

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Lixiviación Alcalina para la Remoción de Arsénico en un Mineral Aurífero de la Mina Miraflores, en el sitio Cerro Azul, Cantón Atahualpa de la Provincia de El Oro.

### **PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia  
Extractiva**

Presentado por:

Espinoza Ramón Washington Omar

Reyes Rodríguez Oscar Leonardo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

## **DEDICATORIA**

Dedico principalmente este proyecto a Dios que me ha permitido tener salud y sabiduría para cumplir con esta meta; a mi madre que me dio el apoyo emocional para obtener esta tesis, aunque ya no está con nosotros por la pandemia actual; también dedico con todo mi corazón esta tesis a mi adorada familia, mis hijos y a mi esposa, por ser el pilar fundamental para lograrlo, gracias a su paciencia, apoyo y constancia cumpla un objetivo más, esto es por y para ustedes.

### **Washington Espinoza Ramón**

Dios mediante, dedico esta tesis con mucho amor y cariño a la persona que llenando de amor y alegría mi vida me dio la fortaleza para lograr este objetivo más en mi formación académica, brindándome su apoyo, y confianza para realizarlo, esto es para ti K.V.

### **Oscar Reyes Rodríguez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primeramente a Dios por permitirnos culminar este proyecto, gracias por no dejarnos rendir y mantenernos firmes cada día para lograrlo, a nuestras familias y cada persona que intervino dentro de esta realización.

De la misma manera agradecemos a la Escuela Superior Politécnica del Litoral por el apoyo brindado para la elaboración de nuestro proyecto.

A los laboratorios Metalor y Plenge por su eficiente trabajo en la realización de los diferentes pruebas y análisis que se llevaron a cabo dentro de este trabajo.

**Washington Espinoza**

**Oscar Reyes**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ing. Washington Omar Espinoza Ramón, Ing. Oscar Leonardo Reyes Rodríguez* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

*Ing. Washington Omar Espinoza Ramón*

---

*Ing. Oscar Leonardo Reyes Rodríguez*

## EVALUADORES

---

PhD. Juan María Menéndez

TUTOR

---

PhD. Samantha Jiménez

EVALUADOR

---

M.Sc. Kenny Escobar

EVALUADOR

## RESUMEN

Se conoce que a lo largo de los años en el cantón Atahualpa, Provincia de El Oro, República del Ecuador, se han establecido varias concesiones mineras en las que comúnmente lo que se extrae es el material aurífero, rico en metales como el oro, plata y cobre. En general, se han presentado dificultades en su aprovechamiento, debido a la presencia de un elemento contaminante como es el arsénico, que ha obligado a muchas empresas mineras a desistir de la extracción de este mineral valioso.

Por ello, y en contribución a la realización de esta actividad productiva, se ha desarrollado este proyecto de Lixiviación Alcalina en donde se ha logrado una remoción de este elemento contaminante en un 90.909% de manera técnica y ambientalmente amigable.

En base a este proceso de lixiviación alcalina se puede separar el arsénico del mineral sin verse afectadas las concentraciones de oro, plata y cobre en el material y; además, cabe recalcar que dicho proceso no genera ningún tipo de gas contaminante a la atmósfera.

**Palabras Clave:** remoción de arsénico, lixiviación alcalina, material aurífero, minerales arseniosos

## **ABSTRACT**

It is known that over the years in the canton of Atahualpa several mining concessions have been established in which commonly what is extracted is the gold-bearing material, rich in metals such as gold, silver and copper, since they have generated difficulty in their use, due to the presence of a pollutant element such as arsenic, which has forced many mining companies to desist from the extraction of this valuable ore.

For this reason and as a contribution to the realization of this productive activity, this alkaline leaching project has been developed, where a 90,909% removal of this contaminating element has been achieved in a technically and environmentally friendly manner.

Based on the alkaline leaching process, arsenic can be separated from the ore without affecting the concentrations of gold, silver and copper in the material, and it should also be noted that this process does not generate any type of polluting gas into the atmosphere.

**Keywords:** arsenic removal, alkaline leaching, gold-bearing material, arsenic minerals

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del Problema .....	1
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Marco teórico .....	4
1.4.1 Definiciones.....	4
1.4.2 Antecedentes .....	5
1.4.3 Depósitos minerales en el Ecuador .....	6
1.4.4 Termodinámica y cinética de la lixiviación .....	12
1.4.5 Procesos heterogéneos en la metalurgia extractiva .....	13
1.4.6 Cinética de la Lixiviación .....	13
1.4.7 Procesos heterogéneos en la Metalurgia Extractiva .....	15
1.4.8 Cinética de las reacciones en sistemas heterogéneos.....	16
1.4.9 Dependencia de la velocidad de reacción .....	16
1.5 Metales pesados.....	19
1.6 El arsénico en el ambiente.....	20
1.7 Contaminación del arsénico y su impacto en la salud.....	20

1.8	Tratamiento y estabilidad de metales generados en lixiviación-----	21
CAPÍTULO II-----		23
2.	METODOLOGÍA-----	23
2.1	Materiales y Métodos-----	24
2.1.1	Materiales -----	24
2.1.2	Equipo experimental-----	25
2.1.3	Proceso para muestreo -----	25
2.1.4	Métodos de Análisis Metalúrgicos -----	27
2.1.5	Desarrollo del Método de Ensayo al Fuego en el mineral de la mina -----	30
2.1.6	Preparación de la solución lixivante -----	31
2.2	Plan Experimental-----	32
2.2.1	Pruebas cinéticas para determinar el efecto de las variables. -----	32
CAPÍTULO III -----		35
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS -----	35
3.1	Caracterización inicial del mineral de estudio-----	35
3.1.1	Ensayo al fuego del mineral -----	35
3.1.2	Análisis por absorción atómica del mineral-----	35
3.1.3	Análisis por Difracción de Rayos x -----	35
3.2	Remoción de arsénico por lixiviación alcalina en el mineral -----	38
3.2.1	Proceso de lixiviación alcalina con adición de calor -----	38
3.2.2	Proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor -----	39
3.2.3	Resultados del proceso de lixiviación alcalina con adición de calor-----	40
3.2.4	Resultados después del proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor	41
3.3	Efectos de las variables -----	42
3.4	Resultados del tratamiento de lixiviación alcalina -----	43
CAPÍTULO IV-----		44
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	44
4.1	Conclusiones -----	44

4.2 Recomendaciones ----- 44

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
MAPE	Minería artesanal y en pequeña escala
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
MERNNR	Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.

## SIMBOLOGÍA

mg	Miligramo	Bi	Bismuto
pH	Potencial de Hidrógeno	Cd	Cadmio
µg	Microgramo	Co	Cobalto
Al	Aluminio	Cr	Cromo
Ca	Calcio	Mo	Molibdeno
Cu	Cobre	Ni	Níquel
Fe	Hierro	P	Fósforo
K	Potasio	Sb	Antimonio
Mg	Magnesio	Sc	Escandio
Mn	Manganeso	Sn	Estaño
Na	Sodio	Sr	Estroncio
Pb	Plomo	V	Vanadio
Ti	Titanio	W	Wolframio
Zn	Zinc	Y	Itrio
Ag	Plata	Zr	Circonio
As	Arsénico	Au	Oro
Ba	Bario	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
Be	Berilio	CN <sup>-</sup>	Cianuro
Si	Silicio	NaOH	Hidróxido de Sodio
S	Azufre		
C	Carbono		

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de Zonas MAPE de oro en Ecuador. ....	7
Figura 1.2 Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar. ....	14
Figura 1.3 Variación de la constante de la velocidad con la temperatura.....	17
Figura 1.4 Perfil de reacción con y sin catalizador. ....	18
Figura 1.5 El efecto del área de la superficie de la pirita sobre la velocidad de oxidación. .....	18
Figura 2.1 Proceso de trituración (izquierda) y Pulverización (derecha) de la muestra.	24
Figura 2.2 Pesado de reactivos .....	26
Figura 2.3 Etiquetado de soluciones .....	27
Figura 2.4 Lixiviación de la muestra .....	33
Figura 2.5 Filtración de soluciones .....	34
Figura 3.1 Lixiviación alcalina sin adición de calor .....	39
Figura 3.2 Lixiviación alcalina sin adición de calor .....	40
Figura 3.3 Comparación de Lixiviación alcalina con y sin adición de temperatura. ....	42
Figura 3.4 Comparación de Lixiviación alcalina a concentraciones diferentes. ....	42
Figura 3.5 Resultados del tratamiento de lixiviación alcalina.....	43

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.1 Tipo de Reacciones Heterogéneas.....	15
Tabla 3.1 Ensayo al fuego del mineral. ....	35
Tabla 3.2 Análisis por adsorción atómica del mineral.....	35
Tabla 3.3 Análisis de difracción de rayos X. ....	36
Tabla 3.4 Análisis de multielementos presentes en el cuarzo. ....	36
Tabla 3.5 Remoción de arsénico con adición de calor. ....	38
Tabla 3.6 Proceso de lixiviación alcalina sin la adición de calor.....	39
Tabla 3.7 Resultados después del proceso de lixiviación alcalina con adición de calor. .....	41
Tabla 3.8 Resultados despues del proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor.	41

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria minera en la Provincia de El Oro es actualmente una de las principales fuentes de ingresos económicos para el desarrollo social en el Sur de Ecuador. Los primeros metales descubiertos fueron el oro (Au), cobre (Cu), y plata (Ag), y se los halla de manera natural con otros elementos existen en la naturaleza para formar una variedad de minerales (Mestanza-Ramón et al., 2022).

El arsénico es un elemento químico natural de la tabla periódica, se encuentra distribuido en la corteza terrestre, y se lo puede encontrar en estado puro en la tierra y/o constituyendo una variedad de minerales, pero no como elemento principal (Yesares et al., 2019). La mayor concentración de arsénico se encuentra en sulfuros como piritita, calcopiritita y galena. Por tanto, perjudica directamente la extracción de minerales valiosos en procesos como la lixiviación con cianuro, debido a que el arsénico actúa como agente cianicida, que consume cianuro libre de la solución lixivante (Aylmore, 2016).

La importancia de recuperar oro radica en optimizar el uso y aprovechamiento de los minerales para generar mayores ganancias y rentabilidad (Ardelean et al., 2021). La ventaja del pretratamiento de lixiviación alcalina antes de la cianuración es que el consumo de cianuro de sodio se reduce en un 70% y la tasa de recuperación de oro aumenta en un 80%, para este tipo de minerales (Ubal dini et al., 2000).

En el presente trabajo, se detalla el proceso propuesto para la eliminación del arsénico, un metaloide y componente tóxico significativo, que se puede encontrar en las disoluciones de lixiviación aurífera.

### 1.1 Descripción del Problema

La minería en el Ecuador es en la actualidad una de las fuentes principales de ingresos económicos para el desarrollo de la sociedad, y la extracción de oro (Au) es el objetivo de los mineros de la localidad de Cerro Azul, del cantón Atahualpa perteneciente a la provincia de El Oro.

El principal problema del desarrollo de actividades de explotación de este mineral en el sector de Cerro Azul, es la presencia abundante del elemento arsénico que se encuentra en proporciones desde un 4% a 15% en peso, afectando directamente al proceso de extracción de oro por lixiviación con cianuro, flotación, entre otros. Este elemento As conjuntamente con el cobre, hierro, antimonio, actúan como cianicidas (consumen cianuro sin beneficios al proceso), causando un excesivo consumo de cianuro, entre 300 y 350 kg t<sup>-1</sup>. Pese al esfuerzo económico y las acciones técnicas ejecutadas, la recuperación y aprovechamiento de oro oscila entre 30% y 40%, por ende, se considera una baja eficiencia de los procesos.

Si analizamos los minerales de los yacimientos del subsuelo de los cantones Portovelo y Zaruma, vecinos del cantón Atahualpa, son minerales exentos o con baja cantidad de As, por lo que el procesamiento es económicamente más rentable; tal es el caso que para procesar la misma cantidad de mineral se utiliza aproximadamente 50 kilos de cianuro pudiendo lixiviar hasta un 93% del oro presente.

Esta es una de las principales razones por las cuales los mineros del sitio Cerro Azul tienden al abandono de las menas de estos yacimientos, provocando el desperdicio de minerales por su alto contenido de contaminantes, además de conflictos socioeconómicos como desempleo.

La presencia del arsénico en los minerales de esta zona ha perjudicado al minero artesanal de tal manera que en muchos casos han optado por abandonar sus actividades mineras del lugar, es por ello que, se ha planteado en este proyecto la eliminación del arsénico como material contaminante desde el mineral, otorgando al minero un mineral con bajo contenido de arsénico y presto para realizar cualquier tipo de procesos metalúrgicos para su aprovechamiento, sin alterar la composición de los elementos valiosos (Cu, Ag y Au).

Entre los problemas que se presentan tenemos la granulometría de molienda, puesto que para mejor liberación del arsénico el mineral debe estar un 60% debajo de malla 200 (escala Tyler), molienda acorde a las pruebas metalúrgicas.

