



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

### Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

#### Maestría en Minas Mención en Mineralurgia y Metalurgia

#### Extractiva

**“Optimización del proceso de molienda para la recuperación del mineral oro (Au) en la Planta de Beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo, de la Jurisdicción de la provincia de El Oro”.**

**Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Magister en Minas mención en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**

#### AUTOR:

Ing. Celso Xavier Atarihuana Sandoval

#### DIRECTOR:

Ing. Jimmy Stalin Paladines PhD

Loja – Ecuador

2025

## Certificación



UNL

Universidad  
Nacional  
de Loja

Sistema de Información Académico  
Administrativo y Financiero - SIAAF

### CERTIFICADO DE CULMINACIÓN Y APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **PALADINES JIMMY STALIN**, director del Trabajo de Titulación denominado "**Optimización del proceso de molienda para la recuperación de mineral Oro (Au) en la Planta de Beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo de la Jurisdicción de la provincia de El Oro**", perteneciente al estudiante **CELSO XAVIER ATARIHUANA SANDOVAL**, con cédula de identidad N° **1103527832**.

**Certifico:**

Que luego de haber dirigido el **Trabajo de Titulación**, habiendo realizado una revisión exhaustiva para prevenir y eliminar cualquier forma de plagio, garantizando la debida honestidad académica, se encuentra concluido, aprobado y está en condiciones para ser presentado ante las Instancias correspondientes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad, a fin de que, de así considerarlo pertinente, el/la señor/a docente de la asignatura de **Titulación**, proceda al registro del mismo en el Sistema de Gestión Académico como parte de los requisitos de acreditación de la Unidad de Titulación del mencionado estudiante.

Loja, 20 de Diciembre de 2024



firmado digitalmente por  
JIMMY STALIN  
PALADINES

F) \_\_\_\_\_  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**



Certificado TIC/TT.: UNL-2024-003180

1/1  
*Educamos para Transformar*

### **Autoría**

Yo, **Celso Xavier Atarihuana Sandoval**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**

**Cédula de identidad:** 1103527832

**Fecha:** 26-02-2025

**Correo electrónico:** celso.atarihuana@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0994027896

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación**

Yo, Celso Xavier Atarihuana Sandoval, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **“Optimización del proceso de molienda para la recuperación del mineral oro (Au) en la Planta de Beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo, de la Jurisdicción de la provincia de El Oro”**, como requisito para optar por el título de **Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veinte seis días del mes de febrero de dos mil veinticinco.

**Firma:**

**Autor:** Celso Xavier Atarihuana Sandoval

**Cédula:** 1103527832

**Dirección:** Loja

**Correo electrónico:** celso.atarihuana@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0994027896

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director de Trabajo de Titulación:** Ing. Jimmy Stalin Paladines PhD

## **Dedicatoria**

A Dios y a mi hermosa familia a mis padres María Aidée, Celso Manuel, a mis hermanos María Gabriela y Eduardo Fabián, por su apoyo, ya que han sido pilares fundamentales en mi vida, en mi camino y así poder llegar a cumplir una meta más planteada en mi vida, de igual manera a mis amigos, compañeros por ser partícipes en este logro.

*Celso Xavier Atarihuana Sandoval*

## **Agradecimiento**

A mi familia por el apoyo brindado y su paciencia.

Al señor Fabian Marín, representante de la Planta de Beneficio MAFRE, por facilitar el acceso a las instalaciones y proporcionar información.

Al director de trabajo de Titulación: Ing. Jimmy Stalin Paladines PhD, por brindarme el apoyo, asesoría para poder cumplir con el tema de investigación planteado y el aporte para la implementación de la investigación al titular de la planta de beneficio MAFRE.

A los docentes del tribunal, por brindar la asesoría para poder cumplir con el tema de investigación planteado, en el presente estudio.

A mis colegas, amigos y compañeros de trabajo, colaboradores en la presente propuesta de investigación, que me han brindado aportes, ideas para el desarrollo de mi investigación, gracias por todo.

*Celso Xavier Atarihuana Sandoval*

## Tabla de Contenido

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Carta de autorización</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Tabla de Contenido</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>x</b>
<b>Índice de anexos</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Resumen</b> .....	<b>2</b>
Abstract .....	3
<b>3. Introducción</b> .....	<b>4</b>
Objetivo General .....	5
Objetivos Especificos .....	5
<b>4. Marco teórico</b> .....	<b>6</b>
4.1. Minería .....	6
4.2. Beneficio de minerales .....	6
4.3. Propiedades físico-mecánicas .....	6
4.3.1. <i>Propiedades físicas.</i> .....	6
4.3.2. <i>Propiedades mecánicas.</i> .....	7
4.4. Caracterización mineralógica .....	7
4.4.1. <i>Descripción petrográfica</i> .....	8
4.4.2. <i>Fluorescencia de rayos x</i> .....	8
4.4.3. <i>Ensayo al fuego</i> .....	8
4.5. Proceso de tratamiento y beneficio .....	9
4.5.1. <i>Trituración.</i> .....	9
4.5.2. <i>Molienda.</i> .....	9
4.5.3. <i>Movimiento de la carga en los molinos</i> .....	13
4.5.4. <i>Optimización de Procesos.</i> .....	13
4.5.5. <i>Clasificación de tamaños</i> .....	13
4.5.6. <i>Recuperación gravimétrica</i> .....	14
4.5.7. <i>Cianuración</i> .....	15
4.6. Métodos de muestreo .....	15
<b>5. Metodología</b> .....	<b>17</b>

5.1.	Área de estudio .....	17
5.2.	Acceso.....	18
5.3.	Clima.....	19
5.4.	Sísmica.....	20
5.5.	Geomorfología .....	21
5.6.	Hidrología .....	23
5.7.	Materiales.....	24
	5.7.1. <i>Materiales de campo</i> .....	24
	5.7.2. <i>Materiales de laboratorio</i> .....	25
	5.7.3. <i>Materiales de oficina</i> .....	25
	5.7.4. <i>Materiales de geoprocesamiento</i> .....	25
5.8.	Procedimiento .....	26
	5.8.1. <i>Primer objetivo: Analizar el proceso de molienda actual en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.</i> .....	26
	5.8.2. <i>Segundo objetivo: Caracterizar las propiedades físico – mecánicas y mineralógicas del mineral a procesar en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.</i> .....	27
	5.8.3. <i>Tercer objetivo: Determinar el grado de liberación del mineral con la finalidad de optimizar el proceso de molienda “MAFRE” código 390379.</i> .....	30
<b>6.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>34</b>
6.1.	Análisis del proceso actual en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379 .....	34
	6.1.1. <i>Trituración</i> .....	35
	6.1.2. <i>Molienda</i> .....	35
	6.1.3. <i>Recuperación gravimétrica</i> .....	38
	6.1.4. <i>Cianuración</i> .....	38
	6.1.5. <i>Elusión</i> .....	39
	6.1.6. <i>Relaves</i> .....	40
6.2.	Caracterizar las propiedades físico-mecánicas y mineralógicas.....	40
	6.2.1. <i>Geología</i> .....	40
	6.2.2. <i>Análisis petrográfico del material de stock</i> .....	45
	6.2.3. <i>Propiedades físicas</i> .....	46
	6.2.4. <i>Propiedades mineralógicas</i> .....	47
6.3.	Optimización del proceso de molienda.....	48
	6.3.1. <i>Variables del molino</i> .....	49
	6.3.2. <i>Granulometría</i> .....	51
	6.3.3. <i>Ensayo de recuperación</i> .....	52
	6.3.4. <i>Circuito de molienda propuesto</i> .....	53

6.3.5. <i>Análisis económico</i> .....	54
<b>7. Discusión</b> .....	<b>56</b>
<b>8. Conclusiones</b> .....	<b>58</b>
<b>9. Recomendaciones</b> .....	<b>59</b>
<b>10. Bibliografía</b> .....	<b>60</b>
<b>11. Anexos</b> .....	<b>65</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> En la figura de muestran los diferentes mecanismos de quebrado. Wills, 1994	10
<b>Figura 2.</b> Molinos semiautógenos. Blanco, s.f.	12
<b>Figura 3.</b> Movimiento de la carga. Wills, 1994.	13
<b>Figura 4.</b> Hidrociclón. Blanco, s.f.	14
<b>Figura 5.</b> Ubicación de la zona de estudio.	18
<b>Figura 6.</b> Planta de beneficio.	18
<b>Figura 7.</b> Acceso a la zona de estudio. Google Maps, (2024)	19
<b>Figura 8.</b> Vía hacia la planta de beneficio.	19
<b>Figura 9.</b> Clima del área de estudio. Base de información de red de estaciones meteorológicas. INAMHI, 2017.	20
<b>Figura 10.</b> Sísmica del área de estudio. Información Sísmica de la provincia de el Oro. EPN, 2024.	21
<b>Figura 11.</b> Geoformas del área de estudio.	22
<b>Figura 12.</b> Geomorfología del área de estudio. SIGTIERRAS, 2017.	22
<b>Figura 13.</b> Río Amarillo, cantón Portovelo.	23
<b>Figura 14.</b> Río Calera, cantón Portovelo.	24
<b>Figura 15.</b> Hidrología del área de estudio. SENAGUA, 2018.	24
<b>Figura 16.</b> Zona de Stock planta de beneficio “MAFRE”.	28
<b>Figura 17.</b> Recolección de muestra en stock.	28
<b>Figura 18.</b> Muestra en fracciones (Cuarteo).	29
<b>Figura 19.</b> Resistencia a la comprensión simple.	30
<b>Figura 20.</b> Muestra seca.	31
<b>Figura 21.</b> Muestra homogeneizada y cuarteada.	32
<b>Figura 22.</b> Muestra pesada.	32
<b>Figura 23.</b> Muestra en los tamices.	32
<b>Figura 24.</b> Muestra clasificada a malla #200.	33
<b>Figura 25.</b> Muestra pasada en malla #200.	33
<b>Figura 26.</b> Planta de beneficio MAFRE - Titular Minero, (2024).	34
<b>Figura 27.</b> Trituración.	35
<b>Figura 28.</b> Molienda.	35
<b>Figura 29.</b> Recuperación gravimétrica.	38
<b>Figura 30.</b> Cianuración.	39
<b>Figura 31.</b> Esquema del proceso actual de la planta de beneficio MAFRE.	39
<b>Figura 32.</b> Geología regional del área de estudio. IGME, 2014.	42
<b>Figura 33.</b> Afloramiento 1 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.	43
<b>Figura 34.</b> Afloramiento 2 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.	43
<b>Figura 35.</b> Afloramiento 3 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.	44
<b>Figura 36.</b> Afloramiento 4 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.	44
<b>Figura 37.</b> Geología Local.	45
<b>Figura 38.</b> Molino de pruebas UNL.	49
<b>Figura 39.</b> Medio Molturante	50
<b>Figura 40.</b> Curva granulométrica.	52
<b>Figura 41.</b> Circuito de molienda propuesto.	54
<b>Figura 42.</b> Análisis económico	55

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Materiales de campo .....	25
<b>Tabla 2.</b> Materiales de laboratorio .....	25
<b>Tabla 3.</b> Materiales de oficina .....	25
<b>Tabla 4.</b> Materiales de geoprocesamiento .....	255
<b>Tabla 5.</b> Puntos de muestreo de zona de stock .....	28
<b>Tabla 6.</b> Ley de stock de mineral.....	34
<b>Tabla 7.</b> Ley de salida del molino de prueba .....	37
<b>Tabla 8.</b> Ley de oro del relave. ....	40
<b>Tabla 9.</b> Ubicación de afloramientos .....	42
<b>Tabla 10.</b> Densidad .....	46
<b>Tabla 11.</b> Resistencia a la compresión simple .....	47
<b>Tabla 12.</b> Propiedades mineralógicas .....	48
<b>Tabla 13.</b> Análisis de muestra salida de molino de bolas .....	52
<b>Tabla 14.</b> Análisis económico .....	54

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Ficha de campo para análisis del proceso actual .....	65
<b>Anexo 2.</b> Caracterización macroscópica de muestras de mano del sector San José .....	67
<b>Anexo 3.</b> Ley de stock de mineral .....	70
<b>Anexo 4.</b> Análisis de compresión simple .....	72
<b>Anexo 5.</b> Análisis mineralógico .....	73
<b>Anexo 6.</b> Prueba de salida de Molino .....	75
<b>Anexo 7.</b> Certificado de traducción del resumen .....	77

## **1. Título**

**“Optimización del proceso de molienda para la recuperación del mineral oro (Au) en la Planta de Beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo, de la Jurisdicción de la provincia de El Oro”.**

## 2. Resumen

La presente investigación “Optimización del proceso de molienda para la recuperación de mineral Oro (Au) en la Planta de Beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo de la Jurisdicción de la provincia de El Oro”, se realizó para mejorar las condiciones del proceso de molienda actual ya que, no logra recuperar la cantidad óptima de oro esperada, asociando al proceso de molienda. El enfoque metodológico utilizado fue analítico y sintético, recopilando información minera y metalúrgica en el área, con toma de muestras geológicas y análisis físico, químico y mineralógico para determinar el grado y tiempo óptimos de molienda. El proceso de extracción de oro comenzó con la trituración del mineral en molinos chilenos, seguido por gravimetría, cianuración y elusión. Se encontró una ley de 16.50 g/ton en el mineral y 1.13 g/ton en los relaves, lo que indica pérdidas significativas y la necesidad de optimizar la recuperación. Referente a las propiedades físico- mecánicas, mineralógicas, la planta está ubicada en el Distrito Minero Zaruma-Portovelo, sobre aluviales cuaternarios, con rocas volcánicas extrusivas, principalmente brechas andesíticas, que contienen SiO<sub>2</sub> y CaCO<sub>3</sub> y presentan una resistencia a la comprensión simple que soporta cargas considerables. Desde este contexto, se ajustaron parámetros de molienda, logrando un volumen de 0.041 m<sup>3</sup>, un grado de llenado del 26%, un diámetro de bolas de 1.29 pulgadas, y un tamaño óptimo de partícula de 75 micras; para verificar la eficacia del circuito después de la molienda, se envió la muestra al laboratorio Albexxus, donde se logró obtener un contenido de oro de 13.12 g/t, con 12.80 g/t recuperables por cianuración, utilizando 4.126 kg de cal y 12.048 kg de cianuro por tonelada. Finalmente, se propuso un circuito optimizado que incluye trituración, molino de bolas y un hidrociclón para remoler las partículas mayores a 75 micras, garantizando un proceso eficiente de molienda para la recuperación del mineral oro en la planta de beneficio “MAFRE”.

**Palabras claves:** molienda, mineral, planta de beneficio, circuito, recuperación.

## **Abstract**

The present investigation “Optimization of the milling process for the recovery of gold ore (Au) in the beneficiation plant MAFRE code 390379 located in the El Salado sector, in the Portovelo parish, in the Portovelo canton, of the Jurisdiction of the province of El Oro”, was carried out to improve the conditions of the current milling process since it does not manage to recover the expected optimum amount of gold, associated to the milling process. The methodological approach used was analytical and synthetic, gathering mining and metallurgical information in the area, with geological sampling and physical, chemical and mineralogical analysis to determine the optimum degree and time of milling. The gold extraction process started with ore crushing in Chilean mills, followed by gravimetry, cyanidation and elution. A grade of 16.50 g/ton in the ore and 1.13 g/ton in the tailings was found, indicating significant losses and the need to optimize recovery. Regarding the physical-mechanical and mineralogical properties, the plant is located in the Zaruma-Portovelo Mining District, on quaternary alluvial deposits, with extrusive volcanic rocks, mainly andesitic breccias, which contain SiO<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> and present a simple compressive strength that supports considerable loads. From this context, grinding parameters were adjusted, achieving a volume of 0.041 m<sup>3</sup>, a filling degree of 26%, a balls diameter of 1.29 inches, and an optimum particle size of 75 microns; to verify the efficiency of the circuit after grinding, the sample was sent to the Albexus laboratory, where a gold content of 13.12 g/ton was obtained, with 12.80 g/ton recoverable by cyanidation, using 4.126 kg of lime and 12.048 kg of cyanide per ton. Finally, an optimized circuit was proposed that includes trituration, ball mill and a hydrocyclone to remove particles larger than 75 microns, guaranteeing an efficient milling process for the recovery of gold ore in the “MAFRE” beneficiation plant.

**Key words:** grinding, ore, beneficiation plant, circuit, recovery.

### 3. Introducción

El procesamiento de minerales, algunas veces llamado tratamiento de menas es un proceso, que se dedica a la extracción del mineral y prepara la mena para la extracción del metal valioso, en el caso de las menas metálicas, pero además da como resultado un producto con final comercial (Wills, 1994, p. 33).

La mayoría de los metales y minerales extraídos en todo el mundo requieren algún tipo de procesamiento para extraer materiales puros y listos para usar; el negocio del procesamiento de minerales ha jugado un papel fundamental en la historia (HAZEMAG, s.f.). Asimismo, el control de procesos avanzados y los sistemas de control optimizados son claves para obtener un mejor producto con menor consumo de energía, agua y tiempo, ya que son los factores en los cuales se enfocan las complicaciones en procesos como la molienda, ante esto se recalca que, la meta es desafiante debido a la complejidad de las operaciones (Rodríguez, 2021).

En América Latina, las principales empresas mineras, continúan desarrollando metodologías y herramientas para abordar el problema de la variabilidad en las características del mineral (como el grado, la asociación mineralógica, la dilución y la dureza del mineral). La variabilidad de mejoramiento metalúrgico no se puede atribuir a unos cuantos parámetros (recuperación, grado, tamaño) o incluso a combinaciones simples de los parámetros en las pruebas de ciclo abierto, cerrado y por lotes a escala y las pruebas de planta piloto. En la mayoría de los casos estas pruebas presentan diferentes problemas con tamaños del producto de molienda, los cuales resultan ampliamente diferentes. (Meraz, 2019)

El procesamiento de minerales en el país, ha ido mejorando notablemente, sin embargo, Tapia, (2023), expresa que la mayor concentración de plantas de beneficio se encuentra en El Oro, Azuay, Zamora Chinchipe, Guayas, Pastaza, Tungurahua y Cotopaxi, la mayoría de ellas procesan productos externo es decir son plantas de alquiler, por ende las menas no son iguales y presentan problemas a la hora de la recuperación, convirtiéndose en pérdidas para los mineros que en su mayoría son artesanales y requieren de estos servicios (Rodas, 2022).

En la provincia de El Oro las plantas se localizan dentro del muy conocido Distrito aurífero Portovelo Zaruma, en donde se realiza actividad minera desde hace más de 100 años, con aglomeraciones productivas en el río Amarillo sector de El Salado, El Pache,

Malvas, Ortega, Puente Buza y Muluncay. Abarcando la jurisdicción de los Cantones Portovelo y Zaruma (Salinas y Pillajo, s.f.).

