano colocando material en tamiz

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 6. Jampier Reinoso tamizando relave

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 7. Secado de muestras para ensayo de humedad

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 8. Jampier Reinoso en recolección de muestras

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 9. Christian Lescano cuarteando relave minero

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 10. Jampier Reinoso mezclando relave minero

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 11. Ensayo con tamices para determinación granulométrica

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 12. Lescano y Reinoso separando las muestras de zeolita y relave minero

Fuente: Elaboración propia.



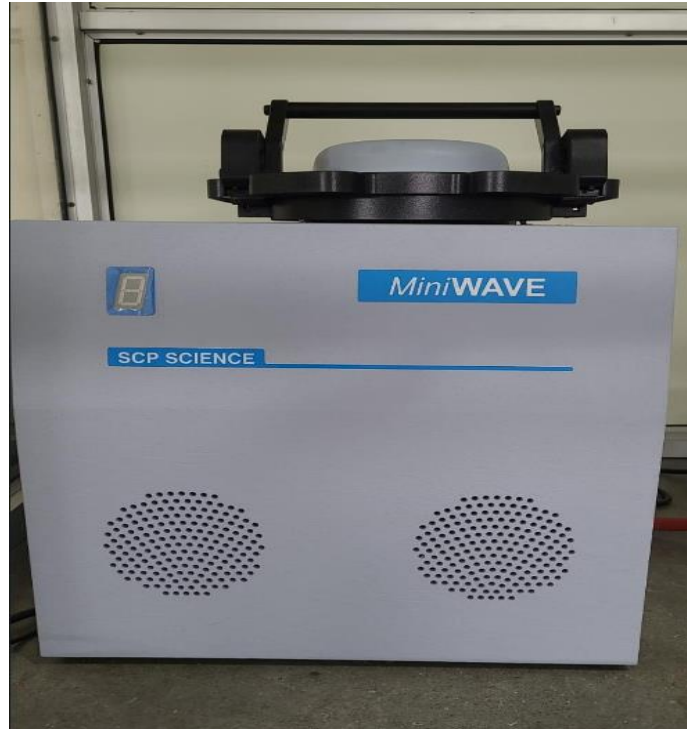
Anexo 13. Empaquetado de los 11 ensayos

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 14. Espectrofotómetro de absorción atómica (mide concentración de metales)

Fuente: Empresa Elicrom, 2023.



Anexo 15. Sistema de digestión de muestras

Fuente: Empresa Elicrom, 2023.