En base a las múltiples pruebas metalúrgicas realizadas debemos recalcar que los procesos de lixiviación alcalina son inmediatos por cuanto la velocidad de reacción de los reactantes provoca la extracción máxima del arsénico desde el mineral en el menor tiempo. Por las diferentes concentraciones de los reactantes utilizados podemos decir que es económicamente factible el procesamiento.

## **1.2 Justificación del problema**

Se elabora este proyecto de eliminación de arsénico en minerales por lixiviación alcalina, con la finalidad de evitar que los mineros del sector Cerro Azul, perteneciente al cantón Atahualpa, tengan problemas en la recuperación de oro, tanto por el método de lixiviación con cianuro como por flotación al momento de procesar estos minerales auríferos con alto contenido de arsénico.

La aplicación del proceso de este proyecto de eliminación de arsénico de los minerales previo a los procesos de lixiviación optimizará el aprovechamiento de los minerales generando mayor utilidad y rentabilidad a la mina Miraflores y otras cercanas del sitio Cerro Azul del cantón Atahualpa, de la Provincia de El Oro.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Aplicar el proceso de lixiviación alcalina para la remoción de arsénico de hasta un 60% en un mineral aurífero de la mina Miraflores, en el sitio Cerro Azul, mediante el uso de un reactor experimental

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del presente proyecto de investigación son:

1. Identificar las asociaciones mineralógicas del yacimiento de la mina Miraflores del sitio Cerro Azul, mediante la aplicación de metodologías químicas y ópticas.

2. Verificar la eficiencia de la lixiviación alcalina en agitadores mecánicos a escala de laboratorio en condiciones de adición de calor a diferentes concentraciones de reactantes
3. Determinar el porcentaje de remoción de arsénico aplicando la lixiviación alcalina como pretratamiento del mineral de la mina Miraflores

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Definiciones

**Agentes lixiviantes:** Son sustancias químicas, como el cianuro y el ácido sulfúrico, que tienen la propiedad para disolver selectivamente uno o más elementos que se encuentran en rocas o minerales (Puga Usucachi, 2014).

**Arsénico:** Elemento químico cuyo símbolo es (As) está presente en la corteza terrestre junto con otros minerales, es altamente tóxico y se encuentra en la naturaleza en cuatro estados de oxidación distintos (arsénico, arsenito, arseniato y arsina) (Montoya et al., 2015).

El Ecuador, tiene una incidencia significativa de este metal pesado dentro de su territorio, debido a la presencia volcánica la cual, le ha permitido moverse en todo el país pudiéndose encontrar en sedimentos acuíferos, relaveras de montañas y menas de minerales (Borgnino & Mlewski, 2019).

**Lixiviación:** También conocida extracción sólido-líquido, percolación o elución, es técnicamente una operación de transferencia de masa basada en la separación de una o más sustancias (soluto) contenidas en una matriz sólida generalmente triturada o pulverizada (inerte), mediante el uso de un solvente líquido.

**Lixiviación Alcalina:** Es una separación que se da principalmente desde una materia prima sólida en un líquido. La lixiviación alcalina difiere por el uso de un medio básico (NaOH y otros agentes de lixiviación), esta transición del metal al medio acuoso permite separar el metal contenido en la fase sólido de los

insolubles. La energía requerida para que se permita la disolución es proporcionada por la agitación bajo presión y la cantidad de iones hidroxilo presentes en una solución de lavado básico o alcalino.

#### **1.4.2 Antecedentes**

Uno de los principales métodos utilizados en el proceso metalúrgico de extracción de oro es la lixiviación con cianuro, cuando el mineral tiene las mejores propiedades metalúrgicas, es decir, cuando la concentración de arsénico elemental es baja, la lixiviación con cianuro es económicamente rentable (Santamaría Roncancio et al., 2013).

Caso que no sucede en algunos yacimientos auríferos del Ecuador debido a que existen zonas donde la presencia de este contaminante es abundante, tal como sucede en el cantón Camilo Ponce Enríquez y en el cantón Atahualpa. Esto trae la necesidad de buscar y brindar soluciones a los mineros artesanales asociados y pequeños mineros involucrados en el tema, en especial a los mineros de la mina Miraflores y minas cercanas, por medio de la aplicación de un pretratamiento del mineral que permita optimizar los procesos de recuperación de oro de estas menas.

Una vez pretratado el mineral se puede cumplir con los procesos metalúrgicos de recuperación del oro, cumpliendo con las especificaciones requeridas de exportaciones como es el caso del primer comprador mundial de concentrados minerales, la República Popular de China, el cual exige un límite permisible máximo de 0,5% del contaminante arsénico (As) (Sabastegui & Arboleda, 2019).

Existen varios procesos de lixiviación documentados que están disponibles en la literatura científica, los cuales nos han servido como punto de referencia para realizar estas investigaciones aplicadas a los minerales contaminados de esta zona de Cerro Azul, dando resultados muy positivos. Se han realizado operaciones a nivel piloto, lográndose los objetivos trazados, el cual era reducir el contenido del contaminante arsénico hasta un límite permisible, para un mejor procesamiento posterior.

### 1.4.3 Depósitos minerales en el Ecuador

Ecuador es un país con potencial minero, existen reservas de oro, plata y cobre, además de distintos minerales. Tiene una ubicación estratégica y un clima adecuado, propicio para el desarrollo de actividades económicas en general, entre las que destaca la industria minera. Posee además una abundante riqueza geológica, se ha descubierto yacimientos minerales entre ellos oro, plata, cobre, molibdeno, hierro y titanio, los cuales se encuentran distribuidos principalmente en las provincias de El Oro, Pichincha, Bolívar, Esmeraldas, Imbabura, Zamora Chinchipe, Napo y Sucumbíos (MERNNR, 2020).

Se conoce que el Ecuador cuenta con depósitos minerales de alta calidad, también es un hecho que se ha explorado la parte más pequeña del territorio (alrededor del 8%), por lo que se deduce que la escala de recursos minerales será mayor que los datos conocidos actualmente (MERNNR, 2020).

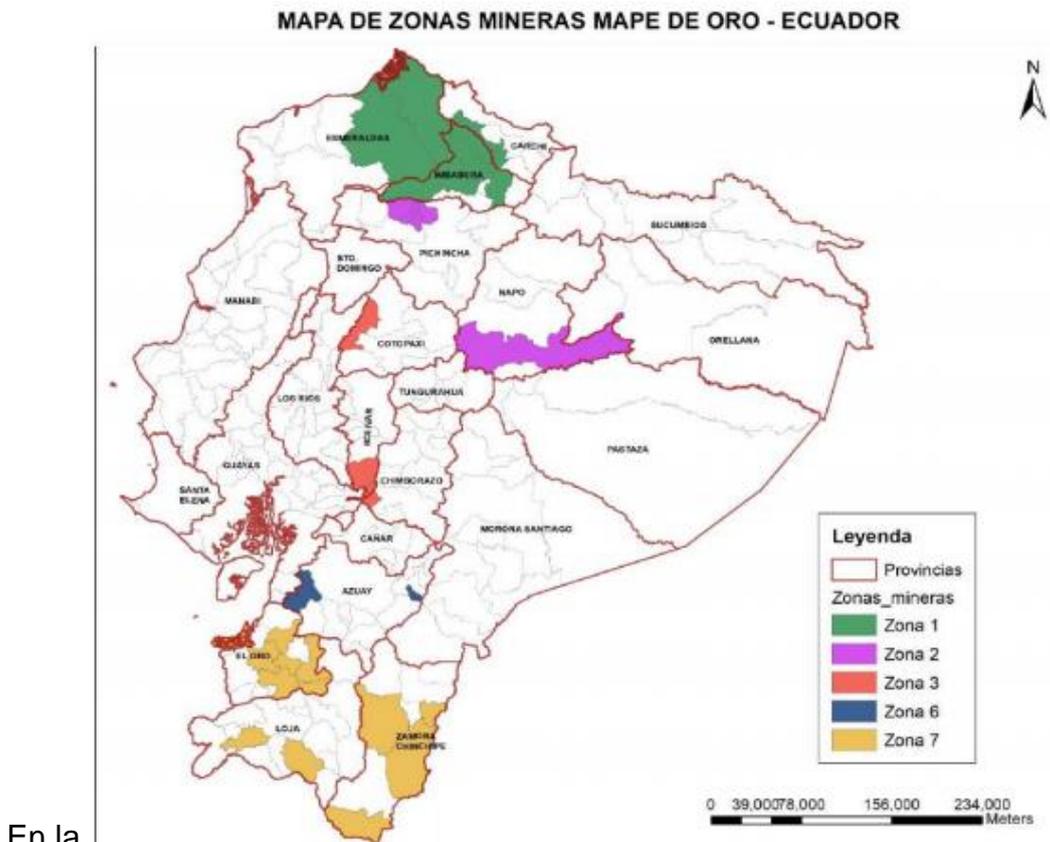
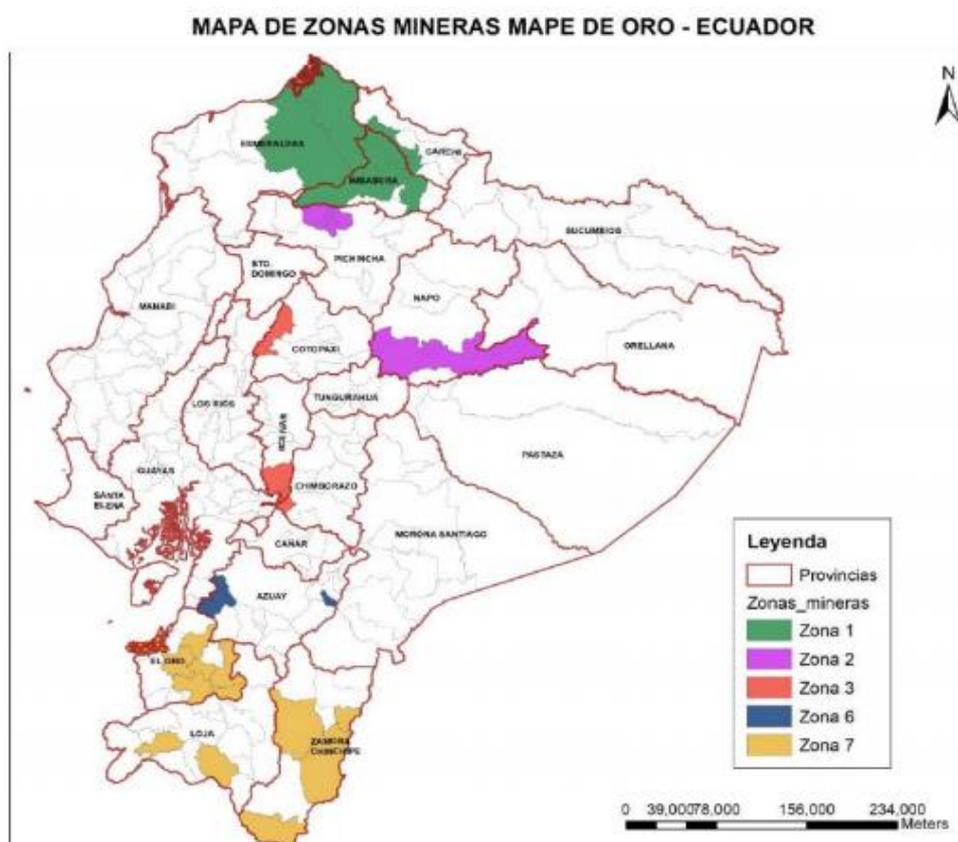


Figura 1. 1 Mapa de Zonas MAPE de oro en Ecuador.

se muestran "los sitios mineros " a la que pertenecen según el área de SENPLADES, con las provincias y cantones en los que se ubican, lo que posibilita la ubicación geográfica del sitio minero. Por otro lado, existen áreas mineras ubicadas en diferentes cantones, como el sitio minero Zaruma-Portovelo localizado en cuatro cantones de la provincia de El Oro, El sitio minero Cumandá se ubica en Chimborazo y Bolívar, en dos cantones de diferentes provincias. A diferencia de estas mineras dos sitios mineros, en el cantón de Tena de la provincia de Napo, se han identificado tres áreas mineras en un estado (MAE, 2020).



**Figura 1. 1 Mapa de Zonas MAPE de oro en Ecuador.**  
**[Fuente: Línea De Base Nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador febrero 2020]**

#### **1.4.3.1 Comercialización de los minerales**

Los minerales son recursos no renovables, a diferencia de otros que pueden ser reemplazados, por lo que es necesario controlar su comercialización. Este control

se produce de esta manera porque es necesario proteger el nivel internacional de flujo de suministro de mineral, requerido por la necesidad de apoyar la capacidad instalada de la planta de procesamiento industrial hegemónica mundial del país central y mantener el nivel de desarrollo a costo de los países productores (Gutierrez Falcon, 2017).