La planta de beneficio en estudio “MAFRE” ubicada en el sector El Salado cantón Portovelo, tiene deficiencia en el proceso de molienda actual ya que, no logra recuperar la cantidad óptima de oro esperada, lo cual se asocia a una deficiencia en el proceso de molienda, debido a que los análisis reportan una ley de 90 % en la pulpa proveniente de molienda y existe un porcentaje de pérdida del 10%

Por tanto, la granulometría del producto de molienda no alcanza la distribución de tamaño ideal requerida por las etapas subsiguientes del proceso de recuperación, esto compromete la eficiencia de separación y la recuperación óptima del mineral de oro, afectando negativamente los rendimientos metalúrgicos y económicos de la planta. Por ello, el objetivo de la presente investigación consistirá en optimizar el proceso de molienda para la liberación del mineral oro con la finalidad de aumentar la recuperación final.

### **Objetivo general**

- Optimizar el proceso de molienda para la liberación del mineral oro con la finalidad de aumentar la recuperación final.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el proceso de molienda actual en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.
- Caracterizar las propiedades físico – mecánicas y mineralógicas del mineral oro a procesar en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.
- Determinar el grado de liberación del mineral oro con la finalidad de optimizar el proceso de molienda “MAFRE” código 390379.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Minería

Según Banco Central del Ecuador (2017) “la minería es una actividad económica que comprende el proceso de extracción, explotación y aprovechamiento de minerales que se hallan en la superficie terrestre con fines comerciales” (p.5)

### 4.2. Beneficio de minerales

El beneficio de minerales metálicos de acuerdo a Folchi (2005) se entiende como como “un conjunto de operaciones mecánicas, químicas o biológicas destinadas a obtener ciertos elementos metálicos contenidos en algunas rocas de la corteza terrestre, en las que se movilizan, transforman y consumen grandes cantidades de materia” (p.33).

### 4.3. Propiedades físico-mecánicas

Las propiedades físico-mecánicas de los materiales vienen determinadas por su composición química y su estructura interna, como el tamaño del grano o la estructura cristalina. Sin embargo, estas propiedades pueden alterarse bajo determinadas condiciones, como los procesos de trabajo del metal y el tratamiento térmico pueden modificar los materiales y sus propiedades físicas como la densidad y la conductividad eléctrica. Esto resulta realmente útil, ya que las nuevas propiedades pueden ser más adecuadas para ciertas aplicaciones (Infinitia, 2021).

#### 4.3.1. Propiedades físicas.

- **Densidad**

De acuerdo a Velásquez (s.f.) la densidad es una propiedad intensiva de la materia, es decir, no depende de la cantidad de sustancia; no obstante, sí depende de la temperatura. La densidad de una sustancia se define como el cociente de su masa por cada unidad de volumen; por lo tanto, si conocemos la masa y el volumen de una sustancia (sólida, líquida o gaseosa), se puede determinar su densidad a través de la expresión:

$$p = \frac{m}{V}$$

donde:  $p$  es la densidad,  $m$  la masa y  $V$  el volumen de la sustancia considerada.

- **Porosidad**

Según Goldmann (2018) “la porosidad  $\emptyset$  es el volumen ocupado por el espacio poral en una roca normalizado con el volumen total de la misma.”

$$\emptyset = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen total}}$$

- **Contenido de humedad**

En general el término “humedad” se usa para describir la cantidad de agua que tienen los materiales o sustancias. Debido a que la mayoría de los materiales sólidos están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total ( $m_h$ ) del material es igual a la suma de su masa seca ( $m_s$ ) y de su masa de agua ( $m_{H_2O}$ ) (Martines y Lira, 2010).

$$m_h = m_s + m_{H_2O}$$

#### **4.3.2. Propiedades mecánicas.**

De acuerdo a Iglesias (2013) las propiedades mecánicas se refieren a las “propiedades de los sólidos que se manifiestan cuando aplicamos una fuerza. Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas: las cargas o fuerzas actúan momentáneamente, tienen carácter de choque.”

- **Resistencia a la compresión simple**

Pérez et al. (2019) explica que, la prueba de compresión simple es una prueba que de forma rápida proporciona la resistencia de un material. Ésta consiste en colocar el espécimen en un equipo para aplicarle carga hasta hacerlo fallar y determinar su resistencia máxima.

#### **4.4. Caracterización mineralógica**

Es una herramienta que brinda soporte a la caracterización fisicoquímica, geoquímica y metalúrgica; por lo cual, la suma de estas tres áreas se convierten en el soporte para diseñar un diagrama de flujo de separación de los minerales en un proceso de beneficio, el cual no presente alteraciones en la producción, baja calidad de los productos y/o porcentajes poco considerables en las recuperaciones del mineral de interés

deficiencia en la recuperación, generación de sustancias nocivas, contaminación de los minerales a recuperar, es decir, la caracterización mineralógica es una herramienta que optimiza el proceso de beneficio de la mena, especialmente en aquellas de difícil beneficio o refractarias (Cañola et al., 2015).

#### **4.4.1. Descripción petrográfica**

Comprende la descripción macroscópica y microscópica de una muestra. La descripción macroscópica se realiza a través de una inspección visual ayudada por una lupa de mano o un estereomicroscopio, la cual consiste en la identificación de minerales constituyentes de la roca mediante pruebas físicas como color, forma, dureza, etc. y pruebas químicas: reacción con ácido clorhídrico al 10%. Luego, se realiza una descripción microscópica de las secciones delgadas a través del microscopio de polarización, en este punto se determina y describe los minerales constituyentes de la roca, asociaciones, aspectos texturales, porcentajes cualitativos, alteraciones y se procede a dar la clasificación de la roca de acuerdo a la composición mineralógica hallada (Alván, 2018).

#### **4.4.2. Fluorescencia de rayos x**

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una de las técnicas más importantes en el área del análisis químico instrumental. Permite el análisis cualitativo y cuantitativo de todo tipo de materiales amorfos y cristalinos en tiempos relativamente cortos, a técnica consiste en el estudio de las emisiones de fluorescencia de rayos X generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. Al excitarse los átomos de los elementos presentes en la muestra, los electrones de las capas más internas son arrancados o se promocionan a niveles de energía superiores dando lugar a huecos electrónicos (Mañas, 2024).

#### **4.4.3. Ensayo al fuego**

Es un método analítico que consiste en fundir a la muestra usando reactivos adecuados para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por silicatos complejos y una fase metálica constituida por plomo, el cual colecta el oro (Au); que posteriormente será sometidos a Análisis Químico (Narváez y Guerrón, 2020).

#### **4.5. Proceso de tratamiento y beneficio**

El proceso de beneficio comprende una serie de actividades que inician con la conminación abarcando fases como la trituración y molienda, luego se realiza el proceso de beneficio que dependiendo de la mena puede ser cianuración o flotación, a continuación, se describen los procesos:

##### **4.5.1. Trituración.**

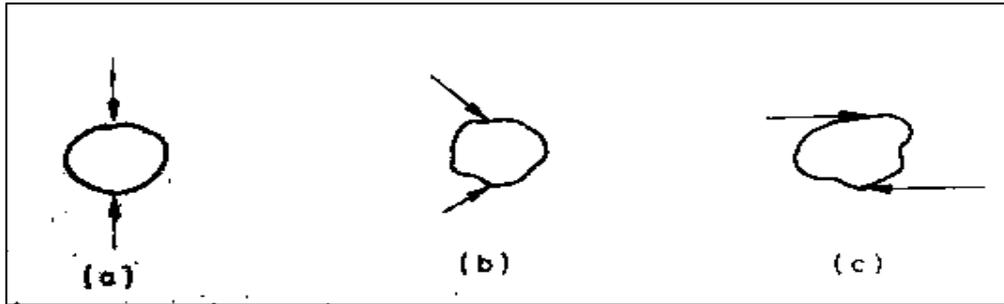
“La trituración es el primer paso mecánico para producir partículas a un determinado tamaño para la subsecuente liberación de valores de la ganga y su posterior concentración” (Blanco, s.f.).

En el proceso de minería tiene como objetivo reducir las rocas minerales provenientes directamente de la mina subterránea de un tamaño aproximado de 500 mm hasta un tamaño de menos de 10 mm, listo para el proceso de molienda. Entre los equipos empleados en este proceso están las trituradoras de quijada y de cono (Peinado, 2017).

##### **4.5.2. Molienda.**

La molienda es la operación unitaria que constituye el paso final de reducción de tamaño o liberación de los valores metálicos contenidos en los minerales, dicha operación se efectúa mediante una combinación de fuerzas de impacto y abrasión y puede efectuarse en forma de pulpa o bien en seco, por lo general, la molienda está precedida de una sección de trituración y, por lo tanto, la granulometría de los minerales que entran a la sección molienda es casi uniforme (Blanco, s.f.).

Según Wills (1994), la molienda se logra por varios mecanismos, incluyendo impacto o compresión (Ver Figura 1), debido a las fuerzas aplicadas casi normalmente a la superficie de la partícula; estos mecanismos distorsionan las partículas y cambian su forma más allá de ciertos límites determinados por su grado de elasticidad lo cual ocasiona que se quiebren.



**Figura 1.** En la figura se muestran los diferentes mecanismos de quebrado. Wills, 1994

- **Velocidad de rotación.**

La velocidad de rotación del molino es un parámetro de importancia tanto en el consumo como en la operación de molienda que realiza. Este giro del molino sobre su eje produce el desplazamiento de la carga, hasta que el par resistente por el peso de la carga iguala al par motor transmitido, y produce el movimiento relativo de los elementos que la componen entre sí, produciéndose la fricción, choque, etc., que produce la molienda del mineral y el desgaste de los elementos molidores que deben ser repuestos periódicamente (Blanco, s.f.).

- **Carga de bolas.**

La determinación de la carga de bolas al interior de los molinos, puede efectuarse con mediciones directas de presión y potencia en los equipos. La medición del nivel de carga y bolas en un Molino, teniendo solamente como variables principales de entrada la presión en los descansos y la potencia, es factible si se consideran las variables de porcentaje de sólidos y velocidad de giro del Molino. De acuerdo con Cerda (2021) la determinación del nivel de bolas  $Jb$ , es posible observarla en la ecuación:

$$Jb = \frac{m_{load} - Jc * V_t * P_{sl}}{V_t * (1 - fv) - P_{sl} * (Jp * fv - 1)}$$

- **Tiempo de residencia.**

El tiempo de permanencia del material a moler dentro del molino depende fundamentalmente del tamaño del molino, la velocidad de giro, que facilita el desplazamiento de la pulpa en el interior del molino, y del tipo de flujo que se establece en el interior. El tiempo medio de permanencia se obtiene por relación entre el volumen ocupado del cilindro y el flujo que se establece, teniendo en consideración el volumen real ocupado por el mineral a moler (Blanco, s.f.).

- **Tamaño de partícula.**

“El proceso de molienda se caracteriza por un tamaño de salida de partículas que puede estar entre algunos mm y algunas  $\mu\text{m}$  dependiendo de los requerimientos” (Blanco, s.f.).

- **Índice de bond**

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda (Lamorú, 2012). El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera ley de la fragmentación propuesta por el propio Bond, la cual plantea:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

En la que  $W$  es el consumo energético específico, en kWh/t,  $d$  y  $D$  son los tamaños que dan un pasante del 80 % en producto y alimentación respectivamente, expresados en micras, y  $W_i$  es el índice de trabajo o índice de Bond en kWh/t (Lamorú, 2012).

- **Tipos de molinos**

- **Molino de bolas**

Según Blanco (s.f.) el molino de bolas es el equipo más importante después de la trituración de los materiales y se utiliza ampliamente en el campo de minerales, industria química, construcción, cemento, materiales de construcción, materiales refractarios, fertilizantes químicos, la concentración de los metales, la producción de cerámica, etc.

- **Molino de barras**

Estos molinos que trabajan normalmente en la trituración primaria, tamaños entre 2 m y 0,5 mm, se caracterizan por que los elementos molturadores son barras, las cuales producen en la zona de entrada un esponjamiento por el efecto de los granos mayores que permite desplazarse a los granos menores sin sufrir fragmentación hasta una zona de avance dentro del molino que si les afecta y al contrario, los granos mayores, en la entrada, soportan fuertes presiones por el peso que gravita sobre ellos y se fragmentan rápidamente (Blanco, s.f.).

- **Molinos de guijarros**

Es constructivamente similar a los molinos de bolas con la diferencia del elemento molturador, que suelen ser trozos de sílex o pedernal. El revestimiento es goma o sílex en lugar de acero. La capacidad del molino es un 30% de la correspondiente al molino de bolas y el consumo de energía sigue la misma proporción. Se emplea para materiales que no pueden contaminarse con hierro como la arena de vidrio o materiales para la fabricación de pinturas que exigen alta pureza del mineral molido (Blanco, s.f.).

➤ **Molinos autógenos**

En estos equipos el elemento molturador son cuerpos del propio material a moler. El material grueso va a moler al fino, luego interesa que exista diferencia de dureza entre las partes gruesas y las finas. Las partes gruesas también son molidas en el proceso. En este tipo de molino, el elemento que muele no tiene mucha dureza, así que la trayectoria de caída tiene que ser mayor para conseguir la energía necesaria para la fragmentación (Blanco, s.f.).

➤ **Molinos semiautógenos**

Son en todo similares a los molinos de bolas con la característica básica de que el elemento molturador lo constituye una mezcla de bolas y elementos del propio mineral a moler de tamaño grande o notablemente mayor que el correspondiente a un molino solo de bolas (Ver Figura 2). Tiene, como el caso de los autógenos, un aumento en el diámetro del molino frente al correspondiente a un molino de bolas, para compensar la diferencia de densidad (energía necesaria para la molienda) del material a moler frente a las bolas de acero o fundición (Blanco, s.f.).



**Figura 2.** Molinos semiautógenos. Blanco, s.f.

#### 4.5.3. *Movimiento de la carga en los molinos*

La fuerza impulsadora del molino se transmite por el revestimiento a la carga. A velocidades relativamente baja, o con revestimientos lisos, las formas del medio tienen a rodar hacia abajo hasta el pie del molino y la pulverización que experimentan ocurre por abrasión, de ahí que se definen dos tipos de movimientos:

- **Cascada:** Conduce a una molienda más fina, con producción creciente de lamas y mayor desgaste de revestimiento.
- **Catarata:** Produce una conminución por impacto y un producto final más grueso con menor desgaste del revestimiento. La Figura 3, esquematiza ambos procesos:

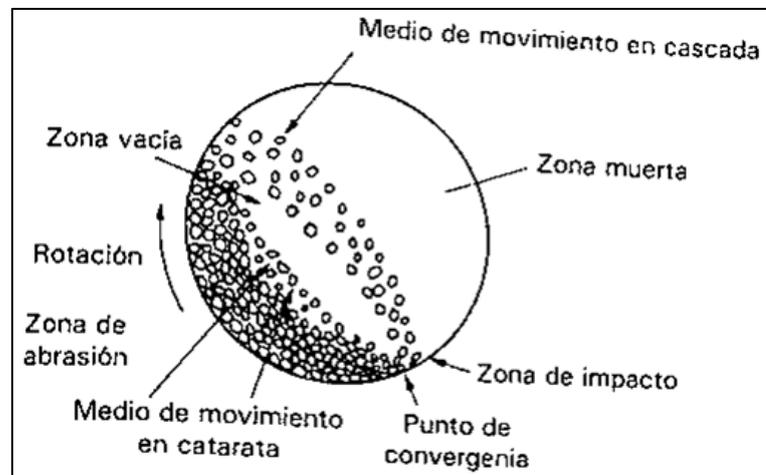


Figura 3. Movimiento de la carga. Wills, 1994.

#### 4.5.4. *Optimización de Procesos.*

La optimización de las operaciones de tratamiento de minerales puede aumentar la eficacia, la productividad y la rentabilidad, con estrategias de control y la instrumentación a medida que cambian los volúmenes de producción y surgen nuevos retos. Los sistemas de automatización y supervisión en tiempo real pueden minimizar los tiempos de inactividad y los cambios inesperados en los procesos, permitiendo más funcionamiento estable (Metso, s.f.).

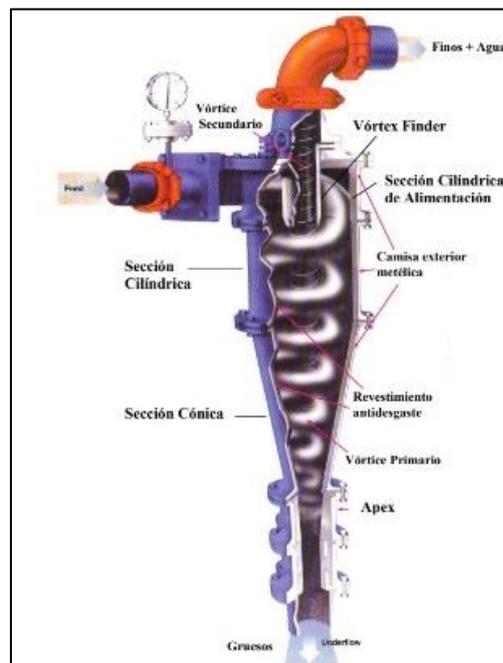
#### 4.5.5. *Clasificación de tamaños*

La Clasificación se define como la separación de partículas minerales en dos o más fracciones granulométricas en función de la velocidad de asentamiento dentro de un fluido (normalmente agua). La clasificación en húmedo se aplica a partículas minerales

que son demasiado finas para ser clasificadas con buenos rendimientos por medio del cribado (tamaños comprendidos entre 1 mm y 3 mm) (Berit, 2021).

Los hidrociclones son unidades muy simples, pero de una gran importancia en los procesos de la industria minera. El rango práctico para la clasificación está entre las 40  $\mu\text{m}$  y las 400  $\mu\text{m}$ , aunque existen excepciones (5-1000  $\mu\text{m}$ ). Se fabrican en una amplia variedad de diámetros desde los 13 mm hasta los 900 mm (Blanco, s.f.).

Su funcionamiento se basa en la clasificación que se produce aprovechando la aparición de grandes fuerzas de centrifugación (hasta de 10000 g's. en tamaños pequeños). Los hidrociclones se fabrican en acero, imponiéndose en muchas aplicaciones los materiales plásticos. Interiormente están constituidos por revestimientos de desgaste de material cerámico, Nihard, poliuretano, neopreno, etc., (Blanco, s.f.). La Figura 4, muestra un hidrociclón.



**Figura 4.** Hidrociclón. Blanco, s.f.

#### **4.5.6. Recuperación gravimétrica**

Los métodos de separación por gravedad se usan para tratar una gran variedad de materiales, que varían desde los sulfuros pesados como la galena hasta el carbón. Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente densidad relativa por su movimiento relativo respondiendo a la gravedad y a algunas fuerzas. Para una separación efectiva es indispensable que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga (Wills, 1994).

#### **4.5.7. Cianuración**

De forma general, el proceso de cianuración es el más ampliamente utilizado para la extracción de oro y plata a partir de sus minerales. Este proceso convencional utiliza oxígeno que se encuentra en el aire como oxidante y al ion  $CN^-$  como agente complejante. Este método se basa en que el oro y la plata se disuelven fácilmente en una solución acuosa diluida de cianuro de sodio o de potasio, con relativa facilidad si se mantienen condiciones oxidantes favorables (Salinas et al., 2004).

El carbón activado es un material carbonáceo, de estructura esencialmente grafitica, con un área superficial específica que excede los 1000 m<sup>2</sup>/g, de excelentes propiedades adsorptivas, alta reactividad y una gran estructura porosa que permite el paso de las moléculas a su interior, El uso del carbón activado como adsorbente de oro a partir de soluciones cianuradas se conocía ya en 1880, sin embargo su utilización en el proceso recuperación de oro fue patentado en 1894 por Johnson y su empleo a escala industrial se desarrolló a partir de la década de 1950 (Beltrán, 2012).

El carbón utilizado para la adsorción de oro y plata, generalmente es activado a 1000 °C, se caracteriza por adsorber iones hidrógeno al estar en contacto con el agua, provocando la disminución del pH de la solución bulk (Morales, 2017).

#### **4.6. Métodos de muestreo**

Muestreo es la acción de recoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo o la técnica empleada en esta selección o la selección de una pequeña parte estadísticamente determinada para inferir el valor de una o varias características del conjunto, casi todas las decisiones que se hacen respecto de un Proyecto Minero, desde la exploración hasta el cierre de la mina, están basadas en valores obtenidos de material muestreado. Estas decisiones significan millones de dólares (Alfaro, 2002).

En todo muestreo, debe estar bien establecido lo siguiente:

1. Objetivo del muestreo.
2. Población a muestrear
3. Datos a recolectar
4. Manera de recolectar los datos

5. Grado de precisión deseado
6. Método de medida (Alfaro, 2002).

Los principales tipos de muestreo son los siguientes:

**Muestreo aleatorio simple.** - Es el método más sencillo desde el punto de vista conceptual y consiste en seleccionar al azar a todos los individuos a partir de una lista (marco de la encuesta). En la práctica, sin embargo, resulta complicado aplicarlo de manera eficaz, excepto en poblaciones pequeñas o de estructura muy simple (Casal y Mateu, 2003).

**Muestreo sistemático.** - En este método, las muestras se seleccionan siguiendo una regla fija o intervalo constante, permitiendo una distribución regular de los elementos dentro de la población. A partir de una lista ordenada, se elige un punto de partida al azar y luego se extraen los individuos a intervalos predeterminados, lo que facilita una muestra representativa y evita la acumulación de sesgos (Alfaro, 2002).

**Muestreo estratificado.** - En este método, el conjunto de datos se divide en grupos o segmentos diferenciados, los cuales no se superponen entre sí; cada segmento representa un grupo específico con características similares dentro de la población total, lo que permite seleccionar muestras de cada segmento de manera proporcional o equilibrada según su tamaño o importancia en la investigación. Esto facilita una representación precisa de la variabilidad interna de la población y mejora la precisión de los resultados al asegurar que todos los grupos estén adecuadamente representados en la muestra (Roig et al., 2017).

## **5. Metodología**

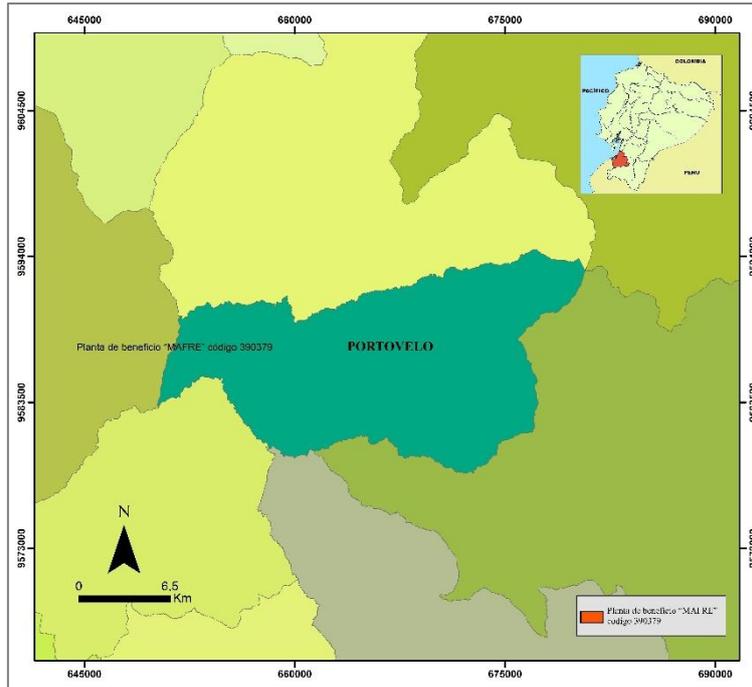
El método de estudio empleado es el método analítico y sintético, en este caso adquiriendo información minera-metalúrgica, seleccionando todos los datos in situ, para emplear técnicas analíticas que ayuden a reflejar la situación actual de la zona de estudio, con la toma de muestras geológicas, que permitieron conocer el tipo de materiales que y el análisis físico, químico y mineralógico de la mena, con ello determinar el grado óptimo de molienda, asimismo como el tiempo.

El enfoque investigativo se considera mixto: Cuantitativo puesto que, brindó resultados numéricos que son objeto de análisis y cálculos; con la obtención de parámetros específicos, índices y datos los cuales fueron objeto de análisis y comparación. Cualitativo con la previa observación y descripción en campo de las características geológicas, mineralógicas y metalúrgicas.

Considerando los datos con un tipo de investigación descriptiva, correlacional, aplicando una modalidad básica bibliográfica – documental y de campo, con un diseño investigativo de estudio transversal, los mismos que fueron empleados de acuerdo al avance y desarrollo del proyecto, destinado a una población que abarca las características minero-metalúrgicas de la planta de beneficio.

### **5.1. Área de estudio**

El trabajo de investigación se desarrolló en la planta de tratamiento y beneficio “MAFRE” código 390379, ubicada en el sector El Salado, de la parroquia Portovelo, del cantón Portovelo, de la jurisdicción de la provincia de El Oro como se muestra en la Figura 5.



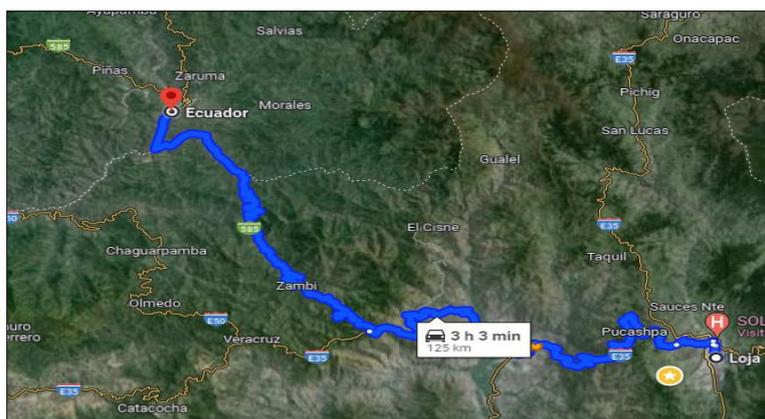
**Figura 5.** Ubicación de la zona de estudio.



**Figura 6.** Planta de beneficio.

## 5.2. Acceso

Mediante vía terrestre, si se toma como referencia la ciudad de Loja la cual se encuentra a una distancia 119 Km puede acceder a la zona a través de la vía de acceso de primer orden mediante la carretera Panamericana, siguiendo la ruta por la E50 donde se llega a San Pedro-El Cisne, vía El Cisne se toma el desvío Ambocas -Salatí - Portovelo, El Oro, desde la ciudad de Portovelo, se toma la vía en dirección al Salado, aproximadamente 1 Km, hasta llegar al lugar objeto de la inspección (Ver Figura 7).



**Figura 7.** Acceso a la zona de estudio. Google Maps, (2024)



**Figura 8.** Vía hacia la planta de beneficio.

### 5.3. Clima

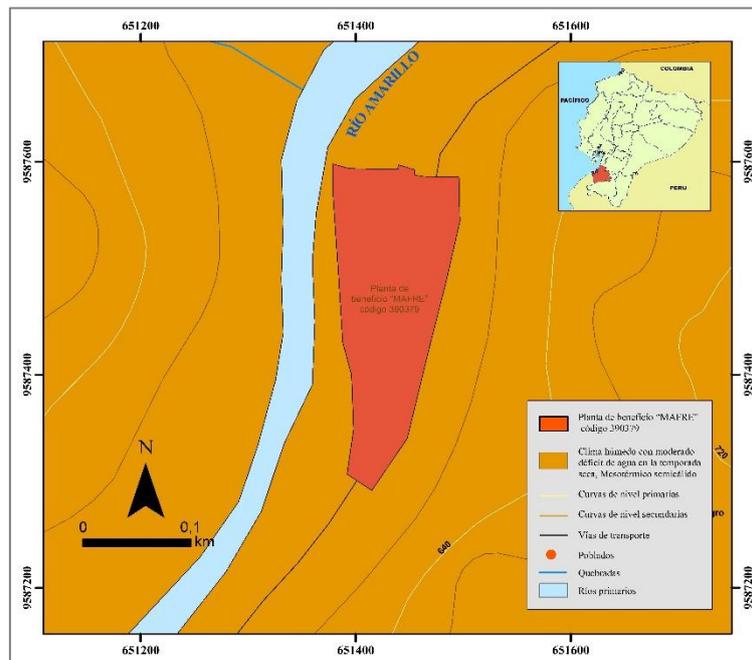
La región costera de Ecuador experimenta la influencia de la corriente fría de Humboldt y la cálida corriente de El Niño debido a su posición geográfica; además, la orientación perpendicular de los Andes respecto a los vientos alisios provoca diversas variaciones climáticas en esta área (Cadier et al., 1994). Durante la temporada seca, que se extiende de mayo a noviembre, predominan los vientos alisios fríos provenientes de zonas elevadas por la presión en el sureste del Pacífico. En este periodo, se observa una alta nubosidad y, al atardecer, la niebla suele cubrir la costa. En cambio, la temporada de lluvias, de diciembre a abril, es caracterizada por la influencia de aguas cálidas provenientes de Panamá o del fenómeno de El Niño, que calientan el aire en la superficie y generan lluvias intensas, aunque breves (Farfán, 2018).

Según el Mapa de Tipo de Clima de Ecuador a escala 1:100,000 elaborado por el (INAMHI, 2017), el área en la que se encuentra la planta de beneficio "MAFRE" tiene

un clima húmedo con un déficit moderado de agua durante la estación seca y es mesotérmico semi-cálido.

Esto implica que las temperaturas son moderadamente cálidas durante todo el año, lo que significa que los veranos no son extremadamente calurosos ni los inviernos excesivamente fríos, manteniendo un promedio de temperatura templada.

La estación seca se caracteriza por un déficit moderado de agua, lo cual implica que las lluvias disminuyen sin llegar a una aridez extrema, permitiendo una humedad relativamente alta. Sin embargo, en la temporada húmeda, la precipitación aumenta considerablemente, favoreciendo un ambiente húmedo que ayuda a mantener una vegetación densa y verde, especialmente en zonas de bosque tropical y áreas agrícolas (INAMHI, 2024).



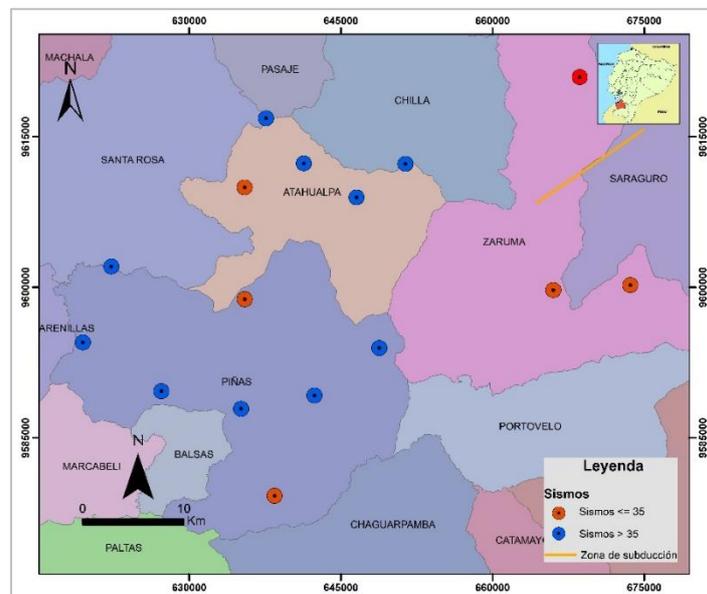
**Figura 9.** Clima del área de estudio. Base de información de red de estaciones meteorológicas. INAMHI, 2017.

#### 5.4. Sísmica

La provincia de El Oro, ubicada en el suroeste del país, forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, una región con intensa actividad sísmica que rodea el océano Pacífico y es propensa a terremotos y actividad volcánica. La alta actividad sísmica de El Oro se debe a su ubicación geológica en la zona de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, un factor importante a considerar en la planificación de infraestructura y en las medidas de seguridad para la población local (Bonifaz et al., 2021).

De acuerdo a la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional el evento sísmico más reciente con mayores consecuencias ocurrió el 18 de marzo de 2023 a las 12:12 p.m., afectando principalmente el sur de Ecuador y el Departamento de Tumbes en Perú. Este sismo, de magnitud 6.8, tuvo su epicentro cerca de la costa del Cantón Balao, a unos 80 km al sur de Guayaquil y a una profundidad de 68 km, y causó daños significativos en las provincias de Azuay, El Oro y Guayas. Hubo 16 víctimas mortales, principalmente en Machala y Cuenca (Instituto Geofísico, 2023).

Según los informes del Instituto Geofísico, no se han reportado eventos sísmicos significativos en el cantón Portovelo que impacten a la planta de beneficio. Sin embargo, en Zaruma, Atahualpa y Piñas, se registraron hasta 13 eventos sísmicos hasta 2022. De estos, 10 están relacionados con fuentes en la interfaz o son superficiales, con profundidades mayores a 35 km (representados en azul), mientras que 6 eventos profundos ocurrieron a menos de 35 km de profundidad (marcados en rojo). También se ha identificado una falla activa en la zona de subducción.



**Figura 10.** Sísmica del área de estudio. Información Sísmica de la provincia de el Oro. EPN, 2024.

## 5.5. Geomorfología

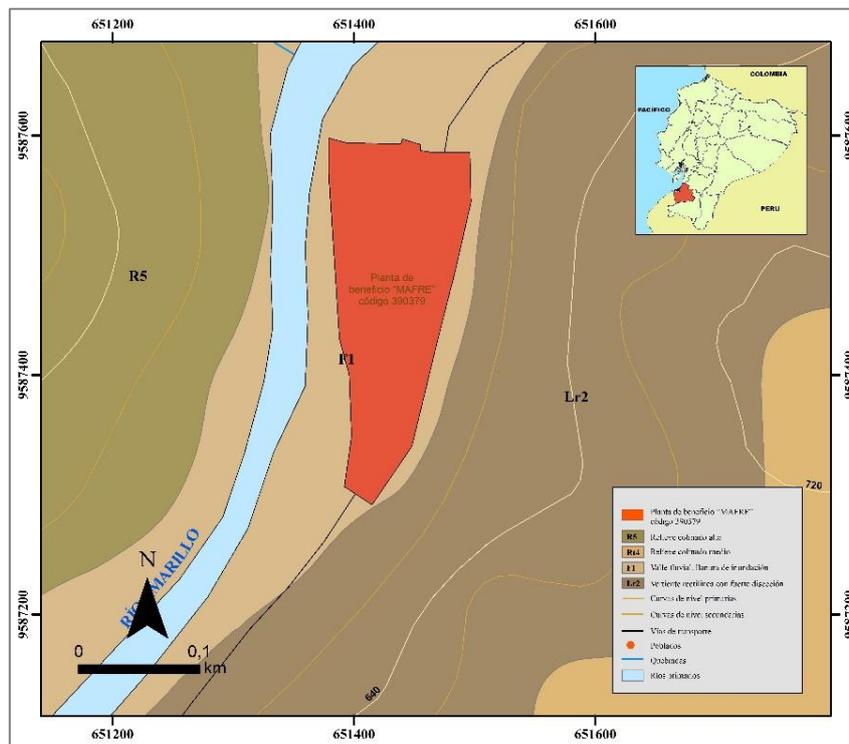
Las geoformas presentes en la zona de estudio son el resultado de procesos de erosión y desgaste de las unidades litológicas presentes en el área; el relieve refleja la diversidad del terreno y son el resultado de la interacción de factores geológicos, climáticos y geomorfológicos a lo largo del tiempo (SIGTIERRAS, 2017).

Conforme el Mapa Geomorfológico del Ecuador a escala 1:25000 elaborado por MAGAP-SIGTIERRAS en el año 2015, el área de implantación que comprende 2,42 ha intercepta en una geoforma que corresponde a Valle fluvial, llanura de inundación, como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Geoformas del área de estudio.

Esta zona es un terreno formado por la erosión adyacente a curso de agua que durante temporadas de lluvias intensas tiende a inundarse; se compone generalmente por sedimentos finos como arcilla, limo y arena que se depositan cuando el agua desborda los límites del cauce del río (GEOPORTAL, 2015).



**Figura 12.** Geomorfología del área de estudio. SIGTIERRAS, 2017.

## 5.6. Hidrología

La caracterización hidrogeológica de la zona de estudio se fundamenta en el Mapa Hidrogeológico del Ecuador a escala 1:250,000, desarrollado por SENAGUA en 2018.

En el área de estudio se encuentran adyacentes los ríos Calera y Amarillo, donde se identifican las unidades hidrogeológicas asociadas a estratos aluviales y rocas consolidadas. Las zonas aluviales, normalmente compuestas de depósitos de grava, arena y limo, son muy permeables y constituyen acuíferos importantes para el suministro de agua.