La comercialización de minerales incluye una atención general a la producción y mercados de consumo a nivel mundial (Sonderegger et al., 2020). Los principales minerales metálicos con mayor demanda y producción son: cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), aluminio (Al), níquel (Ni) y estaño (Sn). Sus precios en el mercado también son significativos, los minerales y metales clasificados como preciosos son el oro (Au) y la plata (Ag) (Puga Usucachi, 2014).

La comercialización de minerales define la relación oferta-demanda de productos minerales, basada en el cálculo de los tipos y cantidades de productos minerales que los diferentes actores de la industria producirán y consumirán en el futuro (Bustamante Rúa et al., 2008).

### **1.4.3.2      *Procesos y productos de los minerales para su comercialización***

#### **1.4.3.2.1      *Concentrados***

Es un producto mineral que ha sido expuesto diversos procesos (flotación, lixiviación, gravimetría, etc.) para poder separar la mayor parte de la ganga del mineral y recuperar el contenido valioso (Ruiz-Córdoba et al., 2019). El concentrado lleva el nombre del metal que más porcentaje contiene y puede ser cobre, plomo, zinc y otros concentrados. Los concentrados que contienen metales importantes y van acompañados de otros elementos, además de materiales residuales, se convierten en un elemento pagables y/o penalizados en la negociación, dependiendo de las condiciones operativas del comprador o refinería que procesará el concentrado (SNMPE, 2015).

#### 1.4.3.2.2 *Metales Fundidos*

Los concentrados se procesan en otros lugares y otra infraestructura en un proceso completamente diferente al de concentración. Por lo general, son procesados por otras empresas en un horno de reverberación para eliminar impurezas y contenido de azufre para obtener metales de mayor pureza para que puedan ser utilizados en acerías, manufactureras, galvanizadoras, etc.

Sin embargo, debe aclararse que, considerando la aplicación de deducciones estándar fuera del control de cualquiera de las partes, los productores de concentrados no recibirán el 100% del valor de los metales finos recuperables.

#### 1.4.3.2.3 *Procesos de Lixiviación*

Muchos minerales se encuentran incluidos en diferentes componentes en un sólido. Para separar los minerales necesarios o eliminar los minerales no deseados de la fase sólida, se pone en contacto con una fase líquida. Las dos fases están en contacto y se separan desde el sólido a la fase líquida. Este proceso se llama lixiviación líquido-sólido o lixiviación (Gutierrez Falcon, 2017). La lixiviación o extracción sólido-líquido es una operación unitaria en la que se utiliza un disolvente líquido para separar los minerales preciosos de la fase sólida pulverizada.

La lixiviación de materiales preciosos se usa comúnmente en procesos metalúrgicos. Los metales útiles suelen concentrar una gran cantidad de metales nocivos; la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles, por ejemplo: las sales de cobre se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias mediante una solución de ácido sulfúrico (Gutierrez Falcon, 2017).

#### 1.4.3.2.4 *Agentes de lixiviación*

El agente de lixiviación es una solución química utilizada para la extracción selectiva de metales en minerales. El  $H_2SO_4$  y la sal  $CN^-$  son los agentes de lixiviación más utilizados en el proceso de lixiviación (Puga Usucachi, 2014).

Para llevar a cabo eficazmente el proceso de lixiviación, se deben considerar los siguientes factores:

- Liberar minerales y concentrados metalúrgicos para recuperar minerales preciosos. Los factores económicos casi siempre determinan el tamaño de las partículas a procesar.
- El uso del agente de lixiviación correcto puede lixiviar fácilmente los componentes solubles en el mineral o concentrado.

La elección de un agente de lixiviación depende de algunos factores:

- Las propiedades físicas y químicas del material que se está lixiviando.
- Costo del agente lixivante y aspectos ambientales.
- El efecto corrosivo de los agentes lixiviantes y los materiales de construcción.
- Decidir sobre la selectividad de los constituyentes a lixiviar.
- Capacidad de regenerarse, por ejemplo, al lixiviar zinc con ácido sulfúrico, el ácido se regenerará durante la electrólisis (Puga Usucachi, 2014).

En este orden de apreciación se pueden clasificar los agentes lixiviantes en los siguientes grupos:

- Agua
- Soluciones de sales acuosas
- Soluciones ácidas
- Soluciones básicas

#### **1.4.3.3 Métodos de lixiviación de sulfuros**

Los métodos de lixiviación de especies sulfuradas pueden dividirse en dos grupos:

- a) En ausencia de agentes oxidantes
- b) En presencia de agentes oxidante

#### **1.4.3.4 Lixiviación en ausencia de agentes oxidantes**

En ausencia de un oxidante, se lixivian muy pocos sulfuros. Sin embargo, los casos conocidos se pueden clasificar de acuerdo con las siguientes tres posibles opciones de tratamiento que se muestran a continuación:

- a) Sulfuros solubles en medio ácido
- b) Sulfuros solubles en medio alcalino

c) Sulfuros que forman complejos solubles.

#### 1.4.3.4.1 Sulfuros solubles en medio ácido.

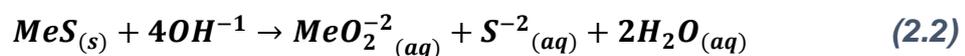
Se usan temperaturas superiores a 100 °C para aumentar la velocidad de reacción con presiones de 4 a 10 atmósferas ya que si se lo hace a condiciones de ambiente el proceso es sumamente lento. Cuando son sometidos a la lixiviación con un ácido, estos sulfuros liberan ácido sulfhídrico según como se indica en la siguiente reacción general (Puga Usucachi, 2014).



La lixiviación llevada por este medio es muy ventajosa frente a los métodos convencionales por cuanto los elementos que se encuentran en la mena (Pb, Sb, Zn, Cu, etc) no interfieren con el azufre residual, permitiendo su eliminación durante el proceso. Así mismo, se obtiene una muy alta recuperación del Au y elementos nobles que allí se encuentren y permite la regeneración del lixivante incrustando sales o en su defecto precipitándolas (Palacios, 2002).

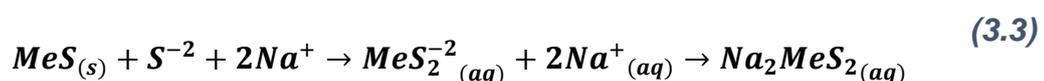
#### 1.4.3.4.2 Sulfuros solubles en medio alcalino.

En este proceso también es conveniente trabajar a condiciones similares (100 °C y entre 4 y 10 atm de presión), cuando se usa un medio alcalino, éste forma con el metal un anión estable, según se observa de la reacción general (Puga Usucachi, 2014):



#### 1.4.3.4.3 Sulfuros que forman complejos solubles.

Los complejos solubles formados por los sulfuros aparecen con la aplicación de NaCN y Na<sub>2</sub>S. Aquí se produce un tiocomplejo del metal demostrado en la siguiente reacción general (Puga Usucachi, 2014).



#### **1.4.3.5 Lixiviación en presencia de agentes oxidantes.**

En la industria, para lixiviar estas especies minerales con sulfuros se utilizan agentes oxidantes siendo estos los más utilizados:

- Oxígeno ( $O_2$ ) y Peróxido de Hidrógeno ( $H_2O_2$ ).
- Ión Férrico ( $Fe^{3+}$ ).
- Ácido Nítrico ( $HNO_3$ ).
- Ácido Sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- Gas Cloro disuelto ( $Cl_2$ )
- Hipoclorito de Sodio ( $NaClO$ ).

La lixiviación en presencia de agentes oxidantes puede ser de 2 tipos: Químico o electroquímico.

##### **1.4.3.5.1 Tipo Químico.**

Este tipo de mecanismo puede producir azufre en su forma elemental que es cuando estos sulfuros son solubles en agua o en forma de sulfatos que se dan en un medio con un pH 7, lentos a condiciones normales, pero sumamente rápidos a temperaturas altas.

##### **1.4.3.5.2 Tipo Electroquímico.**

En este mecanismo se da la producción de azufre de tipo molecular porque en estos casos se trata de diluir sulfuros insolubles en ácido. Este proceso se distingue entre las reacciones de oxidación y de reducción.

### **1.4.4 Termodinámica y cinética de la lixiviación**

#### **1.4.4.1 Termodinámica**

La lixiviación incluye la disolución de sólidos o parte de sólidos en el sistema, produciendo reacciones de hidrólisis, oxidación o reducción de minerales. El comportamiento de los elementos disueltos y la precipitación de nuevos compuestos están controlados por variables como temperatura, pH, presión y concentración de iones. Por tanto, la reacción de lixiviación es heterogénea. El

objetivo principal es obtener la disolución completa o parcial de iones metálicos económicamente valiosos, que pueden extraerse selectivamente de la solución mediante un tratamiento de concentración posterior (Vera, 2019).

La forma más conveniente de expresar la termodinámica de un sistema acuoso es gráficamente en un diagrama de Pourbaix o un diagrama de pH potencial. Estos diagramas son ampliamente utilizados por los hidro-metalurgistas porque permiten visualizar la posibilidad de reacciones sin tener que recurrir a cálculos termodinámicos para fenómenos que ocurren en medios acuosos (Restrepo, 2018).

#### **1.4.5 Procesos heterogéneos en la metalurgia extractiva**

##### **1.4.5.1 *Energía de activación***

Esta reacción ocurre cuando las partículas o moléculas chocan entre sí, aquí los parámetros que afectan la velocidad de la reacción son necesarios para que la reacción ocurra, el estado de energía de un reactivo debe ser mayor que el promedio de las otras partículas.

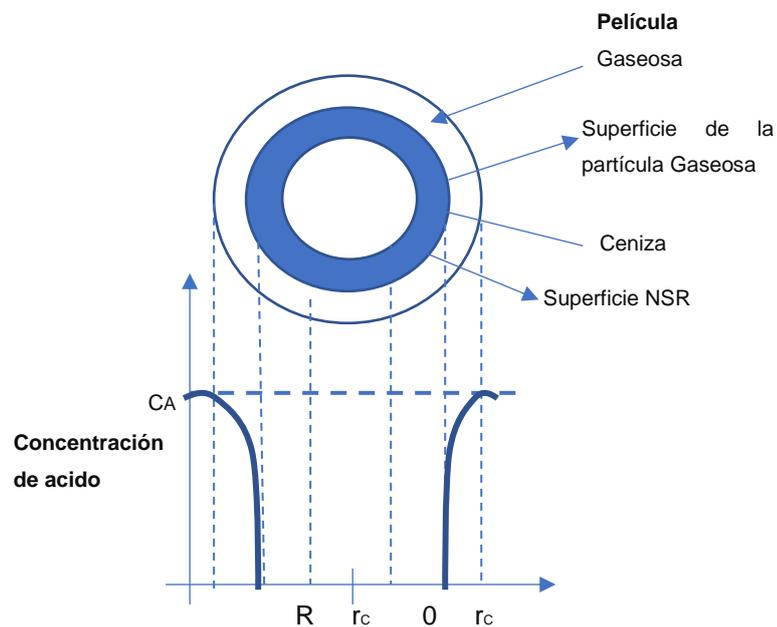
La energía de activación de una reacción química es directamente proporcional a la velocidad, cuanto mayor sea la energía de activación, más lenta será la reacción. En resumen, cuanto más alta es la barrera energética, menos energía tiene una molécula para superarla en un tiempo determinado (OpenStax College, 2013).

##### **1.4.6 Cinética de la Lixiviación**

Cuando la solución ácida está en contacto con minerales de cobre, las sustancias mineralizadas (especialmente los óxidos) y la ganga reaccionarán según sus velocidades características, y determinarán conjuntamente el consumo de oxidantes (Vera, 2019).

Para comprender el comportamiento de la cinética heterogénea, se muestra un modelo nuclear sin reaccionar (Esquema del modelo del núcleo sin reaccionaFigura 1. 2). En este modelo, la reacción ocurre primero en la superficie exterior de la partícula, formando una zona de reacción superficial que se mueve hacia el interior del sólido. A medida que avanza el oxidante, en cualquier

momento habrá una zona de reacción porosa (llamada capa de ceniza) que convierte completamente el material y un área interna de material sin reaccionar, que disminuye de tamaño a medida que avanza la lixiviación (Vera, 2019).



**Figura 1. 2 Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar.**

**[Fuente: (Vera, 2019)]**

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** permite conocer el comportamiento parabólico de las sustancias disueltas a lo largo del tiempo, cuando existen condiciones aceptables, no se producirá precipitación ni formación de compuestos cinéticos retardados, que se mencionarán más adelante. Las siguientes son las diversas etapas del mecanismo de lixiviación de partículas minerales (Vera, 2019):

1. El reactivo lixivante ( $H^+$ ,  $Fe^{3+}$ ) atraviesa la capa de confinamiento y se difunde preferentemente a los minerales de óxido y a la superficie de las partículas.

2. Reactivos difunden al interior de la partícula hacia la zona del elemento de interés.
3. Las reacciones químicas o electroquímicas ocurren en superficies sólidas, incluida la adsorción y desorción en superficies sólidas y/o mediante dobles capas electroquímicas.
4. Los productos solubles de la reacción ( $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) se difunden desde el interior de la partícula a la superficie de la partícula.
5. Productos solubles difunden a través de la capa limitante hacia el seno de solución.

#### **1.4.7 Procesos heterogéneos en la Metalurgia Extractiva**

El proceso hidrometalúrgico es una reacción heterogénea que incluye fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. Existen muchas opciones para el comportamiento del sólido durante la lixiviación, dependiendo de su naturaleza y pureza. En varios casos, el tamaño del sólido no cambia con el tiempo debido a la baja concentración de sustancias reactivas en el sólido o la formación de productos sólidos que ocupan el volumen del sólido removido (Jerez, 2015).

La información termodinámica se puede utilizar para determinar la posición de equilibrio y la energía contenida. Esta información suele ser suficiente para reacciones rápidas, como muchas reacciones llevadas a cabo a altas temperaturas. Sin embargo, muchos procesos importantes, especialmente la hidrometalurgia, se llevan a cabo en condiciones de velocidad de reacción baja o media. En este caso, la información cinética es esencial para el diseño del proceso (Puga Usucachi, 2014).

Según la naturaleza de la interfaz, cualquier reacción heterogénea en curso se divide en las siguientes categorías: sólido-gas, sólido-líquido, sólido-sólido, líquido-gas y líquido-líquido. La siguiente tabla da ejemplos de diferentes Tipo de Reacciones Heterogéneas. En todos estos casos, las moléculas de reactivo tienden a pasar de una fase a otra.

**Tabla 1. 1 Tipo de Reacciones Heterogéneas.**

Interfase	Tipo	Ejemplos
Sólido-gas		Físico: Adsorción
	S1+G -> S2	Químico: Oxidación de metales
	S1 -> S2+G	Descomposición de carbonatos y sulfatos
	S1+G1 -> S2+G2	Oxidación de sulfuros o reducción gaseosa de óxidos
Sólido-Líquido	S -> L	Físico: Fundición
	S1+L1->L2	Disolución, Cristalización
	S1+L1->S2+L2	Químico: lixiviación de sulfuros
	S2+L2->S1+L1	Cementación
Sólido-Sólido	S1->S2	Físico: Sinterización, transformación de fases
	S1+S2->S3+G	Químico: Reducción de óxidos por carbón
	S1+S2->S3+S4	Reducción de óxidos o haluros por metales
Líquido-gas	L-> G	Físico: Destilación, condensación y absorción
	L1+G1 -> L2+G2	Químico; Fabricación de aceros por el proceso
	L1+G -> L2	Absorción de gases en agua
Líquido-Líquido		Extracción por solventes orgánicos
	L1 -> L2	Reacción escoria-metal
		Extracción metal líquido de metal líquido

[Fuente: (Puga Usucachi, 2014)]

#### 1.4.8 Cinética de las reacciones en sistemas heterogéneos

La velocidad de reacción es una expresión cuantitativa de los cambios en la composición del sistema a lo largo del tiempo. Por tanto, es conveniente comprobar la dependencia general de la dinámica heterogénea antes de considerar las expresiones de velocidad y las leyes experimentales. Para ello, se analizará la velocidad de reacción, la influencia de la temperatura y la relevancia de la teoría de la velocidad de reacción total (Romero Bonilla et al., 2020).

La expresión de dinámica global debe contener diferentes procesos ( $v_i$ ), incluyendo la transmisión física y las fases de reacción; si los caminos son paralelos e independientes:  $v = \sum (v_i)$ , y si son continuos, todas las fases son estables Bajo el estado, pasará  $v = v_j$  a la misma velocidad.

### 1.4.9 Dependencia de la velocidad de reacción

La velocidad de reacción en sistemas heterogéneos depende fundamentalmente de:

**a) Naturaleza de las sustancias**

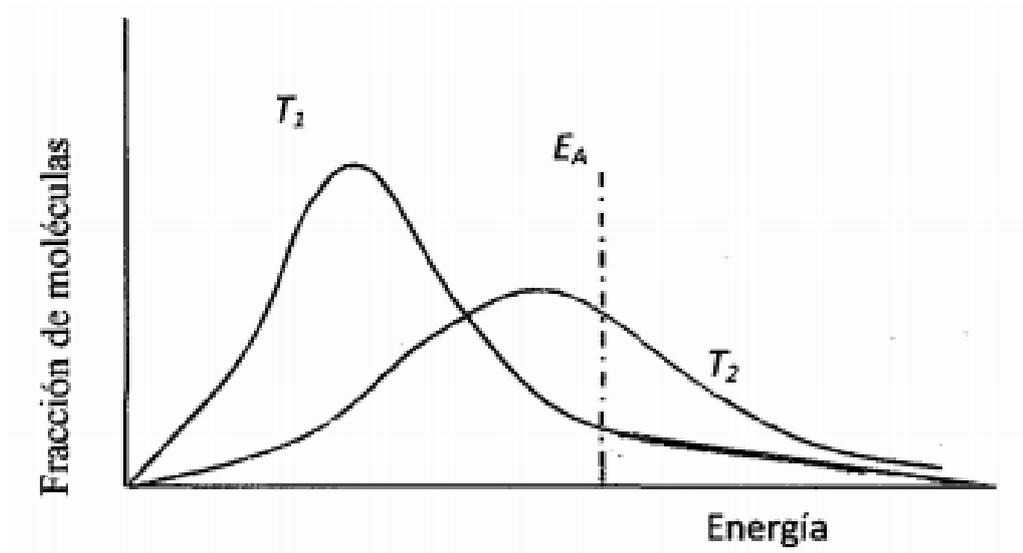
Determina la estructura y la energía del complejo de activación de la interfaz a través del cual pasará la reacción.

**b) Concentración de reactantes fluidos**

Afecta el proceso químico de la superficie y la velocidad de transporte. En la ecuación de velocidad, se observa la influencia de los reactivos o al menos algunos de ellos sobre la velocidad de reacción. En términos generales, a medida que aumentan estas concentraciones, es más probable que se produzcan colisiones entre moléculas y la velocidad aumentará.

**c) Temperatura**

Aumentará la constante de velocidad y así la velocidad de reacción, porque la fracción de moléculas que exceden la energía de activación es mayor. Por lo tanto, en comparación con  $T_1$ , un mayor porcentaje de moléculas en  $T_2$  tienen suficiente energía para producir una reacción.

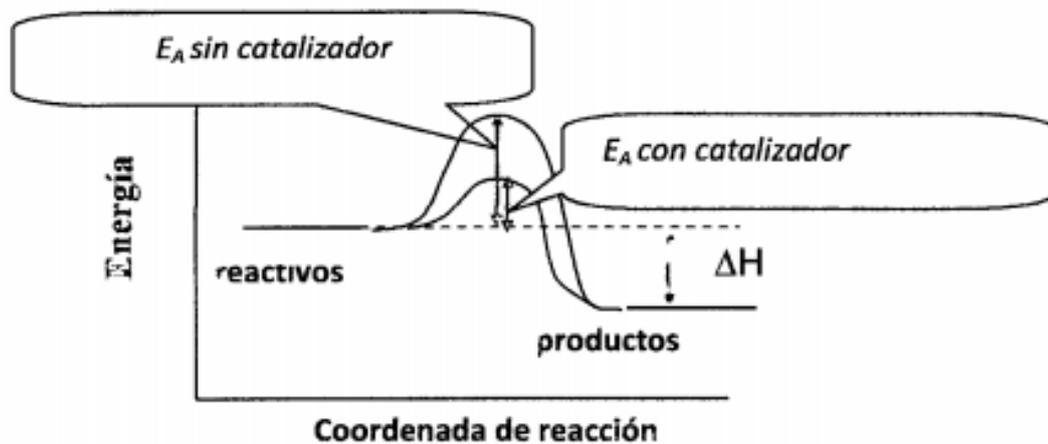


**Figura 1. 3 Variación de la constante de la velocidad con la temperatura.**

**[Fuente: (Puga Usucachi, 2014)]**

**d) Catalizadores**

Intervienen en una determinada etapa de la reacción, pero no se modifican porque se restauran al final y no aparecerán en la ecuación global ajustada. Cambian el mecanismo de la reacción, Sin embargo, no cambian la constante de equilibrio.

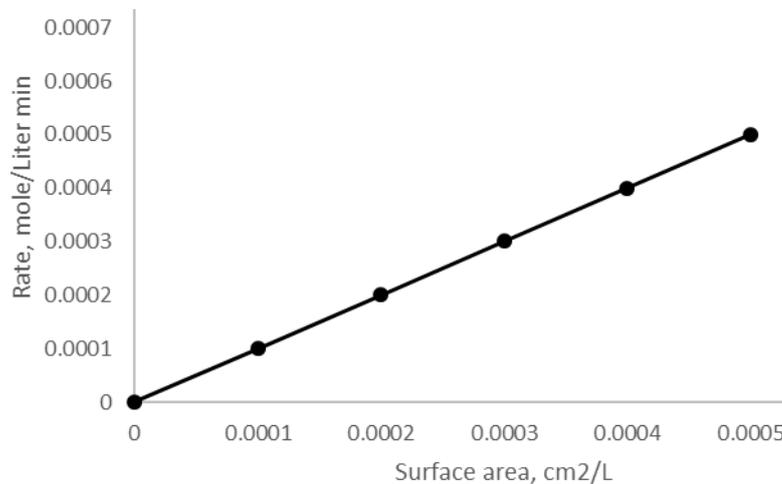


**Figura 1. 4 Perfil de reacción con y sin catalizador.**

[Fuente: (Puga Usucachi, 2014)]

**e) Área de interfase**

Dado que, en una reacción heterogénea, las moléculas de reacción se transfieren de una fase a otra, la velocidad de transferencia depende del área superficial de la interfaz. Por lo tanto, para reacciones en que se involucran sólidos, las partículas finas reaccionan mejor que las partículas gruesas porque el área de superficie formada es mayor, como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 1. 5 El efecto del área de la superficie de la pirita sobre la velocidad de oxidación.**

**[Fuente: (Puga Usucachi, 2014)]**

En las reacciones líquido-gas y líquido-líquido, las dos fases suelen mezclarse íntimamente en pequeñas burbujas o gotitas, porque la superficie formada es grande, lo que aumenta la velocidad.

#### f) Geometría de interfase

La forma del sólido en la reacción con líquido o gas juega un papel importante en la determinación de la velocidad de reacción:

- Si tiene forma de placa o de disco, el área de la superficie alrededor de la reacción es constante, por lo que la velocidad es constante.
- Si el sólido tiene la forma de una esfera el área de la superficie seguirá cambiando a medida que avanza la reacción, por lo que la velocidad también cambiará.
- Si estos cambios son tomados en consideración, es posible predecir la velocidad del proceso.

## 1.5 Metales pesados

Los metales pesados suelen ser componentes naturales de la superficie terrestre, en forma de minerales, sales u otros elementos. Estos elementos no se pueden degradar o destruir fácilmente de forma natural o biológica, porque estos elementos

no tienen una función metabólica específica para los seres vivos (Prieto Méndez et al., 2009).

Los metales se definen de acuerdo con sus propiedades físicas en estado sólido, como conductividad eléctrica, conductividad térmica y propiedades mecánicas, como resistencia y ductilidad. También se basa en sus características en solución: "Los metales son un elemento que puede reaccionar perdiendo uno o más electrones para formar cationes en condiciones biológicas" (Reyes et al., 2004).

Se puede encontrar algunos metales junto con otros como, por ejemplo:

- Mercurio, que se lo extrae para sí y también se lo utiliza para separar el oro de la mena.
- Plomo, con frecuencia se lo encuentra con cobre, plata y Zinc.
- Cobre se lo encuentra con plata y zinc.
- Arsénico con frecuencia se lo encuentra con oro, cobre y zinc.
- Cadmio a menudo se lo encuentra con plata, cobre y zinc.

Los científicos aún no han establecido la definición exacta de metales pesados y es objeto de discusión y debate. Una de sus definiciones se basa en el peso específico: "Los metales pesados son metales con un peso específico  $> 5 \text{ g cm}^{-3}$ ". Sin embargo, esta definición no es útil para estudiar los efectos de ciertos metales sobre el medio ambiente y los organismos. Por lo tanto, la definición adoptada está "relacionada con la contaminación y un grupo de metales o metaloides asociados con la toxicidad potencial" (Reyes et al., 2004).

## **1.6 El arsénico (As) en el ambiente**

El Arsénico se encuentra en pequeñas cantidades en toda la corteza terrestre, con un promedio de aproximadamente 2 ppm; se presenta en forma de minerales, principalmente como impurezas de otros minerales, y también se puede encontrar en agua, aire y organismos, especialmente en el océano (López, 2021), distribuyéndose de manera equivalente, esto va a depender, del área geográfica, las características geoquímicas del suelo y las actividades industriales,

por lo que se considera que la atmósfera contiene aproximadamente 1/3 de este elemento.