- **Río Amarillo**

Este río presenta un flujo de aguas de manera constante; el caudal promedio es de 22,98 m<sup>3</sup>/s, alimentado por diversas quebradas que permiten el procesamiento de los minerales. Entre las fuentes se encuentran: la quebrada el Salado y Limas (Agencia de regulación y control minera, 2019). Hidrogeológicamente, el río Amarillo está asociado a acuíferos aluviales que presentan alta permeabilidad, su caudal facilita la recarga de acuíferos durante la época lluviosa, aunque sufre presiones relacionadas con la contaminación minera y el uso no regulado de sus aguas.



**Figura 13.** Río Amarillo, cantón Portovelo.

- **Río Calera**

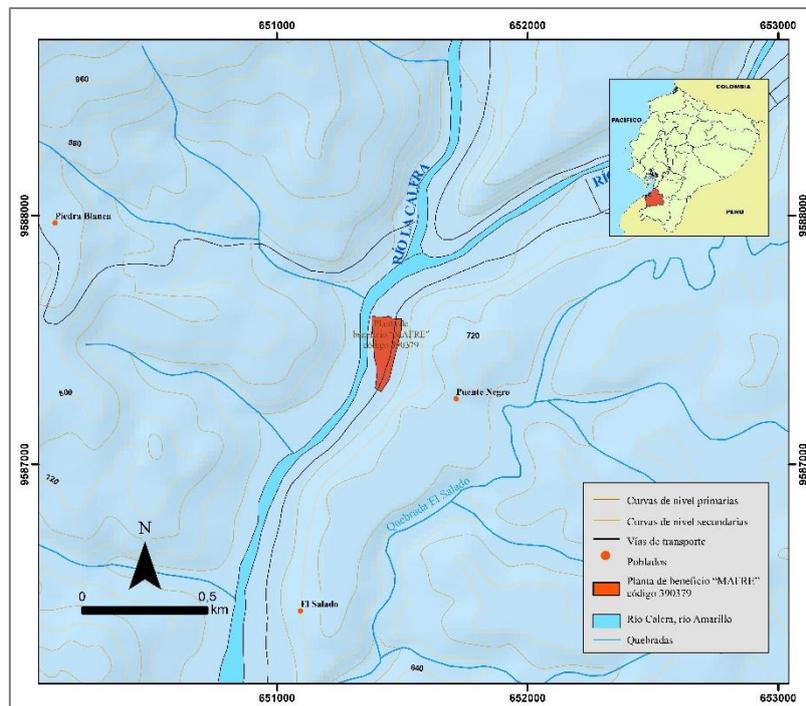
El río Calera también juega un papel importante en la dinámica hídrica del cantón Portovelo; si bien la calidad del agua se ve afectada por la minería, sus cauces discurren por zonas agrícolas y zonas con menor densidad de actividad minera. Su caudal es fundamental para las comunidades que aprovechan sus recursos para riego y actividades productivas principalmente minería y beneficio de minerales.

El río interactúa con formaciones geológicas locales, especialmente en áreas de depósitos aluviales, ayudando a formar pequeños acuíferos poco profundos. Durante la estación seca, su caudal se reduce significativamente, afectando el ecosistema local y las actividades humanas (Vela et al., 2019).



**Figura 14.** Río Calera, cantón Portovelo.

El Río Amarillo y Calera han sido conocidos por su relevancia tanto geográfica como económica en la región, brindando un recurso fundamental para la actividad minera en la zona.



**Figura 15.** Hidrología del área de estudio. SENAGUA, 2018.

## 5.7. Materiales

### 5.7.1. *Materiales de campo*

Los materiales de campo se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1.**  
*Materiales de campo*

<b>Materiales de campo</b>	
Martillo geológico	GPS
Lupa	Cinta métrica
Fundas Ziploc	Libreta de campo
Lápiz rayador	Fichas de campo
Cámara fotográfica	

Nota. La tabla muestra los materiales de campo utilizados en la investigación para recolección de datos.

### 5.7.2. *Materiales de laboratorio*

Los materiales de laboratorio se describen en la Tabla 2

**Tabla 2.**  
*Materiales de laboratorio*

<b>Materiales de laboratorio</b>	
Trituradora	Picnómetro
Cuarteador	Microscopio
Tamices	Balanza
Molinos a bolas a escala	Bomba de vacíos
Prensa para ensayos de compresión simple	Mortero
Fichas de laboratorio	

Nota. La tabla muestra los materiales de laboratorio utilizados en la investigación para recolección de datos.

### 5.7.3. *Materiales de oficina*

Los materiales de oficina se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3.**  
*Materiales de oficina*

<b>Materiales de oficina</b>	
Carta topográfica del cantón Zaruma	Fichas de campo y laboratorio
Carta geológica del cantón Zaruma	
Computadora portátil (Laptop)	

Nota. La tabla muestra los materiales de oficina utilizados en la investigación para recolección de datos.

### 5.7.4. *Materiales de geoprociamiento*

Los materiales de geoprociamiento se describen en la Tabla 4.

**Tabla 4.**  
*Materiales de geoprociamiento*

<b>Materiales de geoprociamiento</b>	
Microsoft Visio 2021	Software ArcGIS 10.8.2
Software Modismo	Microsoft Office 2021
Software MimProsim	

Nota. La tabla muestra los materiales de geoprociamiento utilizados en la investigación para recolección de datos.

## 5.8. Procedimiento

Para el desarrollo del presente trabajo se presenta la siguiente metodología:

**Fase de campo:** La fase de campo comprendió el reconocimiento de la planta de beneficio MAFRE código 390379, la caracterización de los procesos de tratamiento y beneficio y el muestreo del material mineralizado.

**Fase de laboratorio:** Se determinó las propiedades físico-mecánicas y mineralógicas de las rocas a través de ensayos de peso específico, porosidad, contenido de humedad, resistencia a la compresión simple. Análisis petrológico, ensayo al fuego, y fluorescencia de rayos x.

**Fase de oficina:** Se registró, tabuló y analizó los datos previamente obtenidos, se realizaron los cálculos para molienda y los circuitos necesarios.

### ***5.8.1. Primer objetivo: Analizar el proceso de molienda actual en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.***

Esta primera etapa se desarrolló de la siguiente manera:

1. En primera instancia se analizó el contexto general de la planta, su distribución y su extensión total, lo que permitió obtener una visión clara de la infraestructura existente, los procesos actuales y la capacidad operativa.

2. Para analizar el proceso de molienda actual se realizó una visita técnica a planta de beneficio en donde se recorrió la planta con el fin de observar y describir los procesos que se realizan en la misma. La secuencia para analizar: trituración, molienda, clasificación y cianuración, la información se registró en la ficha de campo del Anexo 1. Además, se realizó flujogramas a fin de esquematizar el proceso.

3. Se describió técnicamente los equipos de molienda, determinando su modelo, grado de llenado, velocidad crítica, tamaño del medio molidor y demás características. Con estos parámetros, se puede identificar las posibles mejoras en el proceso; para ello, se utilizaron las fichas de campo, que permitieron realizar un registro detallado y análisis comparativo de los equipos en funcionamiento, facilitando la identificación de posibles ajustes en las variables operativas para optimizar la eficiencia del proceso. Además, se evaluaron las condiciones de trabajo de cada equipo, lo que permitió detectar posibles fallos o áreas de desgaste que podrían afectar el rendimiento general del circuito.

4. Se determinó el volumen geométrico de los molinos con las siguientes expresiones:

- Energía de bond

$$EB = 10 * wi \left( \frac{1}{\sqrt{P80}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{F80}} \right)$$

- Work Index

$$wi = \frac{E}{10 * \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}}}$$

Donde:

- EB: Energía de Bond
- wi: Work Index (Índice de trabajo de Bond).
- P80: El tamaño de partícula 80% pasante en el producto de molienda.
- F80: El tamaño de partícula 80% pasante en el material de alimentación al proceso de molienda.

5. Se describió brevemente el proceso de cianuración, la etapa posterior a molienda. Es necesario comprender la influencia del tamaño de partículas en el proceso de molienda, ya que este factor tiene un impacto directo en la eficiencia de la cianuración, que es el proceso mediante el cual se extrae el oro del mineral. Conocer el tamaño adecuado de las partículas ayuda a ajustar el proceso de molienda para optimizar el grado de liberación del oro. Esto asegura que las partículas de oro estén suficientemente expuestas al cianuro en la etapa de cianuración, mejorando así la recuperación del metal precioso. La información detallada sobre este análisis y sus resultados se describe en el anexo 1 de actividades, donde se incluyeron los parámetros operativos y los ajustes realizados para maximizar la eficiencia en ambas etapas del proceso.

**5.8.2. Segundo objetivo: Caracterizar las propiedades físico – mecánicas y mineralógicas del mineral a procesar en la planta de beneficio “MAFRE” código 390379.**

Este objetivo comprendió una serie de actividades descritas a continuación:

#### **Muestreo:**

El protocolo de muestreo fue de tipo aleatorio simple y comprende la recolección de muestras al azar dentro del área de stock, el cual siguió el siguiente proceso:



**Figura 16.** Zona de Stock planta de beneficio “MAFRE”.

- Se realizó un muestro volumétrico en el stock de la planta para ello se recolectó una muestra de 3 kg para realizar los posteriores estudios. Las coordenadas DATUM UTM WGS84/17S que se muestran en Tabla 5 indican el stock que se muestreo además se aseguró que cada área estuviera debidamente representada.

**Tabla 5.**  
*Puntos de muestreo de zona de stock*

Ubicación de zona de stock UTM DATUM WGS84/17S		
Punto	Este (X)	Norte (Y)
1	651472	9587514

Nota. la tabla presenta los puntos de ubicación del muestro en la zona de stock.



**Figura 17.** Recolección de muestra en stock.

- La muestra fue cuidadosamente homogenizada para garantizar una distribución uniforme de sus componentes. Seguidamente, se llevó a cabo un proceso de cuarteo, dividiendo la muestra en fracciones hasta obtener una cantidad representativa, la cual fue debidamente etiquetada con la codificación de referencia, indicando su procedencia y la fecha de recolección para asegurar la trazabilidad del material.



**Figura 18.** Muestra en fracciones (Cuarteo).

Para resistencia a compresión simple, se buscó fragmentos de rocas sanas y homogéneas que faciliten la elaboración de cubos.

- **Análisis petrológico:** De manera preliminar se determinó la geología regional, con el fin de identificar los tipos de litologías que se encuentran. El análisis petrológico, se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional de Loja, a fin de determinar el tipo de roca, los minerales principales, secundarios y accesorios para ello se utilizó las fichas que se encuentra detalladas en el anexo 2.

**1. Propiedades físicas:** Los ensayos de densidad fueron realizados en el laboratorio químico Albexus.

- **Propiedades mecánicas:** Se determinó la resistencia a la compresión simple mediante la compresión uniaxial, este ensayo fue elaborado en los laboratorios de la UNL, mediante la norma UNE-EN-1926:2007; para ello se procede de la siguiente forma:

1. Con un fragmento de roca grande y homogéneo, se realizó cilindros en relación altura/diámetro 2.5 cm

2. Se situó la muestra en la prensa de compresión asegurándose que este correctamente alineada y calibrada.

3. Se aplicó la carga continua y uniforme a una velocidad de 1.0 MPa/s.



**Figura 19.** Resistencia a la compresión simple.

4. Se registró el resultado y se comprueba el resultado con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{\text{Fuerza de tracción aplicada}}{\text{Sección de la probeta}} \text{ [MPa]}$$

- **Propiedades mineralógicas:** Se determinó en el laboratorio metalúrgico ALBEXXUS, y se realizó fluorescencia de rayos X, con el fin de determinar los minerales presentes en la mena, de la misma forma se realizó el ensayo al fuego la con la finalidad de determinar las leyes de oro.

**5.8.3. Tercer objetivo: Determinar el grado de liberación del mineral con la finalidad de optimizar el proceso de molienda “MAFRE” código 390379.**

Para determinar el grado de liberación se analizó todas las variables que están utilizando actualmente y según ello se modificó los parámetros a evaluar son los siguientes:

**5.8.3.1. Prueba de molienda:** Se realizó una prueba de molienda en la se determinación las siguientes variables de molienda:

- **Tiempo de molienda:** Se determinó el tiempo de molienda mediante pruebas en laboratorio metalúrgico, en las cuales se estableció el tiempo necesario para liberar el mineral. En este proceso es importante la resistencia de la roca y la mineralogía del material.

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Tonelaje}}{\text{Densidad}} \text{ [horas]}$$

- **Medio molturante:** Se determinaron los siguientes parámetros:

1. *Diámetro del medio molturante:*

$$DBO = \frac{\sqrt{F80}}{K} * \frac{\sqrt{Sg * w}}{\%Cs * \sqrt{D}} \text{ [pulg]}$$

Donde:

Dbo. - Diámetro de bolas, en pulgadas

F80. – Abertura por donde pasa el 80% de la alimentación, en micras.

k.- Constante: 350 para molienda húmeda; 335 para molienda seca.

Sg. – Gravedad específica.

wi. – Índice de trabajo.

%Cs. – Porcentaje de velocidad crítica.

D.- Diámetro interior del molino, en pies.

2. *Se determinará la aproximación*

$$DBO = 28 * \sqrt[3]{dmax}$$

3. *Se determinará en toneladas de bolas de acero*

$$CB = 0.2044 * Sg * V \text{ real}$$

**5.8.3.2. Granulometría:** Para realizar el análisis de granulometría, se utilizó los métodos de Rosim y Schumann, considerando cual se ajusta más al modelo. El muestreo se realizó a la salida del molino P80, para determinar la granulometría actual, y en otra muestra se trituro y se utilizó un molino a escala proporcionado por la UNL para conocer la granulometría deseada; el procedimiento en ambos casos según las normas ASTM E11-20 es el siguiente:

1. El material del molino P80 o el triturado secó en el horno a una temperatura de 105 °C, hasta que alcanzó un peso constante.



**Figura 20.** Muestra seca.

2. Se homogeneizó la muestra y se cuarteo.



**Figura 21.** Muestra homogeneizada y cuarteada.

3. Se pesó la fracción extraída



**Figura 22.** Muestra pesada.

4. Se colocó la muestra en los tamices de serie y se procedió a agitar durante 10 minutos de manera manual.



**Figura 23.** Muestra en los tamices.

5. Los materiales retenidos se quedaron en la bandeja correspondiente y mientras que los pasantes se transfirieron a la siguiente malla hasta llegar a la malla #200



**Figura 24.** Muestra clasificada a malla #200.

6. Se pesó cada fracción retenida en los tamices y se registró los resultados
7. Se elaboró la curva granulométrica y se interpretó identificando el tamaño de partícula.



**Figura 25.** Muestra pasada en malla #200.

**Circuito de molienda:** Mediante el software MimProsim, se elaboró un circuito de molienda que permita optimizar el proceso, considerando todos parámetros anteriormente descritos.

## 6. Resultados

### 6.1. Análisis del proceso actual en la planta de beneficio “MAFRE código 390379”

La planta de beneficio MAFRE, presta sus instalaciones a diferentes minas del sector cuenta con una capacidad instalada de 100 ton/día, en la que se recupera como mineral principal oro.

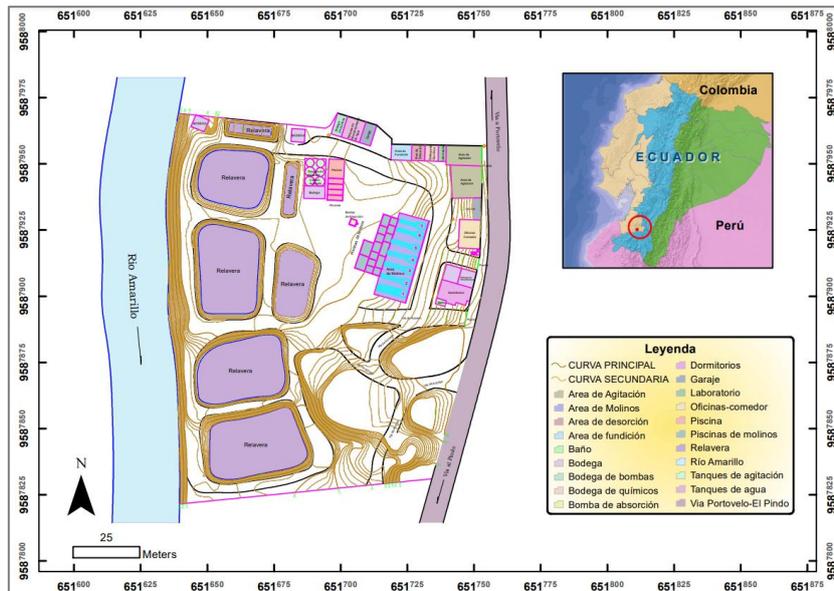


Figura 26. Planta de beneficio MAFRE - Titular Minero, (2024).

Actualmente, el material analizar es del sector San José, cantón Portovelo, el cual presenta una ley de 16.50 g/ton (Ver Anexo 3) como se muestra en la Tabla 6. Este material fue analizado el 17 de septiembre de 2024 y codificada con 121564, lo que permitió obtener datos actualizados y relevantes para la toma de decisiones en el proceso minero; la ley de este material fue un factor clave para determinar su viabilidad en cuanto a la extracción y el procesamiento del mineral.

Tabla 6.

Ley de stock de mineral

Identificación de la muestra	Comp. Nº	Cod. Alb.	Au g/t
Muestra de cuarzo	1	121564	16.50

Nota. Composición (comp); código de la muestra (cod): Oro en gramo/ tonelada (Au g/tn).

Las etapas de procesamiento se mencionan a continuación:

### 6.1.1. Trituración

La trituración del mineral (Ver Figura 27) comienza desde la voladura en mina con tamaños que varían desde los 2 cm hasta los 20 cm, los fragmentos más grandes son triturados manualmente.



**Figura 27.** Trituración.

### 6.1.2. Molienda

La molienda (Ver Figura 28) se realiza a través de molinos chilenos los cuales disponen de dos ruedas de láminas de acero que con el movimiento de las ruedas sobre la pista se muele el mineral presente en el molino. Los molinos presentes en la planta son de dos ruedas (5 molinos), tres ruedas (1 molino) y cuatro ruedas (5 molinos) con capacidades de 10 ton/día, 12 ton/día y 14 ton/día, capacidad total de 100 ton/día.