### **1.7 Contaminación del arsénico y su impacto en la salud**

Una vez que el arsénico ingresa al medio ambiente, como en el suelo, será disuelto y adsorbido por arcilla o materia orgánica (Maldonado T et al., 2021). Muchos de estos procesos están mediados por sustancias orgánicas y pueden producir los siguientes tipos de transformaciones:

- Transformaciones de las condiciones de oxidación-reducción que inducen al cambio transformación arsenito-arsenato.
- La reducción y metilación del arsénico.
- La biosíntesis de compuestos de arsénico

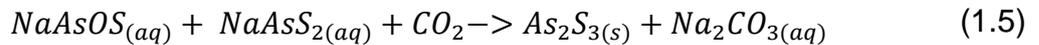
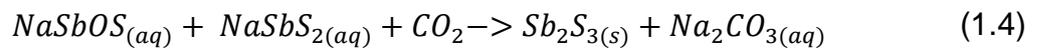
Las formas solubles de arsénico, como el metil arsénico y el ácido dimetilarsénico, son muy tóxicas. La ingestión de grandes dosis puede causar una intoxicación aguda, que conduce a problemas gastrointestinales y cardiovasculares, disfunción neurológica y, en última instancia, la muerte (Ferrer, 2003). La intoxicación crónica es un producto de dosis baja pero continua, superior a  $0,75 \text{ mg m}^{-3}$  por año, que puede provocar diversos cánceres; cáncer de piel, cáncer de pulmón, cáncer de vejiga, cáncer de riñón y cáncer de hígado. En general, la forma inorgánica es más tóxica que la orgánica y el arsenito es más peligroso que el arsenato (Altamirano & Delgado, 2020).

Por lo tanto, el arsénico en las aguas superficiales (río, lago, embalse) y subterráneas (acuíferos) que se puede utilizar para el consumo representa una gran amenaza para la salud. Es por eso que, organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció el límite permisible de arsénico en el agua potable de 50 a  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  (Guías Para La Calidad Del Agua de Consumo Humano, 2018).

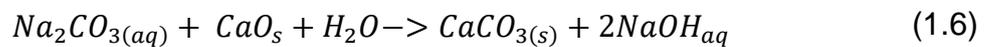
## 1.8 Tratamiento y estabilidad de metales generados en lixiviación

La solución producida durante la lixiviación de arsénico (As) y antimonio (Sb) tiene una alta concentración en la solución, por lo que una mejor solución para prevenir el impacto ambiental es estabilizarla para un fácil manejo (Espín et al., 2017).

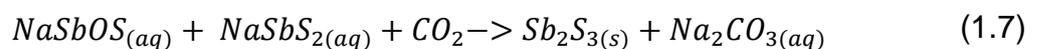
La primera etapa es la precipitación de antimonio y arsénico. De esta forma, la solución de antimonio se acidifica y precipita a partir de pH 5 con CO<sub>2</sub> produciendo la siguiente reacción:

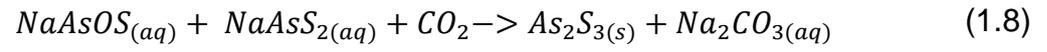


Separando el precipitado de los sulfuros metálicos, mediante la filtración para regenerar los reactivos de lixiviación, se añade CaO con un pequeño exceso, a la solución rica en carbonato de sodio y cuya reacción verificada es:



El proceso de regeneración del reactivo de lixiviación empieza a una temperatura entre los 40 a 90°C, pudiendo así llegar al equilibrio tomando un tiempo de una hora, siendo el rendimiento de transformación del 90% recuperándose el 95% del hidróxido total, que es recirculado en la lixiviación alcalina. Las pequeñas cantidades de arsénico que puede presentar el efluente final son tratados con previa oxidación, para llevar de As<sup>3+</sup> a As<sup>5+</sup> y una posterior dosificación de coagulantes químicos como el cloruro férrico o sulfato férrico para la precipitación de arseniato férrico y otros metales que pudiese haber contenido el efluente, certificando un efluente apto para descargas minero metalúrgico (Espín et al., 2017).





# CAPÍTULO II

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Diseño de Investigación

El presente trabajo investigativo recurrirá a un estudio de carácter descriptivo, transversal y experimental; un estudio descriptivo por las consideraciones de las características del metaloide, el tipo de reactivo químico a utilizar obtenido mediante revisiones bibliográficas y en pruebas realizadas en otros países. Se considerará un estudio transversal ya que se emplearán las variables para alcanzar un antes y después del tratamiento que se le realizará al mineral aurífero. Así mismo, será de tipo experimental para encontrar las cantidades de arsénico presentes en el mineral provenientes de la mina Miraflores del sitio Cerro Azul.

### 2.2 Enfoque de investigación

La investigación cuantitativa se utiliza para comprender frecuencias, patrones, promedios y correlaciones, para comprender las relaciones de causa y efecto, realizar generalizaciones y comprobar o confirmar teorías, hipótesis o suposiciones a través del análisis estadístico. De esta forma, los resultados se expresan en números o gráficos (Universidad de Santander, 2021). El enfoque que se usará en este proyecto es cuantitativo puesto que, nos permitirá recopilar información necesaria para nuestra investigación de la mano de encuestas a especialistas, experimentos, observaciones con respecto a la lixiviación alcalina para el control del arsénico presente en el mineral aurífero de la mina Miraflores del sitio Cerro Azul.

### 2.3 Muestra

Para la toma de muestra se realizó el método de cuarteo manual, específicamente el de partición con manta; este es un método rápido y flexible, siendo susceptible al error humano. Siendo la población de 25 Kg de mineral rico triturado, se tomó 5 muestras de 5 Kg para la etapa del cuarteo y se fue mezclando y juntando puntos opuestos de la manta (manteado), seleccionando 10 muestras de 500 gramos para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas.



**Figura 2. 1** Proceso de trituración (izquierda) y Pulverización (derecha) de la muestra.

## **2.4 Materiales, Equipos y Reactivos**

### **2.4.1 Materiales**

- Probeta de 1000 ml.
- Vasos de precipitación de 500 ml
- 12 vasos plásticos para filtración de 50 ml.
- 12 embudos de filtración de capacidad máxima 40 ml
- 1 pliego de papel filtro N° 40
- 5 jeringuillas de 10 ml para muestreo.
- 2 recipientes de Acero inoxidable-bandejas para secado de muestras
- Cucharón para muestreo
- Caja de Guantes látex
- Pissetas

### **2.4.2 Equipo experimental**

- Trituradora de mandíbulas.
- Pulverizador de anillos de 3 hoyas.
- Balanza Analítica
- Equipos de calentamiento con emisión de llama (quemador y Soplete).
- Soportes Universales
- Ganchos de Soporte
- Recipiente metálico para ensayo a temperatura controlada (Reactor cilíndrico)
- Recipiente plástico para ensayo a temperatura ambiente (Reactor cilíndrico)
- Agitador metálico de agitación controlada.
- Equipo para determinar Humedad Relativa
- Termómetros
- 1 caja de medidores de pH (pH-metro).
- Equipo de Absorción Atómica Perkins Elmer 300
- Soporte universal y 2 buretas
- Calculadora.
- Laptop HP
- Lámpara de As cátodo Hueco

### **2.4.3 Reactivos**

- Hidróxido de sodio
- Sulfuro de sodio
- Agua



**Figura 2. 2 Pesado de reactivos**

## **2.5 Métodos**

### **2.5.1 Proceso para muestreo**

#### **2.5.1.1 *Método de Cuarteo***

El método de cuarteo que se escogió fue partición con manta, este es un rápido y flexible, susceptible al error humano; la población inicial de mineral aurífero fue de 25 Kg, de los cuales se tomaron 5 muestras de 5 Kg para la etapa del cuarteo y se fue mezclando y juntando puntos opuestos de la manta (manteado), donde finalmente se seleccionó 10 muestras de 500 gramos para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas.

#### **2.5.1.2 *Caracterización de la muestra del mineral***

Una vez seleccionadas y codificadas las 10 muestras de mineral aurífero, se realizó una caracterización de la muestra inicial con la finalidad de conocer sus parámetros como humedad, tamaño de partícula, concentración de metales pagables y metales perjudiciales para la comercialización. Este análisis se realizó en el laboratorio metalúrgico CH PLENGE CIA S.A. por medio de análisis microscopio óptico

polarizado de Ingeniería Geológica de la ciudad de Lima, República del Perú y en el Laboratorio metalúrgico METALOR, por medio de espectrofotometría de absorción atómica con llama, de la ciudad de Portovelo.



**Figura 2. 3 Etiquetado de soluciones**

## **2.5.2 Métodos de Análisis Metalúrgicos**

### **2.5.2.1 Selección de muestra (Método de Gy (1982))**

Este método de toma de muestra es aplicado a minerales de metales base como (Cu, Pb, Sn, Zn y Fe), y para usar este método se necesitó la siguiente información:

- Ley de Au en el mineral
- Forma general de la partícula
- Peso específico de las especies valiosas
- Distribución del tamaño de partícula
- Grado de liberación

La cantidad de muestra mínima a tomar está determinada por la siguiente ecuación:

$$M_s \frac{f \cdot g \cdot c \cdot l \cdot d_n^3}{\sigma^2} \quad (2.1)$$

Donde:

- f: factor de forma (plana, circular, cúbica)  $0,2 < f < 0,5$  ( $f= 0,5$ )  
g: factor granulométrico (se toma la malla la cual se retiene el 5% y pase el 95%) ( $g= 0,75$ )  
l: grado de liberación de partículas no liberadas ( $l= 0,968$ )  
 $d_n$ : tamaño promedio de partícula representativo de la muestra ( $106 \mu\text{m}= 0,0106 \text{ cm}$ )  
e: factor composición mineralógica ( $e= 1,915$ )  
c: factor composición mineralógica ( $e= 1,915$ )

$$C = [(1 - a)/] \cdot [(1 - a)P_m + ap_g] \quad (2.2)$$

- a: parte decimal de la mena valiosa  
P<sub>m</sub>: peso específico de la mena  
p<sub>g</sub>: peso específico de la ganga  
σ: desviación estándar (0,02%)

$$a = \frac{PM \text{ mineral } \% \text{ Peso mena}}{100 \cdot \# \text{ moles} \cdot P_{\text{Metal. valio}}} \quad (2.3)$$

$$\rho_m = \frac{\sum(\% \text{ peso de las especies})}{\sum\left(\frac{\% \text{ peso de las especies}}{\text{peso específico de las especies}}\right)} \quad (2.4)$$

$$\rho_{\text{mineral}} = \left[ \frac{\sum \% \text{ peso mena}}{100} \rho_{\text{mena}} + \frac{\sum \% \text{ peso ganga}}{100} \rho_{\text{ganga}} \right] \quad (2.5)$$

### **2.5.2.2 Método de Ensayo al fuego**

Este método fue usado para determinar el contenido de oro presente en las muestras, mediante el proceso de fundición, extracción de metales preciosos, análisis y detección.

La fundición es un proceso que consiste en producir una fusión usando reactivos fundentes adecuados en hornos con ladrillos refractarios alcanzando una temperatura de hasta 1050 grados centígrados para posterior a ello obtener dos fases: sólida y líquida respectivamente, cabe recalcar que el proceso de fundición los reactivos adicionados a la muestra generan reacciones de oxidación y reducción.

Por otro lado, tenemos el proceso de copelación que consiste en colocar el regulo en unas copelas de magnesita, las mismas que son introducidas a los hornos de fundición a una temperatura de 920 grados centígrados, donde el plomo es absorbido por la copela en más de un 98%, dándonos como resultado un botoncito muy pequeño de aspecto brillante que se conoce con el nombre de doré, el mismo que es una aleación de oro y plata.

Y finalmente se realizó un ataque químico del doré, que consiste en sacar los botoncitos de la copela con una pinza y dándole golpes con martillo para obtener una lámina, posterior a esto se coloca ácidos, dando lugar al ataque químico del mismo y así se procede a pesarlo con ayuda de una micro balanza.

### **2.5.2.3 Método de absorción atómica**

La técnica hace uso de la espectrometría de absorción para evaluar la concentración de un analito en una muestra. Se basa en gran medida en la ley de Beer-Lambert. En resumen, los electrones de los átomos en el atomizador pueden ser promovidos a orbitales más altos por un instante mediante la absorción de una cantidad de energía (es decir, luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía (o longitud de onda) se refiere específicamente a una transición de electrones en un elemento particular, y en general, cada longitud de onda corresponde a un solo elemento.

#### **2.5.2.4 Método de Difracción por Rayos X**

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica no destructiva, herramienta analítica que nos permite determinar la geometría tridimensional de materiales cristalinos como metales, cerámicas, polímeros, compuestos intermetálicos, materiales minerales, así como diversos compuestos orgánicos o inorgánicos. Implica el uso de radiaciones electromagnéticas, es decir, rayos X, para elaborar el espacio interatómico dentro de un cristal. Al observar las posiciones angulares de los rayos difractados, la distancia entre los planos atómicos se puede determinar de acuerdo a la ecuación de Bragg (Allaby, 2013).

$$n\lambda = 2d * \text{sen} (\theta) \quad (2.6)$$

### **2.5.3 Desarrollo del Método de Ensayo al Fuego en el mineral de la mina**

#### **2.5.3.1 Análisis mineralógico por ensayo al fuego y absorción atómica**

El mineral seleccionado se sometió a un proceso de pulverización mediante un pulverizador de anillos con capacidad máxima de 350 gramos cada olla durante 1 minuto 25 segundos hasta alcanzar una malla de molienda de  $\pm$  malla-200 micrones.

Posterior a esto, se procedió a realizar los análisis por ensayo al fuego para la determinación de oro y plata en el mineral y así mismo el análisis por absorción atómica del elemento arsénico presente en el mismo, cabe recalcar que dichos análisis fueron realizados por Laboratorio METALOR, siendo un laboratorio propio del partícipe de esta tesis.

Para el desarrollo de análisis de ensayo al fuego se preparó la muestra adicionando químicos de fundición, los mismos que son establecidos en función de la colorimetría del mineral, luego fue llevado a un horno eléctrico a una temperatura aproximada de 1050 °C; dándonos como resultado un regulo, después de lo cual se sometió a un proceso de copelación de manera que se obtuvo un doré, el mismo que se pesó y se refinó para obtener distintos pesos y así determinar la cantidad de oro y plata presente.

Por otro lado, se procedió al análisis por ensayo de absorción atómica, proceso que consiste en un ataque químico de la muestra con ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico en proporciones de 3 a 1 formando agua regia, previo a la lectura realizada en un equipo Perkins Elmer 300 con quemador de alta sensibilidad, una Longitud de onda de lámpara de 193,7 nm, energía 33 mA, absorbancia mínima de 0,072, máxima de 0,285 y un margen de error de  $\pm 0,03$  %. Además, cabe recalcar que una de las muestras fue enviada al laboratorio PLENGE con acreditación internacional, para la determinación de las características mineralógicas.

#### 2.5.4 Preparación de la solución lixivante

La solución lixivante fue sulfuro de sodio, y la presentación comercial es en estado sólido. La preparación en solución de este sulfuro, por su propiedad de hidrólisis, implica la formación del gas sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ), siendo este un gas muy tóxico. Para evitar la hidrólisis del sulfuro, nos apoyamos en el principio de Equilibrio Químico de la ley de Le Chatelier, donde con un incremento en la concentración del hidróxido ( $OH^-$ ), se logra invertir el sentido de la reacción (desplazamiento de reacción de productos a reactantes), para lo cual se utilizó como alcalinizante hidróxido de sodio.



Por lo tanto, para la preparación del sulfuro en solución, según los cálculos estequiométricos se determinó que por 1 mol de  $S^{2-}$  (s) se requiere como mínimo 1 mol de  $OH^-$ , o podemos expresar que por 1 gramo de  $S^{2-}$  se requiere 0,53 gramos de  $OH^-$  (Base Seca).

## 2.6 Plan Experimental

### 2.6.1 Pruebas cinéticas para determinar el efecto de las variables.

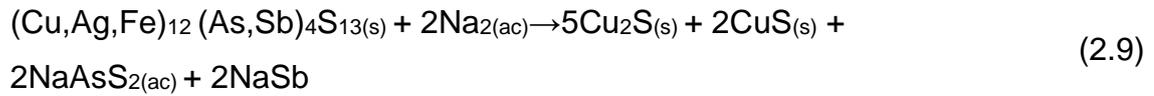
Una vez conocidas las características mineralógicas y físico-químicas del mineral se procedió a realizar pruebas de lixiviación en forma comparativa con pretratamiento y sin pretratamiento.

Para los procesos de pretratamiento, se fabricó un reactor de lixiviación, en el cual se adicionó diferentes dosis de la solución lixivante (Sulfuro de Sodio + hidróxido de sodio), la lixiviación se aceleró con agitación constante y alta temperatura con el objetivo de remover las cantidades más altas del arsénico presente en el mineral.

Las pruebas de lixiviación a nivel laboratorio se realizaron en batch, preparando mezclas (mineral aurífero pulverizado + Agua) a diferentes densidades de pulpa (variando la relación Líquido/Sólido); el peso del mineral seco (exento de humedad), 130 gramos, fue constante en todas las pruebas, variando el volumen de la solución. En un reactor de lixiviación se adicionaron diferentes dosis de la solución lixivante (Sulfuro de Sodio+ Soda cáustica). Dicho reactor fue agitado con una propela a 500 RPM, sometiendo a una temperatura constante y controlada de 90 °C en el sistema con apoyo de un termómetro, el cual fue colocado en la zona intermedia del reactor.

Fijadas las condiciones para las pruebas cinéticas, se controló el tiempo de reacción (horas). Culinado el tiempo de reacción, la pulpa fue llevada a un sistema de filtración, vertido sobre un papel filtro que contienen un grado de porosidad de 11 micras a fin de evitar que parte de la solución lixiviada permanezca en el concentrado, se realizó un lavado repetidas veces con agua destilada. El mineral final obtenido tuvo una humedad de 3%, las muestras posteriormente fueron analizadas, para evaluar la calidad final del mineral.

La reacción química durante el proceso de lixiviación es:



**Figura 2. 4 Lixiviación de la muestra**

Culminado el tiempo de reacción, la pulpa se llevó a un sistema de filtración al vacío, vertido sobre un papel filtro con un grado de porosidad muy pequeño, a fin de evitar que parte de la solución lixiviada permanezca en el mineral se realizó un lavado repetidas veces con agua destilada. El mineral final obtenido tuvo una humedad de 3%. Posteriormente, las muestras se analizaron en el Laboratorio METALOR por espectrofotometría de absorción atómica con llama, para evaluar la calidad final del mineral y lixiviado.

El lixiviado tóxico con alto contenido en arsénico se procedió a precipitar mediante la utilización de tioacetamida en medio ácido, posteriormente este precipitado se secó y se colocó en recipientes de almacenamiento de mineral residual del laboratorio, para luego ser procesado en una planta de beneficio cercana, y ser transportado por la misma hasta la Relavera comunitaria del Tablón.



**Figura 2. 5 Filtración de soluciones**

# CAPÍTULO III

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Caracterización inicial del mineral de estudio

#### 3.1.1 Ensayo al fuego del mineral

Mediante el análisis de ensayo al fuego se obtuvieron resultados del contenido de oro y plata, los mismos que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.1 Ensayo al fuego del mineral.**

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	ORO (AU) TOTAL g/Tm	PLATA (AG) TOTAL g/Tm
CUARZO	4,32	146,95

#### 3.1.2 Análisis por absorción atómica del mineral

A la misma muestra se le realizó el análisis inicial de absorción atómica (APÉNDICE A

### INFORME DE ANÁLISIS MEDIANTE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LA MUESTRA

, donde se determinó los siguientes elementos; cobre, zinc y arsénico, obteniendo como resultado 0,38, 2,93 y 2,53 %/ tonelada métrica, respectivamente, los mismos que sirvieron para la comparación en la Remoción del arsénico, es decir la comparación inicial vs final.

**Tabla 3.2 Análisis por adsorción atómica del mineral.**

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	ORO (AU) TOTAL g/Tm	PLATA (AG) TOTAL g/Tm	COBRE (Cu) TOTAL %*Tm	ZINC (Zn) TOTAL %*Tm	ARSENICO (AS) TOTAL %*Tm
CUARZO	4,32	146,95	0,38	2,93	2,53

### 3.1.3 Análisis por Difracción de Rayos x

Mediante el análisis de Difracción de Rayos X (APÉNDICE B

#### INFORME DE ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN LA MUESTRA

), se evaluó las características y componentes mineralógicos para determinar el tipo de mineral a tratar, por lo que se puede determinar que predomina el cuarzo según los resultados obtenidos que se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Análisis de difracción de rayos X.**

Mineral	Fórmula General	Distribución %
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	40,8
Pirita	FeS <sub>2</sub>	13,2
Chamosita	(Fe <sup>++</sup> , Mg, Fe <sup>+++</sup> ) <sub>5</sub> Al (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>10</sub> (OH, O) <sub>8</sub>	13,0
Moscovita	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	12,5
Arsenopirita	FeAsS	5,3
Esfalerita	(Zn, Fe)S	2,3
Diáspora	AlO (OH)	1,6
Flogopita	KMg <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>10</sub> (F, OH) <sub>2</sub>	1,5
Galena	PbS	1,1
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	1,0
Otros	---	7,7

De la misma manera, se determinó los elementos metálicos y no metálicos que presentaba el mineral aurífero del yacimiento de la mina Miraflores del sitio Cerro Azul (APÉNDICE C

#### INFORME DE ANÁLISIS DE MULTIELEMENTOS PRESENTES EN EL MINERAL AURÍFERO

), por lo que resultó tener un alto contenido de arsénico de 24357 (miligramos/litro), que equivale a 2,43% del mineral, como se puede observar en la

Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Análisis de multielementos presentes en el mineral aurífero.**

Elemento		Ensayo
Si	%	22,3
S total	%	10,5
C total	%	0,35
ICP - Multielementos		
Al	%	4,78
Ca	%	0,43
Cu	%	0,36
Fe	%	12,2
K	%	1,92
Mg	%	0,46
Mn	%	0,07
Na	%	0,08
Pb	%	0,94
Ti	%	0,04
Zn	%	1,50
Ag	ppm	161
As	ppm	24357
Ba	ppm	436
Be	ppm	< 1
Bi	ppm	142
Cd	ppm	166
Co	ppm	58
Cr	ppm	75
Mo	ppm	7
Ni	ppm	29

P	ppm	446
Sb	ppm	1457
Sc	ppm	7
Sn	ppm	22
Sr	ppm	12
V	ppm	59
W	ppm	< 1
Y	ppm	5
Zr	ppm	<1

### 3.2 Remoción de arsénico por lixiviación alcalina en el mineral

#### 3.2.1 Proceso de lixiviación alcalina con adición de calor

Para este proceso se cuarteó de manera homogénea el mineral llevándolo a un proceso de molienda, similar al de un proceso a gran escala, es decir a un proceso industrial (APÉNDICE D

#### INFORME DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA DE LA MUESTRA Y PROCEDIMIENTO.

), donde se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.5, cabe recalcar que se tomaron muestra en periodos similares, los mismos que muestran la lixiviación del arsénico mediante adición de calor de manera creciente, teniendo una excelente remoción de 1377 mg L<sup>-1</sup> a la cuarta hora.

Remoción de Arsénico (As)		
Tiempo (min)	Con adición de calor (mg/l)	Sin adición de calor (mg/l)
20	1043,00	1024,96
35	1058,00	914,50

**Tabla 3.5**  
**arsénico con**

60	1072,50	942,50
90	1101,50	858,50
120	1232,20	1143,00
180	1290,00	1171,50
210	1232,00	1200,00
240	1377,00	1214,50
270	1261,00	1228,50

**Remoción de  
adición de calor.**



**Figura 3. 1 Lixiviación alcalina sin adición de calor**

### 3.2.2 Proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor

De la misma manera, se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.6, donde se puede observar que se obtuvo una excelente remoción de 1214,50 mg/L de arsénico en la cuarta hora del proceso, tomando en cuenta que se obtiene una mejor remoción de arsénico con la adición de calor en el proceso.

**Tabla 3.6 Proceso de lixiviación alcalina sin la adición de calor.**

Remoción de Arsénico (As)		
Tiempo (min)	Con adición de calor (mg/l)	Sin adición de calor (mg/l)
20	1043,00	1024,96
35	1058,00	914,50
60	1072,50	942,50

90	1101,50	858,50
120	1232,20	1143,00
180	1290,00	1171,50
210	1232,00	1200,00
240	1377,00	1214,50
270	1261,00	1228,50



**Figura 3. 2 Lixiviación alcalina sin adición de calor**

Al finalizar el proceso de lixiviación se nota la presencia de lamas del mineral mezclado con los químicos reactantes, los cuales presentan un excesivo contenido de arsénico en ambos casos, lamas que no superan un 2 a 3 % de la cantidad del mineral procesado.

### **3.2.3 Resultados del proceso de lixiviación alcalina con adición de calor**

En la Tabla 3.7 se muestra que el contenido de arsénico en la muestra post-lixiviada marcó 0,23%/ tonelada métrica, tomando en cuenta que durante el proceso se

genera cierta cantidad de lamas, las mismas que presentan un alto contenido de arsénico.