**Figura 28.** Molienda.

- **Energía de Bond**

$$EB = 10 * wi \left( \frac{1}{\sqrt{P80}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{F80}} \right)$$

Donde

Wi= Índice de trabajo

P80= Tamaño del producto en un 80% = 75 um

F80= Tamaño de alimentación en un 80% = 19 050 um

- Molino 1 (2 ruedas)

$$EB = 10 * 29.79 \left( \frac{1}{\sqrt{105}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{19\ 050}} \right) = 26.91 \text{ kwh/ton}$$

- Molino 2 (3 ruedas)

$$EB = 10 * 30.78 \left( \frac{1}{\sqrt{105}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{19\ 050}} \right) = 27.081 \text{ kwh/ton}$$

- Molino 3 (4 ruedas)

$$EB = 10 * 40.11 \left( \frac{1}{\sqrt{105}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{19\ 050}} \right) = 36.23 \text{ kwh/ton}$$

Se determinó un work index para cada molino:

$$wi = \frac{E}{10 * \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}}}$$

- Molino 1 (2 ruedas)

$$wi = \frac{28.86}{10 * \frac{1}{\sqrt{105}} - \frac{1}{\sqrt{19\ 050}}} = 29.79$$

- Molino 2 (3ruedas)

$$wi = \frac{29.82}{10 * \frac{1}{\sqrt{105}} - \frac{1}{\sqrt{19\ 050}}} = 30.78$$

- Molino 3 (4 ruedas)

$$wi = \frac{38.35}{10 * \frac{1}{\sqrt{105}} - \frac{1}{\sqrt{19\ 050}}} = 40.11$$

Donde:

E = Energía específica

$$E = \frac{E \text{ total}}{W \text{ del material}}$$

- Molino 1 (2 ruedas)

$$E = \frac{268.56}{10} = 28.86 \text{ Kwh/ton}$$

- Molino 2 (3 ruedas)

$$E = \frac{357.84}{12} = 29.82 \text{ Kwh/ton}$$

- Molino 3 (4 ruedas)

$$E = \frac{536.88}{14} = 38.35 \text{ Kwh/ton}$$

Donde

E total es igual

$$\text{Energía} = \text{Potencia} * \text{tiempo}$$

- Molino 1 (2 ruedas)

$$\text{Energía} = 11.19 * 24 = 268.56 \text{ KW/H}$$

- Molino 2 (3 ruedas)

$$\text{Energía} = 14.91 * 24 = 357.84 \text{ KW/H}$$

- Molino 3 (4 ruedas)

$$\text{Energía} = 22.37 * 24 = 536.88 \text{ KW/H}$$

Al analizar el consumo energético de los molinos se puede deducir que el molino uno tiene requiere menos cantidad de energía en comparación a los molinos dos y tres sin embargo los molinos dos y tres tienen mayor capacidad por lo que procesan mayor mineral.

Por otro lado, en la prueba de molienda realizada de igual manera el 17 de septiembre del presente año, código 121565 dio como resultado una ley de 5.17, g/ton (ver Tabla 7), al compararla con la ley de stock da una recuperación de 68.67%, deduciendo que existe mayor cantidad de oro grueso y por ende el 31.33% es recuperado por cianuración; la información se detalla en el Anexo 3.

**Tabla 7.**

*Ley de salida del molino de prueba*

Identificación de la muestra	Comp. N°	Cod. Alb.	Au g/t
Muestra Salida de Molino.	1	121565	5.17

Nota. Composición (comp); código de la muestra (cód): Oro en gramo/ tonelada (Au g/tn).

### 6.1.3. Recuperación gravimétrica

En la Figura 29, se realiza la recuperación gravimétrica, consiste en atrapar el oro grueso, para ello se utiliza canalones “bayetas”, que aprovechan las partículas de distintos tamaños, formas y gravedad específica, para separarse; es decir, este método de separación aprovecha las diferencias en el tamaño, forma y densidad de las partículas presentes en el material. Las partículas más pesadas, como el oro, se quedan atrapadas en las bayetas a medida que se desplazan con el flujo de agua, mientras que las partículas más ligeras son arrastradas corrientes abajo. Esta técnica de recuperación es ampliamente utilizada debido a su sencillez, bajo costo y efectividad para capturar partículas de oro de mayor tamaño, lo que permite una optimización en la extracción del mineral valioso.



**Figura 29.** Recuperación gravimétrica.

### 6.1.4. Cianuración

Como se muestra en la Figura 30 el proceso de lixiviación del oro consiste en extraer el oro de la mena mediante su disolución con agentes lixiviantes como el ácido sulfúrico o el cianuro de sodio. El oro disuelto se atrapa utilizando carbón activado dentro de los tanques de lixiviación, donde se agita continuamente para facilitar la mezcla y garantizar el contacto adecuado entre las partículas de mineral, el agente lixiviante y el carbón.

El carbón activado actúa como un adsorbente eficiente, reteniendo las partículas de oro disueltas en la solución; los tanques de lixiviación están diseñados para permitir la incorporación controlada del agente lixiviante y del carbón, lo que asegura una extracción óptima del metal precioso. Este método es utilizado debido a su capacidad para maximizar la recuperación del oro, especialmente en operaciones a gran escala, minimizando las pérdidas y mejorando la eficiencia del proceso de separación (Ver Figura 30).



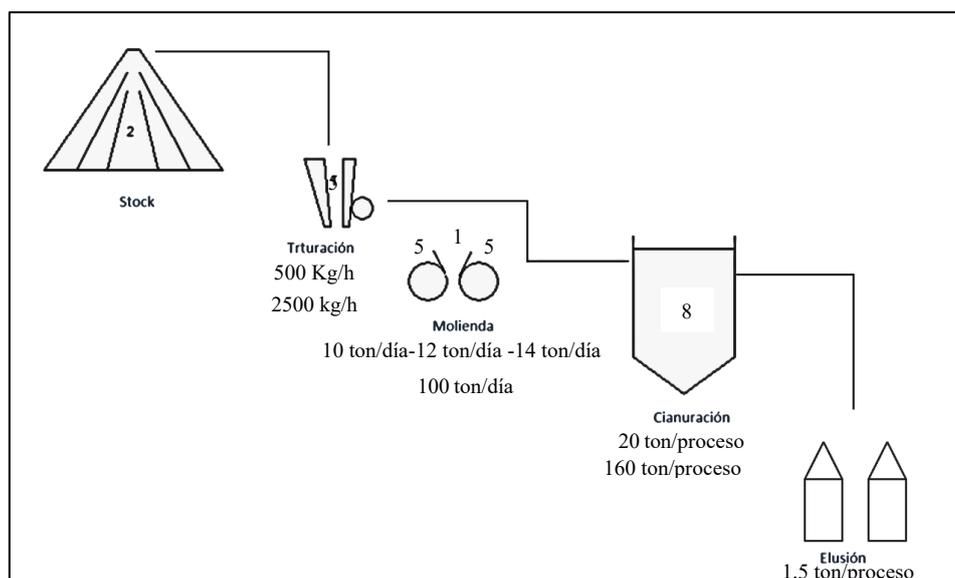
**Figura 30.** Cianuración.

### 6.1.5. Elusión

Es el proceso de recuperar el oro que se encuentra en el carbón activado, desorbiendo el oro con una solución de cianuro + soda cáustica + alcohol; en soluciones calientes, la misma que es inyectada por una bomba a la base del reactor que contiene el carbón activado cargado de oro, la solución pasa a presión por toda la columna de carbón y va llevando oro disuelto hasta la celda electrolítica colocada en circuito cerrado entre el caldero, bomba, reactor y celda.

El proceso de elusión demora en relación con la recuperación del oro atrapado por el carbón activado, llegando a 48 horas, e incluso 72 horas. Para conocer cuando se termina la elusión se realizan los análisis de oro en el laboratorio, oro contenido en la solución.

A manera de resumen en la Figura 31, esquematiza el proceso:



**Figura 31.** Esquema del proceso actual de la planta de beneficio MAFRE.

La Figura 31 representa el esquema del proceso que se lleva a cabo en la planta de beneficio "MAFRE", detallando las etapas de tratamiento del material. El procedimiento inicia con el stock de material, que se dirige a la trituración, etapa que cuenta con una capacidad de 500 kg/ h por cada una de las trituradoras con un total 5 máquinas que abarcan 2500kg/ h. Luego, el material triturado es trasladado a la molienda, donde la capacidad de procesamiento es de 10 ton/día (en 5 molino de 2 ruedas), 12 ton/día (1 molino de 3 ruedas) y 14 ton/día (5 molinos de 4 ruedas), permitiendo reducir aún más el tamaño de las partículas para liberar el oro. Posteriormente, el material pasa a la etapa de cianuración, que se desarrolla en 8 tanques con una capacidad de 20 ton/proceso con un total 160 ton/proceso, donde se disuelve el oro mediante el uso de soluciones químicas. Finalmente, el proceso concluye con la elusión con una capacidad de 1,5 ton/proceso.

#### 6.1.6. *Relaves*

Al analizar las leyes de los relaves, se encontró una ley de 1.13 g/ton la cual se codificó como 121567 (ver Tabla 8), evidencia una significativa pérdida de ley en el proceso de extracción. Esta disminución en la ley subraya la necesidad urgente de mejorar el proceso de recuperación, el cual actualmente presenta una eficiencia de solo un 20%, lo que implica que una gran parte del oro potencialmente recuperable se pierde en el relave. Los detalles se muestran en la prueba de laboratorio del Anexo 3.

**Tabla 8.**  
*Ley de oro del relave.*

Identificación de la muestra	Comp. N°	Cod. Alb.	Au g/t
Muestra del relave	1	121567	1.13

Nota. Composición (comp); código de la muestra (cód): Oro en gramo/ tonelada (Au g/tn).

## 6.2. Caracterizar las propiedades físico-mecánicas y mineralógicas

### 6.2.1. *Geología*

- **Geología Regional**

El área de estudio "MAFRE" se encuentra ubicada dentro del Distrito Minero Zaruma-Portovelo que se formó como resultado de procesos hidrotermales ocurridos hace miles de millones de años, siendo las estructuras geológicas principales las que propiciaron la presencia de depósitos de oro. A nivel regional, esta área se encuentra en

el sur de Ecuador, en una zona de transición entre los Andes septentrionales y los Andes centrales (Ordóñez, 2016).

La zona de Portovelo-Zaruma presenta dos series volcánicas, posiblemente del Mioceno, que representan el resultado de una evolución magmática generada probablemente en un mismo centro eruptivo. La mayor parte de su litología está compuesta por andesitas con cuarzo de la formación Célica del Cretácico, separadas de las rocas metamórficas de composición riolítica de la serie Tahuín por la falla regional Piñas-Portovelo (Lunar y Oyarzun, 1991).

La planta de beneficio de minerales MAFRE yace sobre aluviales del periodo Cuaternario, que se han formado hace aproximadamente 2.6 millones de años hasta el presente. Estos depósitos se encuentran en valles, llanuras de inundación, terrazas fluviales y deltas, y están compuestos por materiales que han sido transportados y depositados por ríos, arroyos y otras corrientes de agua. Estos depósitos se asientan sobre la Unidad la Bocana. Esta unidad incluye principalmente rocas volcánicas andesíticas, basaltos y tobas, además de rocas sedimentarias como areniscas, lutitas y conglomerados que han experimentado grados variables de metamorfismo lo que se refleja en la superficie. Estos procesos de transformación le otorgan una estructura compleja que evidencia la actividad tectónica de la zona (IGME, 2014).

La Bocana es conocida por sus depósitos de minerales metálicos, especialmente oro y cobre. Esta mineralización ha sido el resultado de procesos hidrotermales relacionados con la actividad volcánica y tectónica de la región, haciendo de esta unidad geológica un área de interés para la minería, particularmente en la zona de Zaruma-Portovelo, una de las áreas mineras más antiguas de Ecuador. Referente a la estructura la unidad se encuentra atravesada por fallas y pliegues asociados con la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Estos elementos estructurales contribuyen a la compleja geología de la región y a la formación de vetas mineralizadas que son explotadas en actividades mineras (López, 1999).

Por otro lado, la actividad tectónica en esta región está influenciada por el cinturón de deformación de los Andes y la zona de subducción cercana; esto no solo genera un relieve accidentado y variado, sino que también hace de la región una zona con alto potencial sísmico y volcánico.

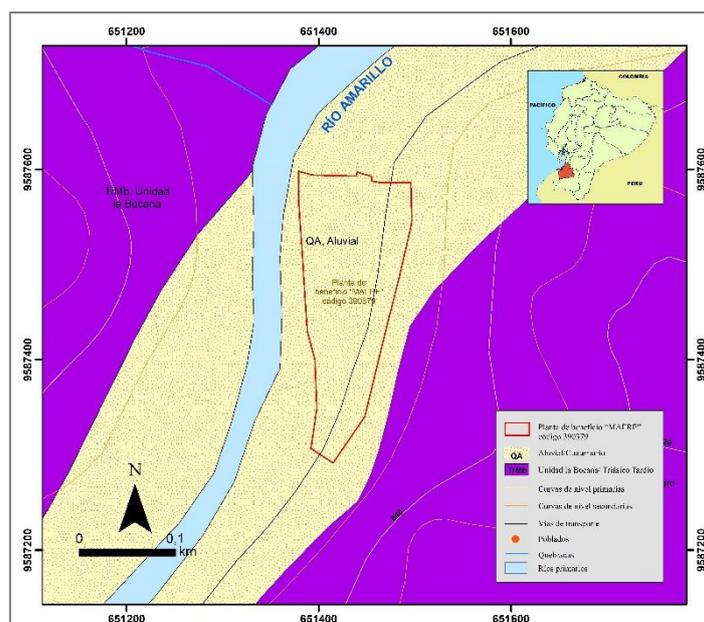


Figura 32. Geología regional del área de estudio. IGME, 2014.

- **Geología Local**

La geología local donde se emplaza la Planta de Beneficio MAFRE, corresponden a un depósito aluvial y material de origen antrópico, asociados a la apertura de la vía principal y a vías secundarias de acceso privado. A continuación, se muestra la ubicación de las coordenadas Datum: UTM/WGS84/17S.

**Tabla 9.**  
*Ubicación de afloramientos*

Nro. de Afloramiento	Coordenadas Datum: UTM/WGS84/17S		Tipo de Afloramiento	Tipo de Material
	x	y		
AF1	651641	9587733	Antrópico	Matriz arcillo- limosa con arenisca
AF2	651426	9587471	Antrópico	Matriz arcillo-arenosa
AF3	651394	9587293	Antrópico	Andesita
AF4	651333	9587208	Antrópico	Andesita

*Nota.* La tabla muestra la ubicación en Coordenadas Datum: UTM/WGS84/17S de cada uno de los afloramientos.

- **Afloramiento AF1**

Dimensiones: 5,85 metros de altura y 10,75 metros de ancho.

Descripción: La litología correspondiente a un saprolito presenta una matriz de arcilla, arenisca y limos. Este material se origina en el lugar por la meteorización de la roca madre, manteniendo su estructura original, aunque con una transformación mineralógica y textural considerable, donde la mezcla de arcilla, arenisca y limos genera una textura

heterogénea. En la parte superior del afloramiento, se identificó una capa densa de vegetación.



**Figura 33.** Afloramiento 1 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.

- ***Afloramiento AF2***

Dimensiones: 4, 80 metros de altura y 8,85 metros de ancho.

Descripción: La litología observada corresponde a un saprolito con una matriz de arcilla predominantemente arenosa, producto de la meteorización de la roca madre, resultando en una mezcla de arcilla y arena. La matriz de arcilla arenosa ofrece un balance entre cohesión, capacidad de retención de agua y permeabilidad, lo que favorece a la cohesión y la retención de nutrientes, lo que contribuye a la estabilidad del material.



**Figura 34.** Afloramiento 2 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.

- ***Afloramiento AF3***

Dimensiones: 9,20 metros de altura y 5,30 metros de ancho.

Descripción: Se pudo determinar un afloramiento conformado por roca andesita, de origen volcánico, que ha experimentado un proceso de alteración que ha modificado su composición mineral y textura original. Esta alteración, probablemente ocasionada por condiciones ambientales particulares, ha dado lugar a la formación de óxidos de hierro,

lo cual se refleja en tonalidades rojizas o amarillentas en la roca. En esta zona los óxidos son indicativos de procesos de oxidación, que probablemente resultan de la exposición prolongada a la intemperie y la interacción con el agua y el oxígeno del aire; además, en la parte superior del afloramiento se encuentra una densa capa de vegetación herbácea.



**Figura 35.** Afloramiento 3 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.

- ***Afloramiento AF4***

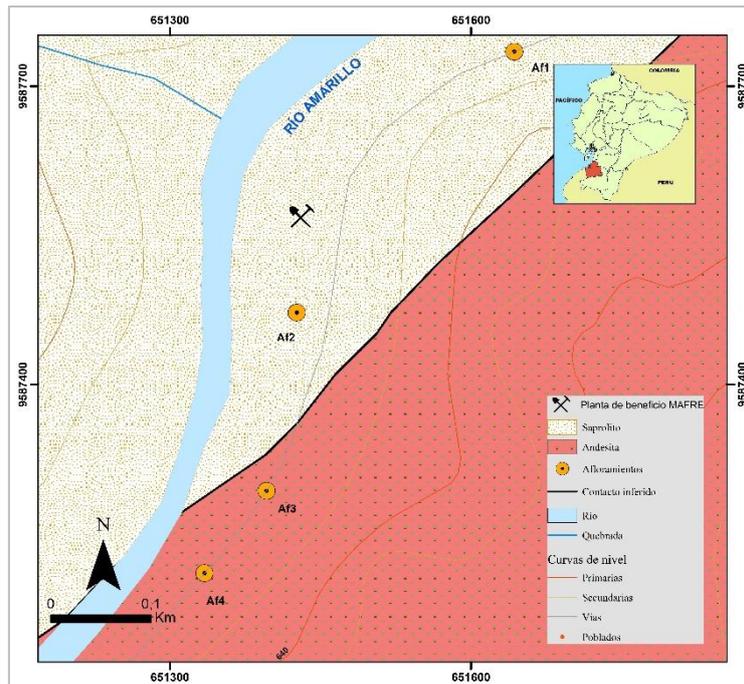
Dimensiones: 12,10 metros de altura y 7,20 metros de ancho.

Descripción: En otro tramo de la vía cercana al área de intereses se pudo determinar roca andesita; esta es de tipo ígnea de grano fino, compuesta principalmente por minerales como plagioclasa, hornblenda y biotita. La tonalidad rojiza observada en la roca es consecuencia de la alteración mineralógica provocada por procesos de meteorización, como la oxidación de minerales de hierro, lo que indica un ambiente con condiciones de oxidación.



**Figura 36.** Afloramiento 4 de la vía, cercana a la planta de beneficio “MAFRE”.

La información obtenida en la geología local se representa en la Figura 37 donde se incorpora los afloramientos y la litología presente en el área de estudio.



**Figura 37.** Geología Local.

### 6.2.2. *Análisis petrográfico del material de stock*

Para el análisis petrográfico del material que procesa la planta de benéfico, se tomaron dos muestras de la zona de stock, para su posterior análisis, el cual se muestra en el Anexo 2. En base a los resultados obtenidos se determinó lo siguiente:

La primera muestra recolectada corresponde a el sector de San José, es una roca volcánica extrusiva de tipo brecha andesítica (veta), con un tamaño de 13 cm de largo y 8 cm de ancho, y una forma irregular. La brecha andesítica es de color gris claro, con una textura afanítica que sugiere un enfriamiento rápido del magma en su formación. Este tipo de brecha es característico de ambientes volcánicos y podría indicar procesos geológicos intensos como la fragmentación de la roca madre debido a actividad volcánica o intrusiva. La veta contiene mineralización de pirita, lo que le da un color amarillento y brillo metálico, una característica visual típica de este sulfuro de hierro ( $FeS_2$ ).

La segunda muestra (caja) también proviene del sector San José y tiene un tamaño más pequeño de 8 cm de largo por 5 cm de ancho, con una forma irregular. Esta muestra está compuesta por una brecha andesítica volcánica de color gris claro con textura piroclástica afanítica, que se caracteriza por la presencia de clastos angulares y subangulares de 0.5 a 1.5 cm. La textura piroclástica es indicativa de una formación a partir de fragmentos volcánicos expulsados durante una erupción, lo que explica los clastos angulares que se observan en la muestra. En ella, se encuentran vetillas de

carbonatos sin una mineralización tan predominante como en la primera muestra, pero sí con una composición diversa de minerales (Ver Anexo 2).

### 6.2.3. *Propiedades físicas*

#### 6.2.3.1. **Densidad**

Las muestras analizadas corresponden a los materiales N°1 - Caja y N°2 - Veta, cuyas propiedades físicas fueron evaluadas mediante mediciones de peso en diferentes condiciones y densidades. El Peso aire de la muestra N°1 fue de 606.61 g, mientras que la muestra N°2 tuvo un peso de 599.39 g. El Peso sumergido en agua fue de 366.62 g para la muestra N°1 y 371.24 g para la muestra N°2, lo que permitió calcular las densidades: la Densidad Masiva fue de 2.48 g/cm<sup>3</sup> para la muestra N°1 y 2.61 g/cm<sup>3</sup> para la N°2, mientras que la Densidad del Sólido Seco Saturado (D.S.S.S.) resultó ser 2.53 g/cm<sup>3</sup> para la muestra N°1 y 2.63 g/cm<sup>3</sup> para la muestra N°2.

La Densidad Aparente de las muestras fue de 2.61 g/cm<sup>3</sup> para la muestra N°1 y 2.65 g/cm<sup>3</sup> para la N°2. Finalmente, la Absorción de agua fue del 1.96% para la muestra N°1 y del 0.55% para la muestra N°2, lo que indica que la muestra N°1 tiene una mayor capacidad de absorción de agua que la muestra N°2. Estos datos son fundamentales para comprender las características físicas de los materiales, lo que influye en su comportamiento en los procesos de minería o geotecnia, en la Tabla 10 se resumen estos aspectos.

**Tabla 10.**  
*Densidad*

<b>Muestra</b>	<b>Peso aire</b>	<b>Peso sumergido</b>	<b>Peso seco</b>	<b>D. Masiva</b>	<b>D.S.S.S.</b>	<b>D. Aparente</b>	<b>Absorción</b>
Código	G	G	G	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%
N°1 - Caja	606.61	366.62	594.92	2.48	2.53	2.61	1.96%
N°2 - Veta	599.39	371.24	596.13	2.61	2.63	2.65	0.55%

Nota. Densidad (D); Densidad del Sólido Seco Saturado (D.S.S.S.).

La muestra obtenida de la veta es un material más denso, menos poroso y con menor absorción de agua, lo que la hace más resistente, mientras que, la caja es más porosa y menos densa lo que la hace perder resistencia.

### 6.2.3.2. Resistencia a la compresión simple

Las muestras N°1 - Caja y N°2 - Veta fueron analizadas en cuanto a sus dimensiones y comportamiento bajo carga. La muestra N°1 tiene un largo de 5.11 cm, un ancho de 5.04 cm y una altura de 5.14 cm, lo que da un área de 25.75 cm<sup>2</sup> y un volumen de 132.38 cm<sup>3</sup>. Bajo la carga aplicada, la muestra N°1 soportó un esfuerzo de 214.20 Kg/cm<sup>2</sup> con una carga total de 5,516.66 kg. Por otro lado, la muestra N°2 presenta un largo de 5.11 cm, ancho de 4.85 cm y altura de 5.13 cm, con un área de 24.78 cm<sup>2</sup> y un volumen de 127.14 cm<sup>3</sup>; esta muestra soportó una carga de 22,036.06 kg, lo que resulta en un esfuerzo considerablemente mayor de 889.14 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos datos muestran que la muestra N°2, aunque tiene un volumen ligeramente menor, soportó una carga significativamente más alta, lo que podría indicar que es más resistente o tiene una mayor capacidad de carga en comparación con la muestra N°1 (Anexo 4).

**Tabla 11.**  
*Resistencia a la compresión simple*

<b>Muestra</b>	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Altura</b>	<b>Área</b>	<b>Volumen</b>	<b>Carga</b>	<b>Esfuerzo</b>
Código	Cm	cm	Cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>
N°1 – Caja	5.11	5.04	5.14	25.75	132.38	5,516.66	214.20
N°2 – Veta	5.11	4.85	5.13	24.78	127.14	22,036.06	889.14

Nota. La tabla muestra los resultados de la compresión simple obtenida en laboratorio.

Por ello, la muestra obtenida de la veta tiene mayor resistencia a la compresión simple, soportando cargas significativamente más grandes y resistiendo mayores esfuerzos, lo que indica que es un material más fuerte o con mejores propiedades que la muestra de caja (Ver Anexo 4).

### 6.2.4. Propiedades mineralógicas

El análisis mineralógico detalla que la muestra está compuesta principalmente por SiO<sub>2</sub> (42,91%) y Ca (14,48%), ambos con baja variabilidad, lo que indica que su composición es estable y homogénea. El Aluminio (1,303%) también es un componente presente en mayor cantidad a diferencia del resto; sin embargo, algunos elementos como el fósforo y el titanio muestran una alta variabilidad, lo que indica que su concentración no es uniforme en la muestra, lo que puede afectar la calidad y procesamiento del material. Por otra parte, se destacan algunos oligoelementos, como el cobre, el zinc, el arsénico, el cadmio y el plomo, cuyo impacto sobre el medio ambiente se debe tener en cuenta, así

como el bario y el estroncio, cuya concentración relativamente elevada puede resultar de interés económico (Ver Anexo 5).

En ese contexto puede deducir la presencia de sulfuros como el hierro y cobre denominados calcopirita y pirita, adicionalmente se tiene la presencia de esfalerita, galena, y cuarzo., concluyendo que se trata de un yacimiento polimetálico.

En la Tabla 12 se detallan cada uno de los componentes:

**Tabla 12.**  
*Propiedades mineralógicas*

<b>EL</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-3<math>\sigma</math></b>
Al	1.303%	0.073
SiO <sub>2</sub>	42.91%	0.43
P	103	95
S	3460	110
K	7990	140
Ca	14.48%	0.14
Ti	560	400
Cr	209	73
Mn	2020	120
Fe	7140	190
Cu	82	15
Zn	39	10
As	57	7
Rb	37	4
Sr	232	7
Zr	16	5
Mo	7	6
Ag	6	6
Cd	27	21
In	10	8
Sb	51	40
Ba	916	61
Pb	20	5
Th	13	12

Nota. Elemento (EL); Partes por millón (PPM); desviación estándar ( $\sigma$ ).

### 6.3. Optimización del proceso de molienda

La optimización del proceso de molienda es fundamental para maximizar la recuperación de mineral valioso. Para ello, se analizaron y ajustaron diversas variables del molino, que permiten alcanzar una granulometría específica del material. Esto facilita el proceso de extracción posterior, mejorando la eficiencia y reduciendo el consumo de reactivos y energía.

### 6.3.1. Variables del molino

Las variables del molino, corresponden a diámetro del molino, velocidad, capacidad, lo que va a estar relacionado directamente con el volumen de molienda, el grado de llenado y el medio molturante. Para ello se utilizó el molino (Ver Figura 38) de la Universidad Nacional de Loja, para realizar una prueba de molienda.



**Figura 38.** Molino de pruebas UNL.

- Volumen de Molienda

$$Vm = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$
$$Vm = \frac{\pi * 0,32^2 * 0,52}{4} = 0,041m^3$$

- Dmolino= 0,32m

- L=0,52m

Al calcularlo, se obtuvo un volumen de molienda de 0.041 m<sup>3</sup>, que establece la capacidad máxima de material que puede ser procesado en una carga.

- Grado de llenado

Φ= 30cm de base del molino a la boca

$$J = 113-126 * \frac{Dk}{D} \%$$
$$J = 113-126 * \frac{0,20}{0,30cm} = 26\%$$

Dk= Molienda desde las bolas de acero hasta la boca del molino

Este cálculo da como resultado un grado de llenado del 26%, ideal para un buen contacto entre el medio de molienda y las partículas de mineral, optimizando la eficiencia de reducción de tamaño.

- Tiempo de Molienda

$$T_m = \frac{\text{Tonelaje}}{\text{Densidad}}$$

$$T_m = \frac{2280,4 \text{ Kg}}{2580 \text{ Kg/m}^3} = 0,88$$

0,88 ~ 53min y 1,5seg

- Medio Molturante



**Figura 39.** Medio Molturante

$$DB0 = \frac{\sqrt{F80}}{K} * \frac{\sqrt{Sg * Wi}}{\%Cs\sqrt{D}} [cm]$$

$$DB0 = \frac{\sqrt{19\ 050}}{350} * \frac{\sqrt{9.81 * 191.11}}{46\sqrt{0.22}} = 0.51 \approx 1.29$$

F80 = 19 050 micras

K = 350

Sg = 9.81 m/seg<sup>2</sup>

D = 22.94

%Cs =

$$\frac{1755}{73.12} = 24.00$$

Wi = Work index =

$$w_i = \frac{EB}{10 * \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}}}$$

$$w_i = \frac{219.30}{10 * \frac{1}{\sqrt{75}} - \frac{1}{\sqrt{19\ 050}}} = 191.11$$

- Energía de Bond

$$E = \frac{E \text{ total}}{W \text{ del material}}$$

$$E = \frac{0.5}{0.00228} = 219.30 \text{ KW/Ton}$$

E total es igual

$$\text{Energía} = \text{Potencia} * \text{tiempo}$$

$$\text{Energía} = 0.5 * 1 = 0.55 \text{ kw/h}$$

- Carga de bolas

$$CB = 0.2044 * 9.81 * 159.78 = 320.38 \text{ Kg}$$

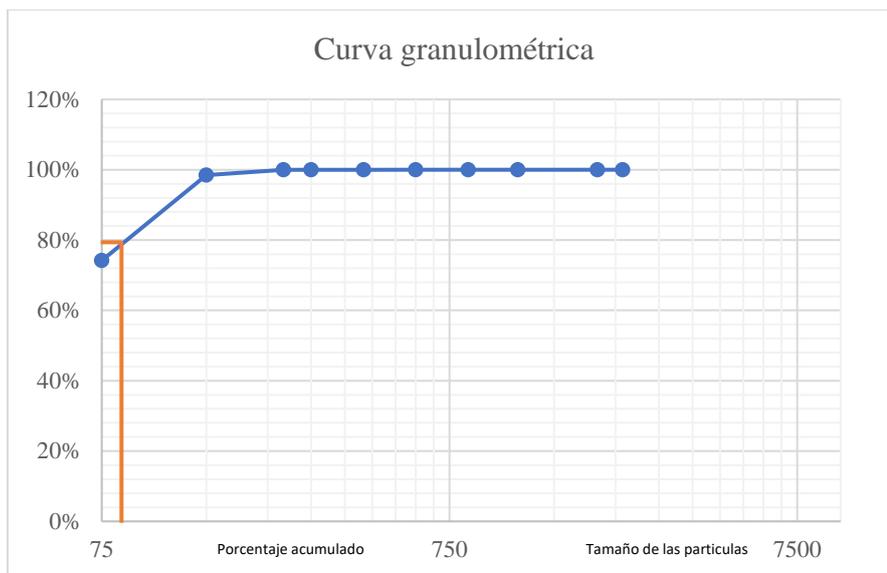
- Velocidad real

$$Vr = \frac{76.63}{\sqrt{D}}$$

$$Vr = \frac{76.63}{\sqrt{0.23}} = 159.78 \text{ rpm}$$

### 6.3.2. Granulometría

La curva granulométrica presentada muestra la distribución de tamaños de partículas en la muestra analizada, donde el eje horizontal (logarítmico) representa el tamaño de las partículas y el eje vertical el porcentaje acumulado que pasa por los tamices. La curva asciende rápidamente al inicio, indicando que más del 80% del material tiene un tamaño igual o menor al valor destacado por la línea naranja vertical, lo que sugiere un predominio de partículas finas. La parte plana de la curva hacia la derecha evidencia que no hay una cantidad significativa de partículas grandes, lo que refleja el tamaño adecuado necesario.



**Figura 40.** Curva granulométrica.

Por ello, medir la distribución del tamaño de las partículas después de la molienda permitió verificar que el 80% del mineral (D80) está a 75 micras, tamaño que facilita la extracción óptima de minerales.

### 6.3.3. Ensayo de recuperación

Como se identifica en la Tabla 13, la salida del molino de la fecha del 18 de octubre de 2024 en la muestra código 122813, se pudo determinar el contenido de oro y evaluar su posible extracción. La muestra, en buenas condiciones para el análisis, mostró un contenido de oro total de 13.12 gramos por tonelada (g/t), de los cuales 12.80 g/t pueden extraerse mediante cianuración.

De acuerdo al análisis realizado de laboratorio para oro cianurable, tomo 15 horas en los tanques de cianuración y requirió 4.126 kg de cal y 12.048 kg de cianuro por tonelada métrica, con un consumo de cianuro de 1.15 kg/Tm, dio como resultado una recuperación del 97,5 % (Ver Anexo 6).

**Tabla 13**

*Análisis de muestra salida de molino de bolas*

Identificación de la muestra	Comp. N°	Cod. Alb.	Au g/t	Au CN.-* g/t
Prueba Salida de Molino de Bolas	1	122813	13.12	12.80

Nota. Composición (comp); código de la muestra (cód): Oro en gramo/ tonelada (Au g/tn); Oro en cianuro (Au CN.-\*).

Los consumos de cal y cianuro son razonables para este tipo de proceso, lo que indica que el método es eficiente en términos de recursos. Por tanto, son favorables para una extracción rentable del oro contenido en la muestra.

#### **6.3.4. Circuito de molienda propuesto**

Luego de realizada la prueba de molienda, se determinó el siguiente circuito optimizado, diseñado para mejorar la eficiencia y maximizar la recuperación del oro.

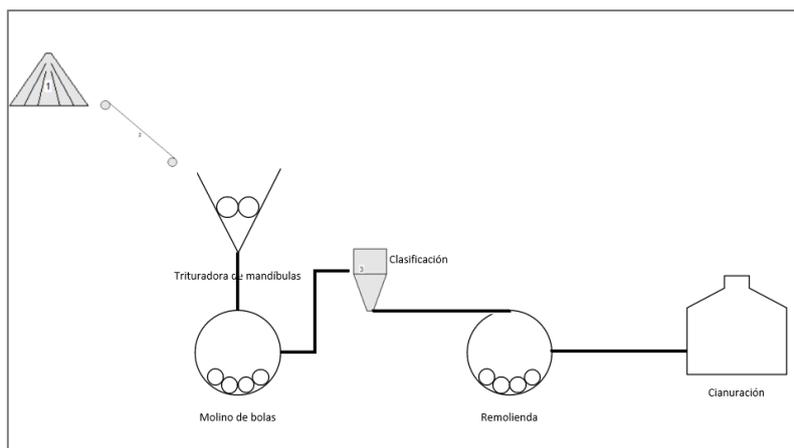
En la figura 41 se muestra el circuito que parte del área de stock donde se acumula el material, en la segunda fase se propone trituración, en la cual el mineral es reducido a un tamaño de  $\frac{3}{4}$  de pulgada en una trituradora de mandíbulas, permitiendo una preparación adecuada del material para las etapas subsecuentes. Tras la trituración, se incorpora un molino de bolas, que tiene la capacidad de alcanzar el grado de molienda deseado de manera eficiente y en menor tiempo, optimizando así el consumo de energía y recursos, para en secuencia clasificar el material.

Seguidamente, se propone la inclusión de un hidrociclón en el circuito, cuya función es clasificar las partículas que superan las 75 micras. Las partículas mayores a este tamaño serán enviadas a un proceso de remolienda en un segundo molino de bolas, lo que garantiza que todas las partículas sean procesadas de manera adecuada y que el tamaño óptimo para la cianuración se alcance en su totalidad.

Finalmente, una vez completado el proceso de molienda y remolienda, el material resultante estará listo para ser sometido a la etapa de cianuración, en la que se llevará a cabo la disolución del oro presente en el mineral. Este circuito optimizado no solo mejora la eficiencia de la molienda, sino que también asegura una recuperación más alta y una extracción más rentable del oro (Ver Figura 41).

Por tanto, el circuito se constituye en 6 fases que se resumen seguidamente:

- Área de stock
- Trituración  $\frac{3}{4}$  de pulgada en una trituradora de mandíbulas
- Molienda en molino de bolas
- Clasificación: Hidrociclón
- Remolienda
- Cianuración: disolución de oro.



**Figura 41.** Circuito de molienda propuesto.

### 6.3.5. Análisis económico

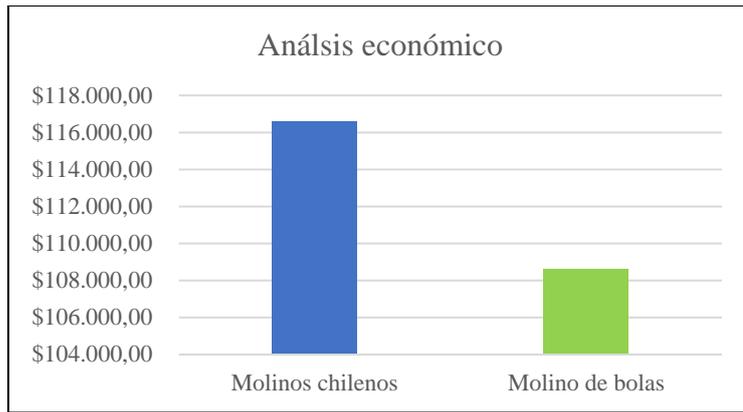
La representación económica de molinos chilenos con molinos de bolas es significativa, por una parte, el molino de bolas alcanza mallas más finas y por ende existe un mayor porcentaje de recuperación. Adicionalmente ofrece un consumo energético y costos altos sin embargo la recuperación es mayor como se puede observar en la Tabla 14.