**Tabla 3.7 Resultados después del proceso de lixiviación alcalina con adición de calor.**

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Arsénico (As) Total %*Tm
Mineral Pulverizado	0,23

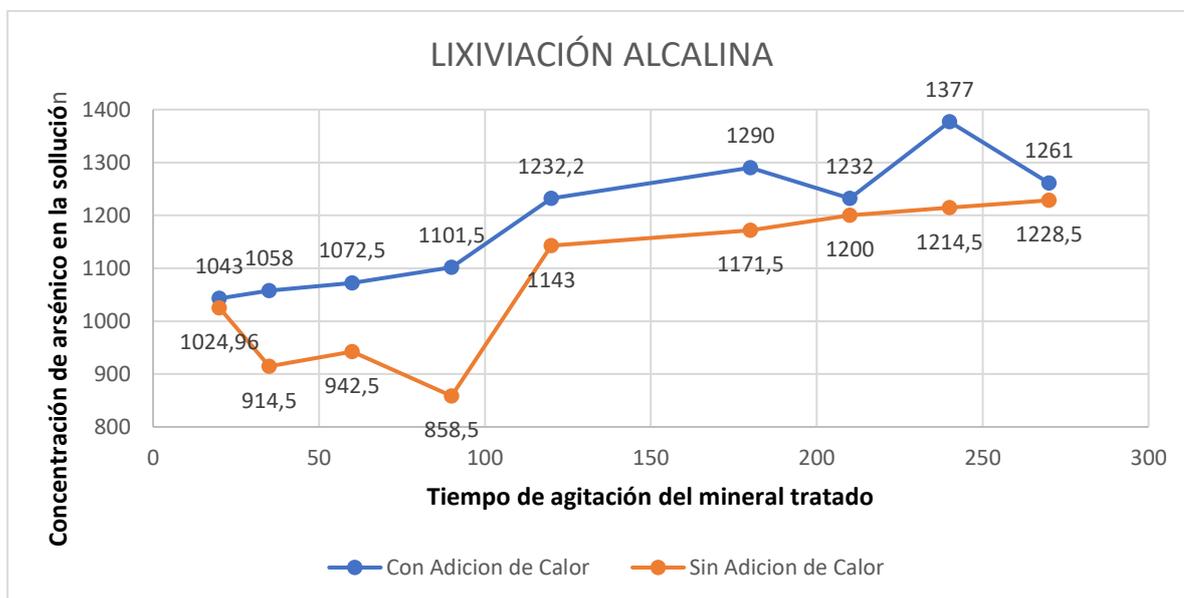
### **3.2.4 Resultados después del proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor**

En la Tabla 3.8 se muestra que el contenido de arsénico marcó 0,27%/ tonelada métrica en el mineral post-lixiviado, así mismo, se toma en cuenta que durante el proceso se genera cierta cantidad de lamas producidas por los agentes reactantes, las mismas que presentan un alto contenido de arsénico.

**Tabla 3.8 Resultados después del proceso de lixiviación alcalina sin adición de calor.**

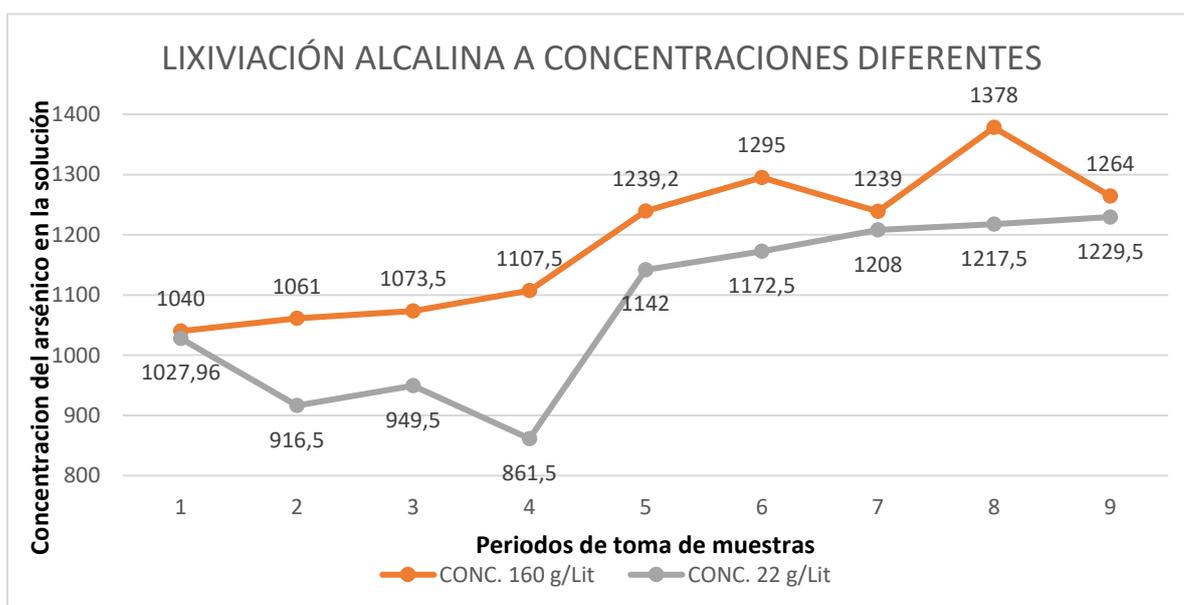
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Arsénico (As) Total %*Tm
Mineral Pulverizado	0,27

### 3.3 Efectos de las variables



**Figura 3. 3 Comparación de Lixiviación alcalina con y sin adición de temperatura.**

En la presenta figura 3.3 se puede visualizar el comportamiento de lixiviación alcalina con y sin adición de temperatura, siendo este similar en ambos casos.

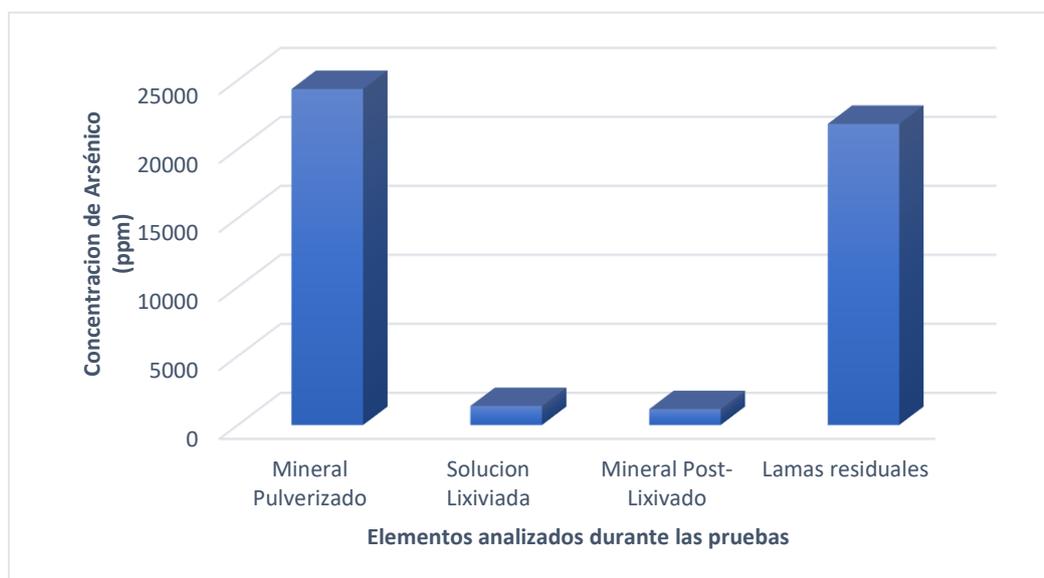


**Figura 3. 4 Comparación de Lixiviación alcalina a concentraciones diferentes.**

En la presente figura 3.4 se puede visualizar el comportamiento de lixiviación alcalina a diferentes concentraciones de reactantes, es decir que lixivia cantidades similares de arsénico con concentraciones de sulfuro de sodio de  $160 \text{ g L}^{-1}$  y  $22 \text{ g L}^{-1}$ .

### 3.4 Resultados del tratamiento de lixiviación alcalina

En la figura 3.5 se visualizan los resultados del tratamiento de lixiviación alcalina, reflejando el comportamiento del mineral tratado con este proceso, alcanzando una remoción de arsénico desde el mineral en un 90,54%.



**Figura 3. 5 Resultados del tratamiento de lixiviación alcalina.**

# CAPÍTULO IV

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- En base a las pruebas metalúrgicas desarrolladas de lixiviación alcalina para la remoción del elemento arsénico, se concluye que el proceso propuesto es técnicamente eficiente, sobrepasando el porcentaje de remoción de arsénico esperado en un 30%, ya que se obtuvo un 90,54% de remoción de arsénico contenido en el mineral, el mismo que queda en la solución alcalina y en residuos que se conocen como lamas del proceso.
- Con adición de calor se tuvo un mayor gasto económico por la combustión, de alrededor de \$30 más en cada prueba de Lixiviación alcalina sin embargo, con un proceso sin adición de calor se puede notar que hay más liberación de arsénico a medida que se le da más tiempo de agitación. Cabe recalcar que el exceso de reactantes no mejora la remoción de arsénico del mineral, sino el tiempo de agitación.
- Aplicando este proceso de remoción de arsénico mejoramos la calidad del mineral de la mina Miraflores del sector cerro azul del cantón Atahualpa previo a los procesos metalúrgicos aplicados por el minero artesanal, lo que contribuiría en la disminución del uso de reactivos como el cianuro de sodio y por ende, en la rentabilidad del proceso.

### 4.2 Recomendaciones

- Se necesita que las entidades públicas en conjunto con las instituciones académicas dedicadas a la investigación y desarrollo de las actividades mineras y metalúrgicas fomenten la capacitación a las empresas mineras que padecen la problemática de la presencia de arsénico.
- Finalmente, se invita a que se realicen más investigaciones sobre este tipo de procesamiento, con el fin de eliminar otros metales contaminantes que interfieren en los procesos metalúrgicos de los minerales auríferos tales como el Antimonio, Cadmio, entre otros.

- Es recomendable realizar más pruebas de laboratorio con otras muestras minerales con el fin de confirmar los resultados preliminares obtenidos en este proyecto.
- También es conveniente hacer pruebas a mayor escala y en lo posible pruebas piloto. Estos ensayos permitirán confirmar las pruebas de laboratorio y demostrar la factibilidad técnica y económica de los estudios realizados.

# BIBLIOGRAFÍA

- Allaby, M. (2013). *A Dictionary of Geology and Earth Sciences* (4th ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acref/9780199653065.001.0001>
- Altamirano, M. & Delgado, V. (2020). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. *Revista Torreón Universitario*, 8(23), 58–72.
- Ardelean, M., Ardelean, E., Mihut, G. & Găianu, O. (2021). The importance of recovering precious metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1781(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012049>
- Aylmore, M. (2016). Alternative Lixivants to Cyanide for Leaching Gold Ores. In *Gold Ore Processing* (pp. 447–484). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63658-4.00027-x>
- Borgnino, L. & Mlewski, C. (2019). Microorganismos extremófilos: potenciales héroes contra el Arsénico. *Cicterránea*, 3, 36–37. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/cicterranea/article/view/32164>
- Bustamante Rúa, O., Gaviria Cartagena, A. & Restrepo Baena, O. (2008). Concentración de minerales. In *Instituto de minerales CIMEX*.
- Espín, D., Jarrín, J. & Escobar, O. M. (2017). *MANEJO, GESTIÓN, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RELAVES MINEROS GENERADOS EN EL PROYECTO RÍO BLANCO. II(4)*.
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales Del Sistema Sanitario de Navarra*, 26(1), 141–153. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1137-66272003000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Gutierrez Falcon, L. S. (2017). *Estudio del tratamiento de minerales sulfurados auríferos mediante procesos secuenciales de flotación, lixiviación alcalina, biolixiviación y cianuración para la recuperación de oro*. [Universidad nacional mayor de San Marcos]. [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/6616/Gutierrez\\_fl.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/6616/Gutierrez_fl.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Jerez, O. (2015). *Cinética de la lixiviación a presión de enargita en medio FeSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>* [Universidad de Concepción]. [http://repositorio.udec.cl/xmlui/bitstream/handle/11594/1901/Tesis\\_Cinetica\\_de\\_la\\_lixivacion\\_a\\_presion\\_de\\_enargita.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.udec.cl/xmlui/bitstream/handle/11594/1901/Tesis_Cinetica_de_la_lixivacion_a_presion_de_enargita.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- López, M. (2021). *Selección de técnicas para el tratamiento de aguas residuales con contenido elevado de metales pesados, enfocado a la sostenibilidad en la industria minera colombiana*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD.
- MAE. (2020). *Línea de base nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, Conforme la Convención de Minamata sobre Mercurio* (Issue Línea de base nacional para la minería artesanal y en pequeña escala de Oro en Ecuador). <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/NAP-Inventario-de-Mercurio-Ecuador.pdf>
- Maldonado T, C. H., Chávez Guajardo, E. G., Bracamontes, N. Y., Moreno, A. G., Muñoz Escobedo, J. J. & Arteaga, S. (2021). DETECCIÓN DE ARSÉNICO (As) EN POLVO EN ZONA MINERA DE ZACATECAS. *Revista de Enfermedades Infecciosas Emergentes*, 16, 7–9.
- MERNNR. (2020). *Plan Nacional De Desarrollo Del Ecuador del Sector Minero*. <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/Plan-Nacional-de-Desarrollo-del-Sector-Minero-2020-2030.pdf>
- Mestanza-Ramón, C., Ordoñez-Alcivar, R., Arguello-Guadalupe, C., Carrera-Silva, K., D'orio, G. & Straface, S. (2022). History, Socioeconomic Problems and Environmental Impacts of Gold Mining in the Andean Region of Ecuador. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, Vol. 19, Page 1190, 19(3), 1190. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19031190>
- Montoya, E. A. R., Hernández, L. E. M., Escareño, M. P. L. & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 103–118. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57339210001>
- Guías para la calidad del agua de consumo humano, 636 (2018). <http://apps.who.int/>
- OpenStax College. (2013). Biology. In *Rice University*. Rice University.
- Palacios, S. (2002). LIXIVIACIÓN DE MENAS AURÍFERAS CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ÁCIDO MEDIANTE EL PROCESO SEVERO. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 5(09). [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05\\_n9/lixi\\_menas.ht](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05_n9/lixi_menas.ht)