**Tabla 14.**  
*Análisis económico*

Equipo	Energía Kw	Costo de Energía	Costo del equipo	Ley gr/ton	% Recuperación	Recuperación	Recuperación final
Molinos de bolas	3500	\$ 339.50	\$100,000.00	16.5	97.56	\$ 1,457.45	\$116,595.60
Molino chileno	132	\$ 12.80	\$ 80,000.00	15.37	93.19	\$ 1,357.63	\$108,610.57

Al analizar las dos opciones entre el molino de bolas y molinos chilenos, este primero, se destaca como la opción más rentable debido a su eficiencia y al porcentaje de recuperación, ya que este molino alcanza granulometrías más finas por ende es posible recuperar mayor cantidad de oro fino. Sin embargo, su alto consumo energético y su costo de compra son variantes negativas para su adquisición.

La Figura 42 ilustra los resultados expuestos.



**Figura 42.** Análisis económico

## 7. Discusión

La planta de beneficio “MAFRE” brinda sus instalaciones a diversas minas de la región y posee una capacidad operativa de 100 toneladas por día, con el oro como mineral principal recuperado. Desde este contexto, el presente estudio describe un proceso de tratamiento del mineral que inicia con la trituración en molinos chilenos y continúa con la recuperación a través de tres etapas secuenciales: gravimetría, cianuración y elusión. En contraste, el estudio de Armijos (2024) denominado “Optimización del proceso de trituración-molienda, mediante la reducción de la malla granulométrica en la planta de beneficio “Playita” presenta un enfoque más mecanizado, comenzando en la zona de stock, seguido de clasificación en una tolva de recepción, trituración con trituradoras de mandíbulas y cónicas, molienda en molino de bolas y recuperación del oro mediante hidrociclones y flotación, destacando una mayor precisión en la granulometría y un circuito de trituración cerrado.

Referente a las propiedades físico – mecánicas y mineralógicas del mineral en el área de estudio “MAFRE” se han formado depósitos resultado de procesos hidrotermales ocurridos hace miles de millones de años, siendo las estructuras geológicas principalmente las que propiciaron la presencia de depósitos de oro. La planta de beneficio yace sobre aluviales del periodo Cuaternario, que se han formado hace aproximadamente 2.6 millones de años hasta el presente. Mediante la recolección de muestras se pudo determinar la presencia de rocas volcánicas extrusiva de tipo brecha andesítica, con forma irregular y textura afanítica.

Para optimizar el proceso de molienda, se logró modificar y calcular los parámetros, donde se obtuvo un volumen de molienda de 0.041 m<sup>3</sup>, que establece la capacidad máxima de material que puede ser procesado en una carga, dando así un grado de llenado del 26%, ideal para un buen contacto entre el medio de molienda y las partículas de mineral, optimizando la eficiencia de reducción de tamaño, en un tiempo de 53min y 1,5seg, el diámetro de bolas, adecuado fue de 1,29 pulgadas, el work index de 191.1, la energía de Bond 219.30 KW/Ton y Energía 0.55 kw/h. Al corroborar los resultados con otros estudios como el de Calderón (2023) en su investigación titulada “Optimización del proceso de molienda-flotación de minerales, mediante el análisis metalúrgico del elemento plata en la planta de Beneficio Ecoluxen S.A., sector Balsones, Portovelo, El Oro”, se pudo evidenciar resultados variables debido a que las condiciones experimentales y los parámetros utilizados en ambas investigaciones no son equivalentes.

La autora estableció que el tiempo óptimo de molienda es de 15 minutos. Este tiempo permitió alcanzar un porcentaje pasante del 65% en malla #200 y una recuperación del 72.09% de plata mediante un ensayo de flotación.

Asimismo, la carga de bolas óptima necesaria es de 320,38 kg y la velocidad de 159,78 rpm, debido a que se pudo verificar que el 80% del mineral (D80) está a 75 micras, siendo el tamaño óptimo que facilita la extracción de minerales con un grado de llenado de 26%. Lo que coincide con Hernández et al. (2016) sobre la optimización de la molienda en procesos de tratamiento de oro, quien concluyó que un grado de llenado de entre 25% y 30% es ideal para evitar la sobrecarga de los molinos y asegurar un contacto eficiente entre las bolas de molienda y el mineral. Al analizar la muestra en la optimización, se obtuvo un contenido de oro total de 13.12 gramos por tonelada (g/t), de los cuales 12.80 g/t pueden extraerse mediante cianuración.

Finalmente, el análisis económico comparativo entre los molinos chilenos y los molinos de bolas revela diferencias clave en términos de eficiencia y costos operativos. El molino de bolas, aunque tiene un costo inicial más alto (\$100,000), requiere un consumo energético significativamente mayor (3500 kW), lo que incrementa el costo de energía a \$339.50. Sin embargo, su capacidad para alcanzar mallas más finas resulta en una mayor ley (16.5 g/ton) y una recuperación superior de \$1,457.45 por tonelada, lo que contribuye a una recuperación final más alta de \$116,595.60. Estos hallazgos se corroboran con Parra y Tapia (2022) quienes concluyeron que el molino de bolas es más eficaz en la molienda de minerales de oro, particularmente cuando se emplea una distribución óptima de bolas y una densidad de pulpa determinada. La investigación reveló que una distribución de 55% de bolas de 4 pulgadas, 32.5% de 3 pulgadas y 12.5% de 2 pulgadas, combinada con una densidad de pulpa de 1.7 kg/l, produce la menor velocidad de fractura, lo que se traduce en una molienda más eficiente y por lo tanto, en una recuperación de oro superior, lo que demuestra la eficacia del molino de bolas frente al molino chileno.

## 8. Conclusiones

- La planta de beneficio “MAFRE” ha demostrado ser regularmente eficiente en los procesos de trituración, molienda y recuperación de oro; la división del mineral en fragmentos de tamaño variable seguida de la trituración y molienda en molinos chilenos da como resultado un tratamiento que requiere de ajustes, es así que la diferencia significativa entre la ley del mineral (16.50 g/ton) y la ley de los relaves (1.13 g/ton) destaca la necesidad de optimizar el proceso de recuperación para reducir las pérdidas de oro y aumentar la eficiencia general del proceso.
- Se estableció, los parámetros de molienda, como el volumen de carga, el grado de llenado del molino (26%), el diámetro de las bolas (1.29 pulgadas) y la energía de Bond (219.30 KW/Ton), son fundamentales para asegurar una molienda eficiente, estos ajustes permiten optimizar el contacto entre las bolas y el mineral, lo que facilita la reducción de tamaño del mineral en un tiempo de 53 minutos y 1.5 segundos, alcanzando un tamaño óptimo (D80) de 75 micras, que es ideal para la extracción del oro en las etapas posteriores del proceso de cianuración.
- La optimización del proceso de molienda y la mejora en el manejo de los insumos de acuerdo el análisis enviado al laboratorio Albexus, el cianuro y la cal, han demostrado ser factores claves para la reducción de costos operativos y el aumento de la eficiencia, contribuyendo a una extracción rentable del oro, lo que demuestra que el proceso es eficiente en términos de recursos; además la mejora en el circuito de molienda y la implementación de un hidrociclón para clasificar y remoler las partículas mayores a 75 micras permitirá una recuperación aún más alta, minimizando las pérdidas y mejorando la rentabilidad a largo plazo.
- La comparación económica entre los molinos de bolas y los molinos chilenos muestra diferencias significativas en cuanto a eficiencia y costos operativos, donde el molino de bolas, aunque presenta un mayor costo inicial de \$100,000 y un consumo energético considerable de 3500 kW, alcanza una mayor granulometría en la molienda, lo que resulta en una mayor ley de oro (16.5 g/ton) y por lo tanto, una recuperación superior lo que demuestra una mayor recuperación del mineral.

## 9. Recomendaciones

- Se recomienda implementar el circuito de molienda propuesto en la planta de beneficio “MAFRE” para optimizar el proceso de extracción de oro, donde se incluye la fase de trituración que reduzca el tamaño del mineral a  $\frac{3}{4}$  de pulgada, seguida de un molino de bolas que permite alcanzar el grado de molienda adecuado en menos tiempo. Luego, un hidrociclón que clasifique las partículas mayores a 75 micras, que serán enviadas a un proceso de remolienda, asegurando que todo el material esté finamente molido para la cianuración.
- Es necesario monitorear y optimizar la cantidad de cianuro utilizado para reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental; por tanto, se puede implementar un sistema de recuperación y regeneración de cianuro como una opción rentable para reducir el consumo de este reactivo.
- Dependiendo de la variabilidad del mineral y la distribución del tamaño de partículas, se podría considerar agregar una segunda etapa de clasificación, utilizando ciclones de mayor precisión o clasificadores mecánicos, para asegurar que solo las partículas óptimas (menos de 75 micras) entren en la fase de cianuración.
- Realizar un análisis detallado a largo plazo de la ley del mineral, los costos operativos y las expectativas de producción para tomar la decisión más rentable y eficiente en función de las condiciones específicas de la planta y los recursos disponibles.

## 10. Bibliografía

- Agencia de regulación y control minera. (2019). *Proyecto de seguimiento, control y evaluación de labores mineras en el distrito Zaruma – Portovelo*. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/10/PEND-Proyecto-de-seguimiento-y-contro-ZARUMA-PORTOVELO.pdf>
- Alfaro, M. (2002). Introducción al Muestreo Minero. In *Instituto de Ingenieros de Minas de Chile*.
- Alván, A. (2018). *Geología de la cuenca sedimentaria peruana occidental del norte entre 7°30' a 9°30'S*.
- Añazco, J. (2017). *Paragénesis de las vetas del sector Minas Nuevas, O Nivel, ubicado en el distrito aurífero – polimetálico Portovelo – Zaruma* [Tesis de Grado]. Universidad Central del Ecuador.
- Armijos, P. (2024). *Optimización del proceso de trituración-molienda, mediante la reducción de la malla granulométrica en la planta de beneficio “Playitas”, Sector El Salado, Cantón Portovelo, Provincia de El Oro*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/31659>
- Banco Central del Ecuador. (2017). *Reporte de minería*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012017.pdf>
- Beltrán, S. (2012). *Cianuración de minerales auríferos y adsorción de oro y plata con carbón activado inmovilizado (IAC)*. Escuela Politecnica Nacional.
- Berit, C. (2021). *Clasificación Hidráulica*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/tema-7-clasificacionhidraulica/250726888>
- Blanco, E. (s.f.). Molienda. In *Universidad de Cantabria*. Retrieved July 22, 2024, from [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf)
- Bonifaz Bueno, M., Solano Ricardo, J. y Valverde, D. (2021). *Análisis estructural sismo-resistente de la edificación existente del GAD Provincial de El Oro y planteamiento de alternativas viables para una ampliación* [Tesis de Doctorado, ESPOL]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52232>

- Cadier, É., Gómez, G., Calvez, R. y Rossel, F. (1994). *Inundaciones y sequias en el Ecuador*.
- Cajamarca, D. (2021). *Origen de minerales metálicos en la provincia de el oro distrito minero Portovelo Zaruma usos valor económico utilidad y beneficios* [Tesis de Grado]. Universidad Técnica de Machala.
- Cajas, S. (2024). *Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Calderón, M. (2023). *Optimización del proceso de molienda-flotación de minerales, mediante el análisis metalúrgico del elemento plata en la planta de Beneficio Ecoluxen S.A. ubicada en el sector Balsones, parroquia y cantón Portovelo, provincia de El Oro* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Cañola, C., Gallego, A. y García, W. (2015). Caracterización mineralógica y mineralogía de procesos aplicada a la mina de veta “La Esperanza”, ubicada en la Vereda Cedeño parte alta del municipio de Támesis, Antioquia. *Revista Colombiana de Materiales*, 6, 54–68.
- Casal, J. y Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. *Rev. Epidem*, 1, 3–7. <https://n9.cl/kmn4z>
- Cerda, M. (2021). Determinación del nivel de carga Jc y bolas Jb por consumo de energía y presión en molinos de molienda. *Researchgate*.
- Farfán, F. (2018). *Agroclimatología del Ecuador*. Editorial Abya-Yala. <https://n9.cl/q89rkp>
- Folchi, M. (2005). Los efectos ambientales del beneficio de minerales metálicos: un marco de análisis para la historia ambiental. *Varia Historia*, 21(33), 32–57. <https://doi.org/10.1590/S0104-87752005000100003>
- GEOPORTAL. (2015). *Glosario de Geoformas, Escala 1:25.000*. <https://fliphtml5.com/es/wtae/wxuu/basic>
- Goldmann, A. (2018). “Determinación de la distribución de la porosidad en rocas mediante resistividad eléctrica. CEATEN. <https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/802/1/1Goldmann.pdf>

- HAZEMAG. (s.f.). *Avanzada planta de procesamiento de minerales*. Retrieved July 15, 2024, from <https://www.hazemag.com/es/solutions/minerals-processing/>
- Hernández, J., González, A. y Sánchez, M. (2016). Optimización del proceso de molienda en la extracción de oro. *Revista de Ingeniería En Minería*, 23(4), 12–25.
- Iglesias, D. (2013, Noviembre 21). *Propiedades físicas-Mecánicas de los materiales*. Wordpress. <https://danybarker.wordpress.com/2013/11/21/397/>
- IGME. (2014). *Hoja Geológica de Zaruma* .
- Infinitia, I. C. (2021, Diciembre 20). *Clasificación de las propiedades de los materiales*. <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/clasificacion-propiedades-materiales/>
- Instituto Geofísico. (2023). *INFORMES DE LOS ÚLTIMOS SISMOS*. <https://www.igepn.edu.ec/portal/eventos/informes-ultimos-sismos.html>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI*. (2024). <https://www.inamhi.gob.ec/>
- Lamorú, A. (2012). *Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara* [PDF]. Instituto Superior Minero Metalúrgico De Moa.
- López, K. (1999). *Aplicación de sensores remotos en el estudio de áreas propicias para la prospección de aguas subterráneas en la zona occidental de Loja* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Lunar, R. y Oyarzun, R. (1991). *Yacimientos Minerales: Técnicas de estudio, tipos evolución metalogénica, exploración*. Centros de Estudios Ramón Areces.
- MAGAP-SIGTIERRAS. (2017). *Memoria Técnica Geomorfología a Nivel Nacional. Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional escala 1: 25 000*.
- Mañas, S. (2024). *Fluorescencia de Rayos X (FRX)*. Universidad de Almería. <https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/analisis-elemental/fluorescencia-de-rayos-x>

- Martines, E. y Lira, L. (2010). *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos*. <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>
- Meraz, P. (2019, Abril 10). *La Variabilidad y su Impacto en las Relaciones Personales, Técnicas, Operativas y de Proceso en las Operaciones Mineras*. <https://es.linkedin.com/pulse/la-variabilidad-y-su-impacto-en-las-relaciones-de-meraz-vinaja->
- Metso. (s.f.). *Optimización de procesos para la minería*. Retrieved July 22, 2024, from <https://www.metso.com/es/productos-y-servicios/servicios/optimizacion-de-procesos-y-servicios-conectados/optimizacion-de-procesos-para-la-mineria/>
- Morales, K. (2017). *Carbón activado para la adsorción de oro de soluciones cianuradas a partir de carbones minerales* [Tesis de Grado, Universidad del Valle]. <https://n9.cl/2c88c>
- Narváez, R. y Guerrón, G. (2020). “*Análisis químico para la determinación de oro*” por el método de ensayo al fuego. Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- Peinado, L. (2017). *Sistema de control y monitoreo para planta de trituración de mineral* [PDF]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pérez, N., Pérez, A., Cervantes, M. y Garnica, P. (2019). *Resistencia a compresión simple de una arena estabilizada con un polímero*. Publicación Bimestral de Divulgación Externa. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=479&IdBoletin=176>
- Rodas, M. (2022). *Ecuador | planetGOLD*. <https://www.planetgold.org/es/ecuador>
- Rodríguez-Reyes, J. (2021). El futuro del procesamiento de minerales y la metalurgia extractiva. *Revista de Minería*. <https://www.revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/el-futuro-del-procesamiento-de-minerales-y-la-metalurgia-extractiva>
- Roig, R., Roma, J., Alfonso, J. y Quiles, R. (2017). *Minería de datos*. Editorial UOC.
- Salinas, C. y Pillajo, E. (s.f.). Control de los impactos ambientales distrito aurífero Portovelo Zaruma. In *INGEMMET*. PDF. Retrieved July 30, 2024, from <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CLG12-63.pdf>

- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, R., Patiño, F., Hernández, J. y Hernández, L. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono . *Revista de La Sociedad Química de México*, 48(4), 315–320.
- Tapia, E. (2023). *57 plantas de material minero funcionan sin permiso ambiental*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/plantas-procesamiento-permiso-ambiental/>
- Vela, N., Guamán, M. y González, N. (2019). Biorremediación eficiente de efluentes metalúrgicos mediante el uso de microalgas de la amazonía y los andes del Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 917–929. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992019000400917&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992019000400917&script=sci_arttext)
- Velásquez, A. (s.f.). *Determinación de la densidad de un líquido*. Retrieved July 22, 2024, from [http://www.dcb.unam.mx/cerafin/bancorec/ejenlinea/2L\\_Densidad.pdf](http://www.dcb.unam.mx/cerafin/bancorec/ejenlinea/2L_Densidad.pdf)
- Wills, B. A. (1994). *TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES*.