m

- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D. & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29–44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
- Puga Usucachi, E. V. (2014). *Lixiviación alcalina de arsénico contenido en el mineral cobre gris presente en concentrados de cobre del centro del Perú*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO.
- Rangel, E. & Montañez, L. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103–118.
- Restrepo, O. (2018). *Notas de clase metalurgia extractiva*. Universidad Nacional de Colombia.
- Reyes, M., Alvarado, A. & Antuna, D. (2004). *Metales pesados: Importancia y análisis*.
- Romero Bonilla, H., Vega, C., Feijoó, V., Villacreses, D., Pesantez, F. & Olivera, L. (2020). Methane gas generation through the anaerobian codigestion of urban solid waste and biomass. *Energy Reports*, 6, 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.217>
- Ruiz-Córdoba, J. A., López-Cañas, C. A., Carmona-Arango, M. E. & Bolívar-García, W. H. (2019). Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero. *Facultad de Ingeniería*, 28(53), 33–51. <https://www.redalyc.org/journal/4139/413961282002/html/>
- Sabastegui, L. & Arboleda, S. (2019). *Factores determinantes en la evolución de las exportaciones de concentrado de cobre, en el marco del TLC Perú-China, entre los años 2009 al 2017* [UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS]. [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626502/Gallegos R\\_G.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626502/Gallegos_R_G.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Santamaría Roncancio, J. I., Torres Gómez, R. D. J., Parra Pinilla, M. & Ortiz Otálora, C. A. (2013). Comparación de cianuro y tiourea como agentes lixiviantes de un mineral aurífero colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería*, 22(34), 97–103. <https://doi.org/10.19053/01211129.2222>
- SNMPE. (2015). Valor de los concentrados de minerales. In *Tema de Interés*.
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Rugani, B., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A.,

- Weidema, B. & Young, S. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment—part I: a critical review of existing methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 784–797. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01736-6>
- Ubal dini, S., Vegliò, F., Fornari, P. & Abbruzzese, C. (2000). Process flow-sheet for gold and antimony recovery from stibnite. *Hydrometallurgy*, 57(3), 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00107-9)
- Universidad de Santander. (2021, December 10). *Investigación Cualitativa y Cuantitativa / Blog Becas Santander*. Blog. <https://www.becas-santander.com/es/blog/cualitativa-y-cuantitativa.html>
- Vera, I. (2019). *Determinación de la cinética de lixiviación por agitación de un relave de cobre*. Universidad Andrés Bello.
- Yesares, L., Ruiz de Almodóvar Sel, G., Sáez Ramos, R., Proenza Fernández, J. A. & Pons, J. M. (2019). Mineralizaciones de oro en los sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica. *Macla: Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, ISSN 1885-7264, N.º. 24, 2019, 24, 61. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7135518&info=resumen&idioma=SPA>

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## INFORME DE ANÁLISIS MEDIANTE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LA MUESTRA



<b>Lugar:</b>	Zaruma, sector El Pache a 150 metros de la Gasolinera "Pioneros TAC" en la vía Pache - Portovelo	
<b>Fecha:</b>	Martes, 08 de junio de 2021	<b>No. Inf.</b>
<b>Solicitado Por:</b>	Srs. Maestría Espol	03 - 0397
<b>Empresa Minera:</b>	ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL "ESPOL"	

### RESULTADOS:

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Oro (Au) Total g/TM	Plata (Ag) Total g/TM	Cobre (Cu) Total %*TM	Zinc (Zn) Total %*TM	Arsénico (As) Total %*TM
CUARZO	4,32	146,95	0,38	2,93	2,53

### DETALLES:

La muestra fue proporcionada por el cliente

### MÉTODO:

1. Au, Ag; LAB-METALOR-01 Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, As, Fe, Sb, Mn, Cd, Ca, K; LAB-METALOR-02 Determinación de elementos por digestión con ácidos concentrados, previo a lectura por absorción atómica.

### SUGERENCIAS:



Ing. Pg. Dip. MEng  
LABORATORISTA

Los Remanentes o Testigos se guardarán por un periodo máximo de quince (15) días, plazo en el cual los dueños pueden solicitarlos. LAB- METALOR

Activar  
Ve a Con

## APÉNDICE B

### INFORME DE ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN LA MUESTRA



#### XRD REPORTE

**Cliete:** OSCAR LEONARDO REYES RODRIGUEZ  
**Muestra:** Muestra: M-1  
**CHP:** 112292

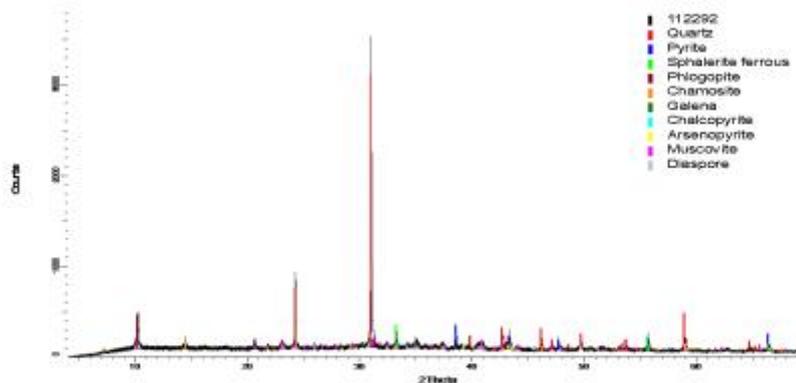
**Fecha:** Ago. 18/21  
**Operador:** J. Quispe

**Datos del Equipo**

**Equipo:** BRUKER D2 PHASER  
**Lámpara:** Cobalto  
**Rango XRD:** 4-54-002 Condición de medida base

**Análisis Mineralógico por Difracción de Rayos X (XRD)**

Mineral	Fórmula General	Distribución %
Quartz	SiO <sub>2</sub>	40,8
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	13,2
Chamosite	(Fe <sup>++</sup> ,Mg,Fe <sup>+++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH, O) <sub>8</sub>	13,0
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	12,5
Arsenopyrite	FeAsS	5,3
Sphalerite	(Zn, Fe)S	2,3
Diaspore	AlO(OH)	1,6
Phlogopite	KMg <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (F, OH) <sub>2</sub>	1,5
Galena	PbS	1,1
Chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub>	1,0
Others	—	7,7



Activa  
Ve a Co



## APÉNDICE C

### INFORME DE ANÁLISIS DE MULTIELEMENTOS PRESENTES EN EL MINERAL AURÍFERO

#### REPORTE No.18174

**Cliente** OSCAR LEONARDO REYES RODRIGUEZ  
**Muestra:** Muestra: M-1  
**CHP:** 112292

#### Ensaye de Cabezas

Elemento		Ensaye
Si	%	22,3
S total	%	10,5
C total	%	0,35
ICP - Multielementos		
Al	%	4,78
Ca	%	0,43
Cu	%	0,36
Fe	%	12,2
K	%	1,92
Mg	%	0,46
Mn	%	0,07
Na	%	0,08
Pb	%	0,94
Ti	%	0,04
Zn	%	1,50
Ag	ppm	161
As	ppm	24357
Ba	ppm	436
Be	ppm	<1
Bi	ppm	142
Cd	ppm	166
Co	ppm	58
Cr	ppm	75
Mo	ppm	7
Ni	ppm	29
P	ppm	446
Sb	ppm	1457
Sc	ppm	7
Sn	ppm	22
Sr	ppm	12
V	ppm	59
W	ppm	<1
Y	ppm	5
Zr	ppm	<1



## APÉNDICE D

### INFORME DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA DE LA MUESTRA Y PROCEDIMIENTO.



<b>Lugar:</b>	Zaruma, sector El Pache a 150 metros de la Gasolinera "Pioneros TAC" en la vía Pache - Portovelo	
<b>Fecha:</b>	Viernes, 16 de julio de 2021	<b>No. Inf.</b>
<b>Solicitado Por:</b>	Ing. Oscar Reyes - Ing. Washington Espinoza	03 - 0571
<b>Empresa Minera:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL "ESPOL"	

#### RESULTADOS:

##### DATOS ANTES DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA:

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Arsénico (As) Total %*TM
CUARZO Mineral Pulverizado	2,53

##### PROCESO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA:

Remoción de arsénico.		
Tiempo (min)	Con adición de calor (mg/l)	Sin adición de calor (mg/l)
20	1043,00	1024,96
35	1058,00	914,50
60	1072,50	942,50
90	1101,50	858,50
120	1232,20	1143,00
180	1290,00	1171,50
210	1232,00	1200,00
240	1377,00	1214,50
270	1261,00	1228,50

DATOS DESPUES DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA:

CON ADICIÓN DE CALOR:

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Arsénico (As) Total %*TM
Mineral Pulverizado	0,23
Lamas del cuarzo	2,25

SIN ADICIÓN DE CALOR:

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Arsénico (As) Total %*TM
Mineral Pulverizado	0,27
Lamas del cuarzo	2,21

DETALLES:

La muestra fue proporcionada por el cliente

MÉTODO:

1. Au, Ag; LAB-METALOR-01 Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, As, Fe, Sb, Mn, Cd, Ca, K; LAB-METALOR-02 Determinación de elementos por digestión con ácidos concentrados, previo a lectura por absorción atómica.

SUGERENCIAS:



OSCAR LEONARDO REYES RODRIGUEZ

Ing. Pg. Dip. Mgs. Eng  
LABORATORISTA

## CERTIFICACIÓN DE REVISIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Por medio de la presente, Yo **David Ricardo Altamirano Moran, M.Sc.**, Coordinador del Programa de **Maestría en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico que:

Con fecha 07 de febrero de 2023, los estudiantes **Espinoza Ramón Washington Omar, C.I: 0704015353**, y **Reyes Rodríguez Oscar Leonardo, C.I: 0704294669**; de la **Cohorte 1**, presentaron la propuesta de su tema de titulación al Comité Académico del programa. Posteriormente, con fecha 17 de marzo de 2023, el Comité revisó y aprobó la propuesta mediante la resolución RES.CA. Maestría en Minas.001A2023 cumpliendo con los requisitos establecidos para la aprobación del tema.

A partir de dicha aprobación, los estudiantes mantuvieron reuniones periódicas con el tutor designado, **Juan María Menéndez Aguado, PhD.**, para la elaboración y desarrollo de su proyecto de titulación, siguiendo los lineamientos establecidos por el programa. Con fecha 30 de marzo de 2023, los estudiantes presentaron y sustentaron su proyecto de titulación ante el tribunal evaluador asignado, cumpliendo con el proceso formal de evaluación académica.

Por lo tanto, en calidad de Coordinador del Programa de Maestría en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva, certifico que el trabajo de titulación denominado **“Lixiviación Alcalina para la Remoción de Arsénico en un Mineral Aurífero de la Mina Miraflores, en el sitio Cerro Azul, Cantón Atahualpa de la Provincia de El Oro”**. realizado por los estudiantes Espinoza Ramón Washington Omar, C.I: 0704015353, y Reyes Rodríguez Oscar Leonardo, C.I: 0704294669; ha sido revisado y evaluado conforme a los lineamientos y estándares establecidos por el programa.

Debido a circunstancias externas, no ha sido posible obtener las firmas de los involucrados (estudiante, tutor(es) y/o evaluadores). No obstante, en calidad de Coordinador del Programa, certifico que el proyecto cumple con los requisitos académicos y ha sido revisado para su presentación y archivo institucional.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:  
DAVID RICARDO  
ALTAMIRANO MORAN

**David Ricardo Altamirano Moran, M.Sc.**

**Coordinador de la Maestría en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**

**FICT-ESPOL**