## 11. Anexos

### Anexo 1. Ficha de campo para análisis del proceso actual

ANALISIS DE PROCESOS ACTUALES						
<b>Planta:</b>				<b>Código</b>		
<b>Coordenadas:</b>	<b>Datum</b>		<b>X:</b>	<b>Y:</b>		<b>Z:</b>
<b>Titular:</b>						
<b>Elaborado por:</b>						
<b>Capacidad de procedimiento/ día</b>						
<b>Observaciones:</b>						
STOCKEO DE MINERAL						
<b>Coordenadas</b>	<b>X:</b>		<b>Y:</b>		<b>Z:</b>	
<b>Capacidad:</b>			<b>Destino:</b>			
<b>Dimensiones:</b>						
TRITURACIÓN						
<b>Trituración primaria:</b>				<b>Tiempo:</b>		
<b>Coordenadas: DATUM</b>	<b>X:</b>		<b>Y:</b>		<b>Z:</b>	
<b>Diámetro de ingreso:</b>			<b>Diámetro de salida:</b>			
<b>Maquinaria:</b>			<b>Modelo/ serie:</b>			
<b>Potencia:</b>			<b>Capacidad:</b>			
<b>Cantidad de equipos:</b>			<b>CE:</b>			
<b>Dimensiones:</b>						
<b>Mantenimiento:</b>						
<b>Observaciones</b>						
<b>Trituración secundaria:</b>				<b>Tiempo:</b>		
<b>Coordenadas:</b>	<b>X:</b>		<b>Y:</b>		<b>Z:</b>	
<b>Diámetro de ingreso:</b>			<b>Diámetro de salida:</b>			
<b>Maquinaria:</b>			<b>Modelo/ serie:</b>			
<b>Potencia:</b>			<b>Capacidad:</b>			
<b>Cantidad de equipos:</b>			<b>CE:</b>			
<b>Dimensiones:</b>						
<b>Mantenimiento:</b>						
<b>Observaciones:</b>						
MOLIENDA						
<b>Tipo de Molienda:</b>						
<b>Coordenadas:</b>	<b>X:</b>		<b>Y:</b>		<b>Z:</b>	
<b>Diámetro de ingreso:</b>			<b>Diámetro de salida:</b>			
MOLINOS						
<b>Molino</b>	<b>Potencia</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Modelo/serie</b>	

<b>CE:</b>					
<b>Consumo de bolas de acero</b>					
<b>Consumo de agua:</b>					
<b>Equipos complementarios</b>					
<b>Equipos</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Modelo/serie</b>	
Hidrociclón					
<b>Mantenimiento:</b>					
<b>Observaciones:</b>					
<b>CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA</b>					
<b>Tipo de concentración:</b>					
<b>Coordenadas:</b>	<b>X:</b>	<b>Y:</b>	<b>Z:</b>		
<b>Concentradores:</b>		<b>Modelo/ serie:</b>			
<b>Potencia:</b>		<b>Capacidad:</b>			
<b>Cantidad:</b>		<b>Dimensiones:</b>			
<b>Consumo de agua:</b>					
<b>Hidrociclones:</b>		<b>Modelo serie:</b>			
<b>Potencia:</b>		<b>Capacidad:</b>			
<b>Dimensiones:</b>		<b>Cantidad</b>			
<b>Consumo de agua:</b>					
<b>Mantenimiento:</b>					
<b>CIANURACIÓN</b>					
<b>Tipo de cianuración:</b>					
<b>Tanques de cianuración:</b>		<b>Modelo/serie</b>			
<b>Capacidad:</b>		<b>Cantidad:</b>			
<b>Dimensiones:</b>		<b>Dosificación de CN-</b>			
<b>Dosificación de carbón</b>		<b>Dosificación de cal</b>			
<b>Observaciones:</b>					

**Anexo 2.**

*Caracterización macroscópica de muestras de mano del sector San José*

---

**CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA DE MUESTRAS DE MANO DEL SECTOR SAN JOSÉ**

<b>Ubicación:</b>	X: 651472 Y: 9587514	<b>Cód. muestra:</b>	SJ01	<b>Laboratorio:</b> Laboratorio de mineralogía y petrografía de la carrera de Ingeniería en Minas de la Universidad Nacional de Loja
<b>Fecha:</b>	17/10/2024	<b>Sector:</b>	San José	
<b>Tamaño de la muestra:</b>	Largo 13 cm.; ancho 8 cm.			
<b>Forma de la muestra:</b>	Irregular			

**Roca de Veta**



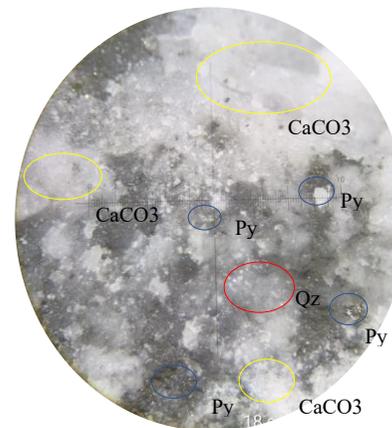
**Veta encajada en roca:**

Roca Volcánica Extrusiva (Brecha Andesítica)

**Color:** Gris Claro

**Textura:** Afanítica

**Mineralogía: Py, Qz; CaCO<sub>3</sub>**



**Pirita (FeS<sub>2</sub>)**

*Color =*  
Amarillento  
*Raya =* Gris oscuro  
*Brillo =* Metálico  
*Tamaño =* < 0.7 mm

**Cuarzo (SiO<sub>2</sub>)**

**Calcita (CaCO<sub>3</sub>)**

---

Veta de carbonatos encajada en roca brecha andesítica, presenta mineralización de pirita, se puede determinar presencia de alteración hidrotermal

**Análisis y técnicas:**

Análisis visual y con estereomicroscopio

Cuarzo

Feldspatos

**Composición mineral:**

Plagioclasas

**CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA DE MUESTRAS DE MANO DEL SECTOR SAN JOSÉ**

**Ubicación:**

X: 651469

**Cód.**

SJ02

**Laboratorio:** Laboratorio de

Y: 9587520

**muestra:**

mineralogía y petrografía de la carrea

**Fecha:**

17/10/2024

**Sector:**

San José

de Ingeniería en Minas de la

**Tamaño de la muestra:**

Largo 8 cm.; ancho 5 cm.

Universidad Nacional de Loja

**Forma de la muestra:**

Irregular

**Roca de Veta**

---



**Roca caja:**

Roca Volcánica Extrusiva (Brecha Andesítica)

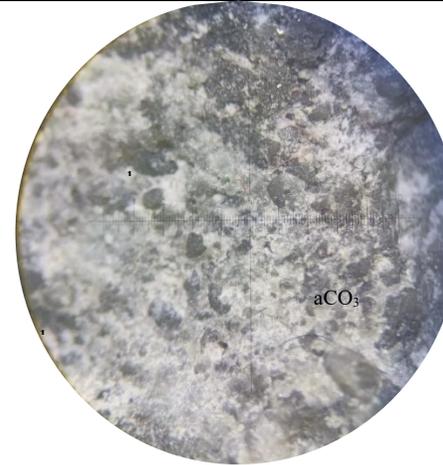
**Color:** Gris Claro

**Textura:** Piroclástica (Afanítica)

Brecha andesítica de color gris clara, observándose clastos angulares y subangulares de 0.5 a 1.50 centímetros, presenta vetillas de carbonatos.

**Análisis y técnicas:**

**Composición mineral:**



Análisis visual y con estereomicroscopio

Cuarzo

Feldespatos

Plagioclasa

Piroxeno

Calcita

Moscovita

Pirita

*Principales*

*Secundarios*

*Mineralización*

**Anexo 3**  
Ley de stock de mineral



## INFORME DE ENSAYO

Nº. 32023

**Cliente** : Celso Atarihuana  
**Dirección** : Loja  
**Tipo de Muestra** : Mineral  
**Envase** : Funda Plástica  
**Condición de la Muestra** : En buenas condiciones para analizar  
**Recepción de Muestra Nº** : 22222  
**Fecha de Recepción de Muestras** : 2024-09-16 11:29:26.0  
**Fecha Inició Análisis** : 2024-09-17  
**Fecha Terminó Análisis** : 2024-09-17  
**Fecha de Emisión del Informe** : 2024-09-17

Los datos subrayados son proporcionados por el cliente. Albexxus no es responsable por dicha información.  
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio Albexxus

Las actividades del laboratorio se realizan en la sede principal, Piñas.  
Los testigos de las muestras se almacenan por un periodo de 2 meses

**CINTHIA  
MELINA  
RIOS  
AGUILAR**  
Digitally signed by CINTHIA  
MELINA RIOS AGUILAR  
DN: cn=CINTHIA MELINA  
RIOS AGUILAR,  
serialNumber=0752223198-  
310124174234,  
ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE  
INFORMACION, o=SECURITY  
DATA S.A. 2, c=EC  
Date: 2024.09.17 18:40:01  
+05'00'

---

**Cinthia Ríos Aguilar**  
**Jefe de Laboratorio**

ALB-FOR-07 Ver. 06 27/10/2023

**Página 1 de 2**

# INFORME DE ENSAYO

Nº. 32023

## RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au	#Malla*	Au CN*
	Nº	Alb.	g/t	%	g/t
Muestra 1 Cuarzo	1	121564	16.50	-	-
Muestra 2 Salida de Molino1	1	121565	5.17	-	5.09
Muestra 3 Granulometria	1	121566	-	200 - 52	-
Muestra 4 Relave	1	121567	1.13	-	-

Comp. N°: Número de muestras que conforman el compuesto // Cod. Alb.: Código Albexxus  
 Los ensayos marcados con (\*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.  
 Los resultados solo están relacionados con los items de ensayo.  
 Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.  
 Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 19-007.

### MÉTODOS:

1. Au, Ag: ALB-MET-01. Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, AS, Fe: ALB-MET-02. Determinación de Metales por Digestión con HNO<sub>3</sub> (c) por Absorción Atómica.
3. Au, Ag(Pureza): ALB-MET-04. Determinación de Au y Ag por copelación en barras doré.
4. Humedad: NTP 122.015 1974 (Revisado el 2017). Contenido de Humedad.
5. Au (EF/AAS): ALB-MET-05. Determinación de Au por ensayos al fuego – AAS.
6. Cu (Volumetría): ALB-MET-06. Determinación de cobre por volumetría.

### COMENTARIOS:

Tiempo: 15 Horas Consumo Cal: 2,46 Kg/Tm Adición de Cianuro: 12,164 Kg/Tm Consumo Cianuro: 0,76 Kg/Tm

FINAL DEL DOCUMENTO

ALB-FOR-07 Ver. 06 27/10/2023

Página 2 de 2

**Anexo 4.**

Análisis de compresión simple



**ESTSUELCON**

**ESTSUELCON CIA. LTDA.**  
ESTUDIOS DE SUELOS, LABORATORIO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORIA  
**ENSAYO DE COMPRESIÓN CÚBICA EN ROCAS**

<b>PROYECTO :</b> "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA PARA LA RECUPERACIÓN DE MINERAL AU, EN LA PLANTA DE BENEFICIO MAFRE UBICADA EN PORTOVELO"							
<b>OBRA :</b> PROYECTO DE TESIS							
<b>SOLICITA:</b> ING. CELSO ATARIHUANA							
<b>UBICACIÓN :</b> CANTON PORTOVELO, PROVINCIA DE EL ORO							
<b>FECHA :</b> sep-24		<b>OPERADOR</b>		<b>D.O.</b>		<b>PROFUNDIDAD:</b> MINA SUBTERRANEA	
1.- DENSIDAD							
Muestra	Peso Aire	Peso Sumergido	Peso Seco	D. Masiva	D. S.S.S.	D. Aparente	Absorción
Código	g	g	g	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%
Nº 1 - CAJA	506.61	366.62	594.92	2.48	2.53	2.61	1.96%
Nº 2 - VETA	599.39	371.24	596.13	2.61	2.63	2.65	0.55%
2.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN							
Muestra	Largo	Ancho	Altura	Area	Volumen	Carga	Esfuerzo
Código	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	Kg	Kg/cm <sup>2</sup>
Nº 1 - CAJA	5.11	5.04	5.14	25.75	132.38	5,516.66	214.20
Nº 2 - VETA	5.11	4.85	5.13	24.78	127.14	22,036.06	889.14



Tele-fax: 2540594. Celular: 093883061-0999692335-0980253180 Email: estsuelcon@gmail.com

## Anexo 5. Análisis mineralógico

Tiempo : 2024-10-18 16:09:02

Método : geoChem3-Extra  
ID periódico : 4

Serial Number : 843931

Elapsed Time : 50 s

Química

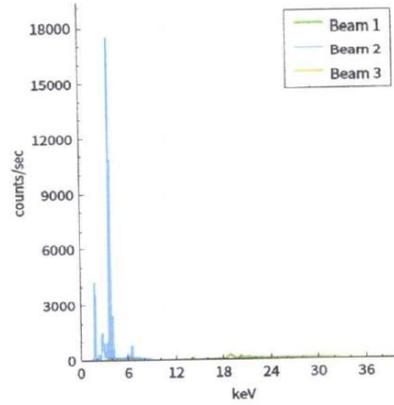
Elapsed time: 50.0s

UserFactorName: As

CompoundTemplate:New template (0)

El	PPM	+/- 3σ
Al	1.303%	0.073
SiO2	42.91%	0.43
P	103	95
S	3460	110
K	7990	140
Ca	14.48%	0.14
Ti	560	400
Cr	209	73
Mn	2020	120
Fe	7140	190
Cu	82	15
Zn	39	10
As	57	7
Rb	37	4
Sr	232	7
Zr	16	5
Mo	7	6
Ag	6	6
Cd	27	21
In	10	8
Sb	51	40
Ba	916	61
Pb	20	5
Th	13	12
El	PPM	+/- 3σ
Mg	ND	<2900
Sc	ND	<580
V	ND	<150
Co	ND	<80
Ni	ND	<18
Se	ND	<6
Y	ND	<8
Nb	ND	<8
Sn	ND	<58
La	ND	<2100
Ce	ND	<2500
Pr	ND	<3400
Nd	ND	<4900

Espectro



Notas

Sample ID: celso Atarihuana

Project No.: Veta

Sample Type: In Situ

Operator:

Notes:

Fecha: 18/10/2024

Firma: *[Handwritten Signature]*

Tiempo : 2024-10-18 16:30:44

Método : geoChem3-Extra  
ID periódico : 8

Serial Number : 843931

Elapsed Time : 50 s

Química

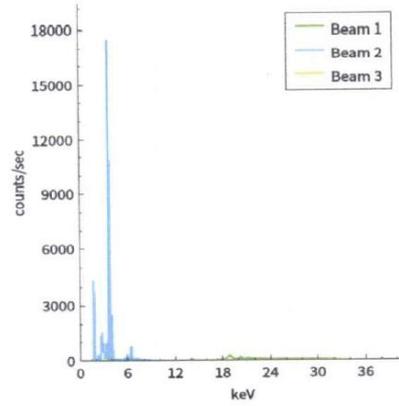
Elapsed time: 50.0s

UserFactorName: As

CompoundTemplate: New template (0)

El	PPM	+/- 3σ
Au	ND	<0.5

Espectro



Notas

Sample ID: Celso Atarihuana

Project No.: Veta

Sample Type: In Situ

Operator:

Notes:

Fecha: 18/10/2024  
Firma: *[Handwritten Signature]*

**Anexo 6.**  
Prueba de salida de Molino



## INFORME DE ENSAYO

Nº. 32518

<b>Cliente</b>	: Celso Atarihuana
<b>Dirección</b>	: Loja
<b>Tipo de Muestra</b>	: Mineral
<b>Envase</b>	: Funda Plástica
<b>Condición de la Muestra</b>	: En buenas condiciones para analizar
<b>Recepción de Muestra Nº</b>	: 22573
<b>Fecha de Recepción de Muestras</b>	: 2024-10-17 14:18:17.0
<b>Fecha Inició Análisis</b>	: 2024-10-18
<b>Fecha Terminó Análisis</b>	: 2024-10-18
<b>Fecha de Emisión del Informe</b>	: 2024-10-19

Los datos subrayados son proporcionados por el cliente. Albexus no es responsable por dicha información.  
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio Albexus

Las actividades del laboratorio se realizan en la sede principal, Piñas.  
Los testigos de las muestras se almacenan por un periodo de 2 meses

**CINTHIA  
MELINA  
RIOS  
AGUILAR**

Digitally signed by CINTHIA  
MELINA RÍOS AGUILAR  
DN: cn=CINTHIA MELINA  
RIOS AGUILAR,  
serialNumber=0752223198-  
310124174234,  
ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE  
INFORMACION, o=SECURITY  
DATA S.A. 2, c=EC  
Date: 2024.10.19 11:57:55  
-05'00'

**Cinthia Ríos Aguilar**  
**Jefe de Laboratorio**

ALB-FOR-07 Ver. 06 27/10/2023

Página 1 de 2

# INFORME DE ENSAYO

Nº. 32518

## RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au	Au CN*
	Nº	Alb.	g/t	g/t
Prueba Salida de Molino de Bolas	1	122813	13.12	12.80

Comp. N°: Número de muestras que conforman el compuesto // Cod. Alb.: Código Albøxus

Los ensayos marcados con (\*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

Los resultados solo están relacionados con los ítems de ensayo.

Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.

Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 19-007.

### MÉTODOS:

1. Au, Ag: ALB-MET-01. Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, AS, Fe: ALB-MET02. Determinación de Metales por Digestión con HNO<sub>3</sub> (cc) por Absorción Atómica.
3. Au, Ag (Pureza): ALB-MET-04. Determinación de Au y Ag por copelación en barras doré.
4. Humedad: NTP 122.015 1974 (Revisado el 2017). Contenido de Humedad.
5. Au (EF/AAS): ALB-MET-05. Determinación de Au por ensayos al fuego – AAS.
6. Cu (Volumetría): ALB-MET-06. Determinación de cobre por volumetría.

### COMENTARIOS:

Tiempo: 15 Horas Consumo Cal: 4,126 Kg/Tm Adición de Cianuro: 12,048 Kg/Tm Consumo Cianuro: 1,15 Kg/Tm

FINAL DEL DOCUMENTO

ALB-FOR-07 Ver. 06 27/10/2023

Página 2 de 2

Principal Piñas: Vía Piñas – Portovelo. Sector Cazaderos a 500 m del Hospital Nuevo de Piñas / Teléfono: [593] 72975949 / Celular: [593] 992143528

Sucursal Camilo Ponce Enriquez: Av. 28 de marzo y Río 7, frente al Municipio Antiguo / Teléfono: [593] 72430697 / Celular: [593] 980938049

www.albøxus.com / e-mail: albøxus@yahoo.com / Ecuador - Sudamérica

**Anexo 7.**  
Certificado de traducción del resumen

Loja, 26 de febrero de 2025

Celso Xavier Atarihuana Sandoval, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad N° 1103527832, poseedor del **Nivel Avanzado C1-INGLÉS**, certificado **SETEC No. MDT-OC-657418**.

Por medio del presente tengo a bien **CERTIFICAR**

Que he realizado la traducción al idioma inglés de él resumen derivado del Trabajo de Titulación denominado **“Optimización del proceso de molienda para la recuperación del mineral oro (Au) en la planta de beneficio MAFRE código 390379, ubicado en el sector El Salado, de la Parroquia Portovelo, del Cantón Portovelo, de la Jurisdicción de la provincia de El Oro”**, de autoría del Ing. Celso Xavier Atarihuana Sandoval, con cédula de identidad N° 1103527832, graduado de la carrera de Ingeniería en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial y egresado de la maestría en Minas Mención en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva de la Universidad Nacional de Loja.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad

Atentamente:

**Firma:**

**Nombre: Celso Xavier Atarihuana Sandoval**

**Cédula de identidad: 1103527832**